

ISSN 0002-1881
Июль 2024

Номер 7



АГРОХИМИЯ



НАУКА
— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 7, 2024

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Оценка информативности результатов наблюдений за почвой в стационарном опыте

О. В. Волынкина

3

Удобрения

Зависимость фотосинтетической деятельности и урожайности сортов сливы от применения некорневых подкормок в аридной зоне Северного Прикаспия

Т. И. Александрова

10

Регуляторы роста растений

Применение серосодержащего регулятора роста Тиатон для укоренения микрочеренков винограда в культуре *in vitro*

Э. М. Фарахат, С. Л. Белопухов, И. И. Серегина

14

Оценка урожайности тритикале при воздействии пероксида водорода в присутствии катализаторов окислительного характера

*Е. К. Барнашова, С. Н. Сергеев, М. И. Будник, К. А. Тараскин, С. С. Деревягин,
О. Т. Касаикина, Л. М. Апашева, Е. Н. Овчаренко, А. В. Лобанов, А. В. Грудзинский*

21

Пестициды

Возможность совместного применения тимола и карвакрола для контроля численности персиковой тли *Myzus persicae* (Sulzer, 1776)

Е. А. Степанычева, М. О. Петрова, Т. Д. Черменская

29

Агроэкология

Влияние сорта на потребление и вынос питательных веществ зерновыми культурами

С. А. Шафран, С. Б. Виноградова

36

Фотосинтетическая и углерод секвестрирующая способность левзеи сафлоровидной и накопление органического углерода в дерново-подзолистой почве

Н. Е. Завьялова, Г. П. Майсак, И. В. Казакова, О. В. Иванова

48

Экотоксикология

Оценка модифицирующего влияния цинка и меди на токсический стресс растений ячменя, вызванный кадмием

А. В. Дикарев, Д. В. Дикарев, Д. В. Крыленкин

57

Содержание и распределение радионуклидов в профиле светло-серой лесной почвы и растениях агроценозов

А. А. Уткин, И. Б. Нода

73

Динамика показателей фитотоксичности чернозема обыкновенного при его загрязнении наночастицами серебра

Н. И. Цепина, С. И. Колесников, Т. В. Минникова, А. С. Русева

82

ДИСКУССИЯ

Опыт количественного изучения разнообразия минеральных почвенных тел (педоматриц)

А. С. Фрид

88

Contents

No. 7, 2024

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Evaluation of the Informative Value of the Results of Soil Observations in a Stationary Experiment

O. V. Volynkina

3

Fertilizers

Dependence of Photosynthetic Activity and Yield of Plum Varieties
on the Use of Non-Root Fertilizing in the Arid Zone of the Northern Caspian Sea

T. I. Alexandrova

10

Plant growth regulators

Use of the Sulfur-Containing Growth Regulator Tiaton for Rooting Micro-Gears
of Grapes in Culture *in vitro*

E. M. Farahat, S. L. Belopukhov, I. I. Seregina

14

Evaluation of Triticale Yield under the Influence of Hydrogen Peroxide
in the Presence of Oxidative Catalysts

*E. K. Barnashova, S. N. Sergeev, M. I. Budnik, K. A. Taraskin, S. S. Derevyagin, O. T. Kasaikin,
L. M. Apasheva, E. N. Ovcharenko, A. V. Lobanov, A. V. Grudzinsky*

21

Pesticides

Possibility of Combined Use of Thymol and Carvacrol to Control the Number
of Peach Aphids *Myzus persicae* (Sulzer, 1776)

E. A. Stepanycheva, M. O. Petrova, T. D. Chermenskaya

29

Agroecology

Effect of Variety on Nutrient Intake and Nutrient Removal by Cereals

S. A. Shafran, S. B. Vinogradova

36

Photosynthetic and Carbon Sequestering Ability of Safflower *Leucea*
and Accumulation of Organic Carbon in Sod-Podzolic Soil

N. E. Zavyalova, G. P. Maysak, I. V. Kazakova, O. V. Ivanova

48

Ecotoxicology

Assessment of the Modifying Effect of Zinc and Copper on Toxic Stress
of Barley Plants Caused by Cadmium

A. V. Dikarev, D. V. Dikarev, D. V. Krylenkin

57

Content and Distribution of Radionuclides in the Profile of Light Gray Forest Soil
and Agrocenosis Plants

A. A. Utkin, I. B. Noda

73

Dynamics of Phytotoxicity Indicators of Ordinary Chernozem
when It Is Contaminated with Silver Nanoparticles

N. I. Tsepina, S. I. Kolesnikov, T. V. Minnikova, A. S. Ruseva

82

DISCUSSION

Experiment of Quantitative Study of Variety of Mineral Soil Bodies (Pedomatrix)

A. S. Frid

88

УДК 631.41:631.42

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПОЧВОЙ В СТАЦИОНАРНОМ ОПЫТЕ

© 2024 г. О. В. Волынкина*

*Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия***E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru*

Оценили эффективное и потенциальное плодородие выщелоченного чернозема в условиях полевого стационарного эксперимента на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ с применением 2-х технологий выращивания культур. В первой части опыта изучали севооборот кукуруза—пшеница—пшеница—овес при ежегодной вспашке, во второй — бессменную пшеницу после стерневого фона. Первая технология отличалась более высоким эффективным плодородием, большим количеством растительных остатков, за счет чего по содержанию гумуса проявилось ее преимущество. Положительное влияние удобрений на показатели потенциального плодородия почвы наблюдали при внесении 2-й и 3-й доз азота на фоне применения фосфора.

Ключевые слова: зернопропашной севооборот, бессменная пшеница после стерни, азотное и фосфорное удобрения, урожайность, растительные остатки, гумус, подвижные питательные вещества, кислотность.

DOI: 10.31857/S0002188124070012, **EDN:** CGMKDO

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость во времени оптимальных уровней агрохимических признаков плодородия почвы стабилизирует продуктивность сельскохозяйственных культур. Важно знать, насколько управляемы и регулируемы показатели, тесно связанные с урожайностью. К ним относится уровень содержания подвижных питательных веществ. Особое внимание уделяется содержанию органического вещества в почве, которое представлено гумусом, остатками растительного и животного происхождения разной степени разложения. Связь продуктивности растений с этим показателем проявляется как напрямую, так и опосредованно. В агроценозах наряду с минерализацией легкоподвижной части гумуса происходит пополнение его запаса за счет трансформации растительных остатков. Сбалансированность этих процессов способствует сохранению содержания гумуса. В других случаях наблюдают снижение или повышение содержания гумуса. В литературе обсуждаются все 3 ситуации. На обыкновенном черноземе в опытах [1] без удобрения при исходном содержании гумуса 3.38% через 5 лет проявилось его снижение на 0.04%, через 32 года — на 0.92%. Применение удобрения в дозе N30P30 уменьшило потери до — 0.46%, а при полном минеральном удобрении до — 0.36%. Одностороннее внесение N150 или P30–90 вызывало снижение урожайности и потери

гумуса на 0.74–0.82%. Повышение содержания гумуса до 3.94% обеспечило удобрение почвы в дозе N150P120K120. На подобные закономерности указывали и другие исследователи [2–4].

Повышение содержания гумуса за счет внесения навоза и полного минерального удобрения показано в Красноярских исследованиях, в опытах Донского и Воронежского ГАУ, Белгородского НИИСХ, СибНИИ земледелия и химизации сельского хозяйства [5–9]. Установлено несколько важных факторов изменчивости содержания гумуса. Например, в работе [10] авторы считали, что вклад в данный показатель на 22% вносит такой вид органического удобрения, как навоз или солома, последняя действовала сильнее. На 33% изменялся результат определения содержания гумуса за счет глубины отбора пробы.

Определенное воздействие на содержание гумуса оказывает вид обработки почвы. В опытах Омских ученых темпы убыли запаса гумуса при минимальной обработке снижались в 2 раза по отношению к вспашке [11]. На темно-серой почве в экспериментах Орловских исследователей поверхностная обработка почвы обеспечивала повышение содержания гумуса по отношению к вспашке в слоях 0–10 и 10–20 см, а в слое 20–30 см различий не было обнаружено [12]. В работе [13] авторы

заметили, что лабильная фракция гумуса при нулевой обработке локализуется в слое 0–10 см, а при вспашке — на глубине запашки растительных остатков. В стационарном опыте на выщелоченном черноземе в Краснодарском крае с 2006 г. следили за изменением гумусового состояния почвы при 3-х способах обработки почвы. В севообороте с озимой пшеницей, подсолнечником и кукурузой на зерно без пара — традиционная система обработки почвы сохраняла или несколько повышала содержание гумуса с исходной величины в слое 0–10 см с 3.60 до 3.60–3.70–4.03% в 2015, 2016 и 2017 г. соответственно. Системы минимально-мульчирующая и такая же с разуплотнением в эти 3 года показали больший результат — 4.06–4.17–4.25%, что объяснялось разной скоростью разложения остатков [14]. В модельном опыте на типичном черноземе с 2012 г. исследовали трансформацию растительных остатков. За год солома озимой пшеницы разложилась на 25% и в следующие 2 года — на 72 и 87%. Скорость разложения стеблей и корней подсолнечника за эти 3 года была иной: 45, 73 и 90% [15].

В стационарных экспериментах более детально исследуют динамику содержания гумуса в почве с одновременным поиском оптимальных доз удобрений для стабилизации его уровня и продуктивности культур, в таких опытах проявление случайных факторов уменьшено. В полевых исследованиях возможен подбор методов химического анализа почвы и растений для диагностики условий минерального питания, разработка индексов обеспеченности, коэффициентов использования питательных веществ из почвы и удобрений, что необходимо для этапа внедрения результатов опытов в производство. При этом уточняются шкалы обеспеченности растений питательными элементами [16]. Однако только содержание в почве подвижных форм элементов питания не считается достаточным для определения оптимальных доз, что в свое время подчеркивал Д.Н. Прянишников, который на первый план выдвигал выводы полевого опыта [17]. Цель работы — оценка информативности результатов наблюдений за почвой в стационарном опыте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект наблюдения — выщелоченный чернозем при применении 2-х технологий выращивания культур севооборота. В первой части стационарного опыта был использован севооборот кукуруза—пшеница—пшеница—овес при ежегодной вспашке (1971–1998 гг.), во второй — бессменная пшеница после стерни (1999–2022 гг.). Эксперимент заложен В.И. Волынкиным в 1971 г., исполнитель опыта с 1993 г. — автор статьи. Солому оставляли на поле с 1978 г. — со времени использования комбайна

Сампо-500. Агрохимические свойства выщелоченного чернозема маломощного малогумусного среднесуглинистого: pH_{KCl} 6.2–6.4 ед. при закладке опытов и 5.0–5.2 ед. в настоящее время, содержание гумуса по Тюрину — 4.5%, общего азота по Кьельдалю — 0.20%, общего фосфора — 0.07%, суммы поглощенных Са и Mg — 20–22 мэкв/100 г (по Каппену). Содержание подвижного фосфора и обменного калия по Чирикову в слое почвы 0–20 см на участке под опытом было равно 40–50 и 250–350 мг/кг соответственно. Отбор почвы вели весной перед внесением удобрений. Наблюдения за изменчивостью во времени и после внесения удобрений таких свойств почвы, как содержание гумуса, суммы поглощенных оснований и кислотности почвы вели периодически. Содержание подвижных форм питательных веществ определяли ежегодно. Вносили удобрения — аммиачную селитру и аммофос весной перед посевом локально сеялкой СЗ-3,6 на глубину 5 см.

Место проведения исследования — Центральное опытное поле Курганского НИИСХ. Характеристика погодных условий имеет важнейшее значение для объяснения величины урожая. Периодически повторявшиеся майские и июньские засухи — типичное явление для Зауралья. В центральной зоне Курганской обл. годовое количество осадков — 350–369 мм, за вегетацию — 190–207 мм. Продолжительность периода с температурой 10°C — 130–134 сут, в начале наступления такой температуры средний запас продуктивной влаги в метровом слое почвы равен 110–150 мм. Общая площадь делянки — 270 м², учетная — 90 м². Повторность вариантов трехкратная. Высеивали районированные сорта культур. Учет урожая кукурузы вели скашиванием растений на площадке 14 м², взвешиванием и определением влажности биомассы. Зерновые культуры скашивали напрямую комбайном Сампо-500 с отбором образца для анализа на влажность и сорность. Урожай приведен к 14%-ной влажности и 100%-ной чистоте. Количество растительных остатков подсчитали для соломы в снопах, взятых перед уборкой, для корней и жнивья — по Левину [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продуктивность 2-х исследованных агроценозов существенно отличалась. Урожайность культур в севообороте в условиях ежегодной вспашки была значительно больше, чем во 2-й части опыта с бессменной пшеницей после стерневого фона (табл. 1, 2).

Эти различия сказались на количестве растительных остатков, сумма которых была больше в первой части опыта. Коэффициент гумификации был равен 0.15. В среднем за 50 лет эксперимента

Таблица 1. Продуктивность зернопропашного севооборота (1971–1998 гг.)

Вариант	Урожайность, ц к.е./га					Прибавка, ± к контролю	Окупаемость, кг к.е./кг
	кукуруза	1-я и 2-я пшеница после кукурузы	овес	за севооборот	среднее за год		
Контроль	38.5	18.6	23.8	99.5	24.9	—	—
N25	44.7	21.0	25.2	112	28.0	3.1	12.4
N50	47.1	21.6	25.6	116	29.0	4.1	8.2
N75	47.5	20.9	24.9	114	28.6	3.7	4.9
N25P40	49.3	23.4	28.7	125	31.2	6.3	9.7
N50 P40	57.6	25.4	28.4	137	34.2	9.3	10.3
N75 P40	59.6	24.5	28.3	137	34.2	9.3	8.1
HCP ₀₅	9.5	2.0–2.7	1.3				

Таблица 2. Продуктивность бессменной пшеницы после стерни (1999–2023 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га	± к контролю	Окупаемость, кг /кг
Контроль без удобрений	9.7	—	—
N20	11.5	1.8	9.0
N40	12.0	2.3	5.8
N60	11.8	2.1	3.5
N20P20	13.1	3.4	8.5
N40P20	15.2	5.5	9.2
N60P20	15.9	6.2	7.8
HCP ₀₅	1.2–3.1		

Таблица 3. Влияние состава удобрения и доз азота на количество растительных остатков и баланс ОВг

Вариант	Количество растительных остатков, т/га			Баланс ОВг за год, т/га		
	1-я часть опыта, 28 лет	2-я часть опыта, 22 года	средне-взвешенное за 50 лет	1-я часть опыта, 28 лет	2-я часть опыта, 22 года	средне-взвешенное за 50 лет
Контроль без удобрений	3.77	2.99	3.43	0.02	–0.13	0.05
N40	4.02	3.77	3.91	0.10	0.08	0.09
N25–20P40–20*	4.68	3.84	4.31	0.16	0.16	0.16
N50–40P40–20	4.97	4.49	4.76	0.21	0.27	0.23
N75–60P40–20	5.18	4.80	5.01	0.24	0.35	0.29

баланс гумифицированного органического вещества (**ОВг**) был положительным во всех вариантах с удобрением, отличаясь по величине, но существенное влияние оказывало только азотно-фосфорное удобрение при применении 2-й и 3-й доз азота (табл. 3).

При широкорядном посеве кукурузы на зеленую массу отмечено меньшее количество растительных остатков, а минерализация гумуса была больше — при коэффициенте 0.0095 в отличие от 0.0045 для зерновых культур. Сыграло роль и то, что 7 первых лет севооборота солому удаляли с поля. Поэтому

в посеве бессменной пшеницы в балансе ОВг в вариантах применения 2-й и 3-й доз азота в сочетании с фосфором проявилось небольшое преимущество. Содержание гумуса в контроле в целом сохранялось. В 2-х вариантах с удобрением уже к концу первого десятилетия их применения в годы севооборота обозначилась четкая закономерность увеличения количества гумуса. Достоверное увеличение содержания гумуса происходило в варианте применения 2-й и 3-й доз азота в составе NP-удобрений.

Показатели содержания гумуса варьировали согласно изменениям урожайности. Например, после

Таблица 4. Взаимосвязь величин доз азота и содержания гумуса в слое 0–20 см почвы, %

Вариант/ Год	1982	1987	1990	1993	1994	1995	Среднее		
В севообороте									
Контроль	4.35	4.94	4.58	4.45	4.38	4.25	4.49		
N50	4.23	4.62	4.70	4.60	4.48	4.38	4.42		
N25P40	4.26	5.60	4.72	4.97	4.38	4.25	4.70		
N50P40	5.27	5.63	5.17	5.03	5.40	4.97	5.24		
N75P40	5.08	6.67	5.05	5.26	5.28	4.97	5.38		
Посев бессменной пшеницы									
Вариант/ Год	2006	2008	2011	2012	2016	2020	2021	2022	Среднее
Контроль	4.64	4.43	4.39	4.70	4.35	4.75	5.55	4.69	4.69
N40	4.78	4.64	4.45	4.48	4.48	4.78	5.66	4.96	4.78
N20P20	4.68	4.23	4.31	4.48	4.35	4.76	5.15	4.88	4.60
N40P20	5.14	4.64	4.56	4.82	4.99	5.56	5.89	5.63	5.15
N60P20	5.39	5.07	4.70	5.69	4.99	5.59	5.72	5.32	5.31

$$HCP_{05} = 0.4, F_{\text{факт}} = 2.40, F_{\text{табл}} = 0.26$$

Таблица 5. Влияние систем удобрения на величину pH_{KCl} в слое 0–20 см почвы

Вариант/Год	1992	1994	1995	2006	2008	2011	2012	2016	2020	2021
Контроль	5.40	5.50	5.30	5.41	5.20	5.34	5.34	5.61	5.21	5.15
N25–20P	5.40	5.40	5.40	5.39	5.08	5.34	5.17	5.57	5.31	5.17
N50–40P	5.35	5.20	5.30	5.32	5.09	5.20	5.07	5.42	5.24	5.22
N75–60P	5.25	5.30	5.20	5.22	4.85	5.00	5.03	5.27	5.00	5.00
HCP_{05}	0.15									

Примечание. Величина pH_{KCl} в период закладки опытов (1971–1972 гг.) была равна 6.2 ед.

Таблица 6. Влияние внесения удобрений на содержание суммы Са и Mg в слое 0–20 см почвы, ммоль (экв)/100 г

Вариант/ Год	1990	1992	1993	2006	2010	2022	2023
N0P0	20.4	19.6	21.7	21.7	19.0	20.4	21.7
N25–20P	21.2	19.5	22.4	21.1	—	—	—
N50–40P	22.1	18.8	22.9	22.0	—	—	21.1
N75–60P	21.0	18.8	21.8	22.6	22.8	20.2	21.5

получения высокого урожая пшеницы в 1985 г. (18–30 ц/га) содержание гумуса в 1987 г. было значительно больше. После засушливого 1992 г. с урожайностью 12–18 ц/га величины этого показателя в следующие годы были меньше. При дальнейших определениях содержания гумуса в почве под бессменной пшеницей можно отметить увеличение запасов гумуса в вариантах внесения удобрений N2–3P, в этом случае также наблюдали возрастание этого показателя после урожайных 2011 и 2017 гг. (табл. 4).

Наблюдения за кислотностью почвы показали, что применение азотных и фосфорных удобрений не вызывало большого изменения кислотности выщелоченного чернозема. Сильнее действовал временной фактор. Закономерность небольшого увеличения кислотности обнаружена в варианте с применением N75–60P (табл. 5).

Величина гидролитической кислотности (H_T) постепенно повышалась с течением времени опыта и в ходе внесения удобрений. Например, в контроле в 1992 г. H_T равнялась 2.46 ммоль(экв)/100 г, в 2006 г. — 3.92, на фоне N₃P в те же годы — 3.05 и 4.75. При этом величина pH_{H_2O} оставалась на исходном уровне ≈ 6.0 . Сумма поглощенных элементов: кальция и магния, существенно не менялась как во времени, так и в случае внесения удобрений (табл. 6).

Более заметно удобрения влияли на содержание подвижных форм питательных элементов. В табл. 7 показано содержание P₂O₅ по Чирикову в слое 0–20 см почвы под посевом бессменной пшеницы.

Без удобрений при исходной величине 40 мг/кг отмечены изменения показателя в пределах 43–51 мг/кг, в среднем за 15 лет — 48 мг/кг. В вариантах, где в течение 53 лет ежегодно применяли

Таблица 7. Содержание P_2O_5 в слое 0–20 см почвы на стерневом фоне, мг/кг

Вариант/Год	2009–2012	2013–2016	2017–2020	2020–2023	Среднее за 15 лет
Контроль без удобрений	50	43	48	51	48
N40–60P0	39	45	39	42	41
N40–60P40+P20	77	87	84	100	87

$HCP_{05} = 12$, $F_{\text{факт}} = 54.92$, $F_{\text{табл}} = 4.75$

Таблица 8. Содержание нитратного азота в 1-метровом слое почвы, кг/га

Вариант/Год	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2023	Среднее
N0P0	35	54	41	48	48	71	73	53
N40–60P20	110	82	53	54	69	104	92	80
HCP_{05}	17							

только азотное удобрение, содержание P_2O_5 оставалось на исходном уровне, меняясь в пределах 39–45, в среднем – 41 мг/кг.

В варианте применения азотного и фосфорного удобрений (NP) с 2008 г., где в дополнение к последнему действию P40, вносимого в севообороте в течение 25 лет в сумме P1000, с 2008 г. добавляли P20, т.е. количество примененного фосфора к весне 2023 г. составило P1300. В этом случае накопление P_2O_5 в пахотном слое почвы повысилось до 77–100 мг/кг, в среднем – до 87 мг/кг. Сопоставление содержания подвижного фосфора и урожайности культур в вариантах четко показало их тесную связь для бедной фосфатами почвы. Определение содержания подвижного P_2O_5 в почве можно использовать для подбора полей, где необходимо вносить фосфорное удобрение. Удобная шкала Чирикова была несколько откорректирована В.И. Волынкиным для местных условий. Пять классов шкалы в мг/кг выглядит так: очень низкая – 0–20, низкая – 20–45, средняя – 45–60, повышенная – 60–80 и высокая – более 80 мг/кг фосфорного удобрения. Заметнее снизились показания в среднем и повышенном классах, по шкале Чирикова они равнялись 51–100 и 101–150 мг/кг, а в опытах Курганского НИИСХ при показателе 74 мг/кг фосфорное удобрение уже не действовало.

При тесном взаимодействии азота и фосфора, эффективным фосфорное удобрение оказывалось только при условии хорошей обеспеченности растений азотом (после пара, а после других предшественников – при совместном внесении с азотным удобрением). Действительно, одностороннее применение P20 в нашем опыте в севообороте без пара и на бессменной пшенице за 53-летний период повышало урожайность лишь в 16% лет.

Количество нитратного азота в 1-метровом слое почвы весной в начале мая перед внесением удобрений (определяли остаточные количества удобрений на фонах регулярного их применения)

в среднем было равно 53 кг/га в контроле и 80 кг/га на фоне N40–60P20 (табл. 8).

При применении 2-й и 3-й доз азота на фосфорном фоне чаще накопление нитратного азота приближалось к оптимуму, который для 1-метрового слоя почвы был равен ≈ 80 кг/га.

Иногда количество нитратного азота было близким в этих двух показанных вариантах, что можно объяснить более высоким использованием нитратного азота предыдущим урожаем, а также очень прохладным маем со снижением температуры воздуха во 2-й декаде до 9.6–11.7°C, что наблюдали в 2018 и 2019 г. Малое количество нитратного азота в 1-метровом слое могло быть и после частичной его миграции с осадками в слои ниже 1 м, что было доказано повышенным содержанием азота в слое 80–100 см (рис. 1) при почвенном анализе весной 2023 г.

Названные причины – зависимость накопления нитратного азота от температуры воздуха и от обильных осадков делает менее надежной диагностику потребности растений в азоте только по данному показателю. Недостаточно тестировать данный элемент только в поверхностном слое почвы 0–40 см. Следует совмещать учет содержания нитратного азота в 1-метровом слое и урожайность предшествующей культуры, ее удобренность, а также сравнивать с результатами полевых стационарных опытов в условиях, аналогичных хозяйственным.

Обеспеченность растений подвижным калием на участке под опытом была высокой во всех вариантах. В слое 0–20 см содержалось 250–300 мг K_2O /кг по Чирикову.

Высокая информативность показанных результатов анализа почвы в стационарном опыте позволило построить графики отзывчивости культур на испытанные дозы удобрений, установить оптимальные уровни доз, сопоставлять урожайность с индексами обеспеченности растений питательными веществами,

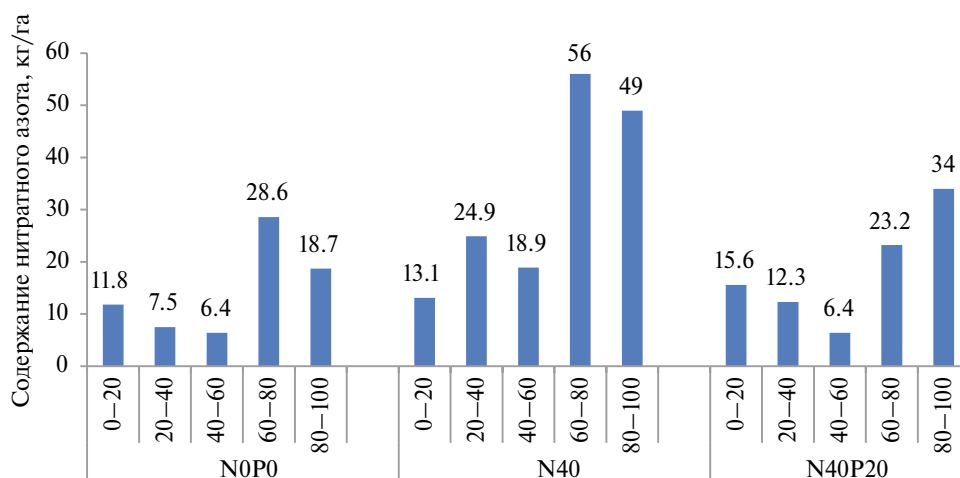


Рис. 1. Содержание N-NO₃ на (27.04.2023 г.) в слоях по 20 см на глубину 1 м, кг/га, его содержание в 1-метровом слое было равно: в варианте N0P0 – 73.0, N40 – 162 и N40P20 – 91.6 кг/га.

вычислять баланс питательных веществ. Эти данные становятся основой мониторинга состояния почвы по ряду агрохимических показателей выщелоченного чернозема Центрального опытного поля Курганского НИИСХ. Кроме этого, сопоставление агрохимических показателей почвы с продуктивностью культур становится базой знаний для последующей подготовки экспертно-советующей программы, с помощью которой можно консультировать специалистов земледелия по вопросам применения экономически выгодных доз удобрений для условий, идентичных опыту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В стационарном эксперименте на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ эффективное плодородие выщелоченного чернозема характеризовалось более высокой продуктивностью агроценоза, представленного севооборотом кукуруза–пшеница–пшеница–овес при ежегодной вспашке по сравнению с бессменной пшеницей после стерни. Действие внесенного удобрения на урожайность культур в обоих агроценозах было положительным при условии применения азотного в сочетании с фосфорным удобрением, поскольку почва опытного участка была бедна подвижным фосфором. Более высокой урожайностью и лучшей окупаемостью отличалась система удобрений в дозах N50–40P40–20. Агрохимические свойства почвы в ряде вариантов опыта на удобряемых фонах изменялись в желательном для земледельцев направлении. Положительно влияло применение 2-й и 3-й доз азота с фосфором, оно улучшало показатели плодородия почвы по количеству подвижных форм питательных веществ и содержанию гумуса. В среднем за 50 лет опыта баланс гумифицированного органического вещества оказался положительным во всех

вариантах, но отличался по величине в пользу вариантов NP при применении 2-й и 3-й доз азота.

В контроле кислотность почвы от исходной величины рН_{KCl} 6.2 ед. возросла к 2021 г. до показателя среднекислой – 5.2 ед. Удобрение N75–60P усилило кислотность до рН_{KCl} 5.0 ед.

Для диагностики потребности растений в фосфорном удобрении эффективно и надежно использовать измерение содержания подвижного P₂O₅ в слое 0–20 см почвы по шкале Чирикова, откорректированной для местных условий.

Для правильного применения азотного удобрения необходимо пользоваться комплексом показателей. К ним относятся содержание N-NO₃ в 1-метровом слое почвы, учет растения-предшественника, его удобренности и результатов полевого стационарного опыта в почвенно–климатических условиях той зоны, для которой осуществляется оптимизация доз азота. В Курганском НИИСХ есть возможность пользоваться результатами зональных экспериментов на 3-х опытных полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаповалова Н.Н., Шустикова Е.П. Влияние длительного применения и последствий разных видов и доз минеральных удобрений на агрохимические свойства обыкновенного чернозема // Мат-лы Всерос. совещ. научн. учреждений – участников Географической сети опытов с удобрениями 6 октября 2016 г. / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2016. С. 314–321.
2. Чуб М.П., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Плодородие чернозема южного и продуктивность зернопропашного севооборота

- при длительном применении минеральных удобрений // *Агрохимия*. 2010. № 7. С. 3–13.
3. *Помазкина Л.В., Семенов Ю.В., Симакова А.А., Кириллова Н.Н., Баиалханов И.А.* Оценка баланса углерода почв в агроэкосистемах Иркутской области // *Агрохимия*. 2016. № 5. С. 65–71.
 4. *Чесняк Г.Я., Гаврилюк Ф.Я., Крупеников И.А., Лактионов Н.И., Шилихина Н.А.* Гумусовое состояние черноземов // *Русский чернозем: 100 лет после Докучаева*. М.: Изд-во Наука, 1983. С. 186–198.
 5. *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.
 6. *Новиков А.А.* Гумус черноземов обыкновенных при внесении удобрений и эффективность возделываемых с.-х. культур // *Научн. журн. Рос. НИИ пробл. мелиорации*. 2017. № 2(26). С. 131–143.
 7. *Воронин А.Н., Соловichenko В.Д., Самыкин В.Н., Потрясов А.А.* Плодородие черноземов и продуктивность сахарной свеклы в результате антропогенеза // *Плодородие*. 2010. № 1(52). С. 34–35.
 8. *Громовик А.И., Королев В.А.* Влияние длительного применения удобрений в зернопропашном севообороте на показатели плодородия чернозема выщелоченного // *Агрохимия*. 2014. № 12. С. 10–15.
 9. *Шарков И.Н., Данилова А.А.* Влияние агротехнических приемов на изменение содержания гумуса в пахотных почвах // *Агрохимия*. 2010. № 12. С. 72–81.
 10. *Чуян Н.А., Брескина Г.М.* Оптимизация содержания и состава органического вещества в черноземе типичном // *Агрохим. вестн.* 2018. № 3. С. 35–39.
 11. *Холмов В.Г., Шуляков М.И.* Совершенствование агротехнологий зерновых на черноземах лесостепи Западной Сибири // *Современные проблемы почвозащитного земледелия и пути повышения устойчивости зернового производства в степных регионах*. Шортанды, 2006. Ч. 1. С. 102–106.
 12. *Нечаев Л.А., Черкасов Г. Н., Коротеев В.И.* Продуктивность зернопаропропашного севооборота и агрохимические свойства темно-серой лесной почвы в зависимости от зернобобовых культур, удобрений и способов основной обработки почвы // *Агрохимия*. 2013. № 1. С. 3–17.
 13. *Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д.* Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитии концепции ФАО) // *Агрохимия*. 2019. № 5. С. 3–20.
 14. *Васюков П.П., Лесовая Г. М., Чуварлеева Г. В., Мнатсаканян А.А., Быков О.Б., Мухина М.Т.* Оценка изменения плодородия чернозема выщелоченного Краснодарского края в зависимости от систем обработки почвы // *Плодородие*. 2018. № 3(102). С. 17–20.
 15. *Дедов А.А., Дедов А.В., Несмеянова М.А.* Динамика разложения растительных остатков в черноземе типичном и продуктивность культур севооборота // *Агрохимия*. 2016. № 6. С. 3–8.
 16. *Кук Дж.У.* Регулирование плодородия почвы. М.: Колос, 1970. 519 с.
 17. *Прянишников Д.Н.* Избр. соч. М.: Госсельхозиздат, 1952. 692 с.
 18. *Левин Ф.И.* Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // *Агрохимия*. 1977. № 8. С. 36–42.

Evaluation of the Informative Value of the Results of Soil Observations in a Stationary Experiment

O. V. Volynkina[#]

*Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the RAS,
ul. Belinskogo 112a, Ekaterinburg 620142, Russia*

[#]E-mail: kniish@ketovo.zaurl.ru

The effective and potential fertility of leached chernozem was evaluated in a field stationary experiment at the Central Experimental Field of the Kurgan Research Institute and the application of 2 crop cultivation technologies. In the first part of the experiment, the corn–wheat–wheat–oat crop rotation was studied during annual plowing, in the second – permanent wheat after a stubble background. The first technology was characterized by higher effective fertility, a large number of plant residues, due to which its advantage was manifested in terms of humus content. The positive effect of fertilizers on the indicators of potential soil fertility was manifested when applying the 2nd and 3rd doses of nitrogen against the background of the use of phosphorus.

Keywords: crop rotation, permanent wheat after stubble, nitrogen and phosphorus fertilizers, yield, plant residues, humus, mobile nutrients, acidity.

УДК 631.559:631.524.8:634.222

ЗАВИСИМОСТЬ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И УРОЖАЙНОСТИ СОРТОВ СЛИВЫ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕКОРНЕВЫХ ПОДКОРМОК В АРИДНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ

© 2024 г. Т. И. Александрова*

*Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН
ул. квартал Северный, 8, с. Соленое Займище, Астраханская обл. 416251, Россия*

**E-mail: pniiiaz@mail.ru*

В 2021–2023 гг. изучили влияние некорневого применения удобрений на фотосинтетическую активность и урожайность сортов сливы в аридной зоне Северного Прикаспия. Установлено, что площадь листовой поверхности в среднем за вегетацию в варианте совместного применения препаратов Акварин + Ультрамаг бор + Ультрамаг кальций превышала контроль на 50%. Отмечен рост фотосинтетического потенциала при обработке удобрениями Акварин и Мастер на 25.0 и 42% соответственно. Максимальное увеличение урожайности (12.8 т/га) получено при листовой обработке в варианте совместного применения препаратов Акварин + Ультрамаг бор + Ультрамаг кальций, что превышало контроль на 34.7%. Следует отметить, что лучшей отзывчивостью на некорневые подкормки отличался сорт Исполинская, урожайность которого составила 13.2 т/га, что было на 39% больше контроля.

Ключевые слова: слива, минеральное питание, фотосинтетическая активность, вариант, сорт.

DOI: 10.31857/S0002188124070022, **EDN:** CGKJSZ

ВВЕДЕНИЕ

Важная составная часть системы применения минеральных удобрений в садах — обеспечение деревьев питательными веществами через листья [1]. Продуктивность плодовых насаждений в значительной мере определяется эффективностью работы листового аппарата: его площадью, продолжительностью периода работы, интенсивностью фотосинтеза. Лист является очень пластичным вегетативным органом, который наиболее активно реагирует на обеспеченность питательными веществами и применение биологически активных веществ [2, 3]. Развитый ассимиляционный аппарат, обеспечивающий достаточную площадь листьев на каждый плод, играет важную роль в получении качественного урожая. Исходя из физиолого-биохимических закономерностей роста и развития, увеличение ассимиляционной поверхности сопровождается повышением продуктивности растений, что связано с усилением процесса фотосинтеза [4].

Впервые в условиях Астраханской обл. проведено всестороннее изучение эффективности применения некорневых подкормок с целью обоснования эффективности их использования в садах интенсивного типа.

Актуальность проведения научных исследований обусловлена необходимостью подбора и изучения ассортимента сортов сливы, адаптивных к аридным условиям зоны Северного Прикаспия, а также усовершенствования агротехнических приемов возделывания культуры на основе минерального питания в виде некорневых подкормок.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыт заложен на орошаемом участке плодового сада Прикаспийского аграрного федерального научного центра Российской академии наук, расположенного во втором агроклиматическом районе Астраханской обл., близком по условиям к полупустыням.

В период с 2021 по 2023 гг. на различных сортах сливы было проведено исследование влияния некорневых подкормок на продукционные процессы, а также на площадь листовой поверхности деревьев. Учеты и наблюдения проведены на 6-ти типичных деревьях каждого сорта, повторность трехкратная. Площадь опыта — 0.3 га. Схема посадки 5.0 × 2.0 м. Опыт — двухфакторный: фактор А — сорта сливы домашней Кабардинская ранняя, Анна Шпет, Исполинская, Богатырская, Волгоградская,

Таблица 1. Агрохимические и физические свойства почвы опытного участка

Слой почвы, см	Объемная масса, г/см ³	рН _{H2O}	Гумус, %	Подвижные формы, мг/кг почвы			Валовые формы, %		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0–20	1.21	8.0	1.05	3.57	1.44	37.6	0.08	0.04	1.71
20–40	1.23	8.0	1.02	2.44	2.64	36.8	0.08	0.10	2.38
40–60	1.29	7.9	0.92	0.57	2.04	16.2	0.06	0.12	1.94
60–100	1.49	8.6	—	0.10	1.61	20.5	—	—	—

фактор *Б* – варианты листовых обработок: 1 – контроль (обработка водой), 2 – препарат Мастер (NPK 18 : 18 : 18), 3 – препарат Акварин, 4 – препараты Ультрамаг бор, Ультрамаг кальций, 5 – препараты Акварин, Ультрамаг бор, Ультрамаг кальций.

Полевые и лабораторные опыты проводили в соответствии с “Программой и методикой сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур” [5]. Площадь листьев определяли весовым методом на основе методики Овсянникова методом промеров [6].

Почвы опытного участка – типичные для зоны, светло-каштановые карбонатные мощные и среднемошные легкосуглинистого состава. Грунтовые воды залегают ниже 3.5 м. Агрохимические анализы почвы показали сильно выраженное низкое естественное плодородие. Мощность гумусового слоя составляла 48–62 см. В пахотном слое содержание гумуса было низким – 0.92–1.05%. Обеспеченность почвы легкогидролизуемым азотом и подвижным фосфором – низкая, обменным калием – повышенная [7, 8] (табл. 1).

Климат района проведения исследования – экстремально засушливый, резко континентальный с жарким засушливым летом, холодной малоснежной зимой, большой годовой и летней суточной амплитудой температуры воздуха, малым количеством осадков и большой испаряемостью [9, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный факторный анализ показал, что действие фактора *А* (выбор сорта) выявлено для всех сортов в опыте. При HCP_{05} фактора $A = 36.4 \text{ м}^2$ для площади листьев, сформированных на 1 га, отмечено преимущество сорта Анна Шпет (+880 м²), несколько меньше этот показатель был у сорта Волгоградская (+600 м²).

Действие фактора *Б* (некорневое питание) на увеличение площади листьев отразилось во всех вариантах по сравнению с контролем. При HCP_{05} фактора $B = 38.2 \text{ м}^2$ математически доказанная прибавка увеличения площади листьев, сформированной на 1 га, в опыте получена при совместном применении препаратов Акварин, Ультрамаг бор и Ультрамаг кальций по отношению к контролю (+960 м²), а также в варианте с применением удобрения Акварин (+740 м²) (табл. 2).

Существенное увеличение площади листьев относительно контроля обеспечили подкормки в вариантах совместного применения препаратов Акварин, Ультрамаг бор и Ультрамаг кальций – на 38.1%. Несколько меньше был этот показатель в варианте с обработкой препаратом Акварин – 29.4%.

Эффективность примененных некорневых подкормок является основным критерием оценки

Таблица 2. Влияние некорневых подкормок на площадь листьев сортов сливы, м²/га

Сорт (фактор <i>А</i>)	Препараты (фактор <i>Б</i>)					Среднее за 2021–2023 гг.
	контроль без обработки	Мастер	Акварин	Ультрамаг бор + Ультрамаг кальций	Акварин + Ультрамаг бор + Ультрамаг кальций	
Кабардинская ранняя	2100	2300	3300	3100	3500	2860
Исполинская	2600	2800	3400	2900	3500	3040
Анна Шпет	3100	3300	3300	3600	3700	3400
Богатырская	2400	2700	2800	2800	3300	2800
Волгоградская	2400	3300	3500	3400	3400	3200
Среднее	2520	2880	3260	3160	3480	3060

$HCP_{05} A = 36.4$, $HCP_{05} B = 38.2$, $HCP_{05} AB = 26.3$

Таблица 3. Урожайность сортов сливы в зависимости от некорневого применения препаратов (среднее за 2021–2023 гг.), т/га

Сорт (фактор <i>A</i>)	Препараты (фактор <i>B</i>)					Среднее фактора <i>A</i>
	контроль без обработки	Мастер	Акварин	Ультрамаг бор + + Ультрамаг кальций	Акварин + + Ультрамаг бор + Ультрамаг кальций	
Кабардинская ранняя	7.8	9.6	10.6	92	126	99
Исполинская	9.8	13.8	14.0	14.4	14.3	132
Анна Шпет	9.5	12.4	11.0	12.0	13.8	117
Богатырская	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	110
Волгоградская	10.4	10.6	10.8	11.6	121	111
Среднее по фактору <i>B</i>	9.5	11.2	11.6	11.6	128	113
Частные различия	$HCP_{05} A = 0.6, HCP_{05} B = 0.6, HCP_{05} AB = 0.6$					

влияния препаратов на урожайность [9, 10]. Максимальная урожайность была отмечена у сорта Исполинская (13.2 т/га). Остальные сорта уступали сорту Исполинская, достигнув урожайности 9.9–11.7 т/га при HCP_{05} фактора *A* = 0.6 т/га (табл. 3).

Действие фактора *B* (некорневое питание) при HCP_{05} фактора *B* = 0.6 т/га проявилось в получении значительной прибавки урожайности в варианте с обработкой препаратами Акварин + Ультрамаг бор + Ультрамаг кальций (12.8 т/га) по сравнению с контролем (9.5 т/га).

ВЫВОДЫ

Показано, что использованные в опыте макро- и микроудобрения способствовали активизации ростовых процессов деревьев сливы. Существенное увеличение листового аппарата деревьев сливы отмечено в варианте применения комплексных удобрений Акварин + Ультрамаг бор + Ультрамаг кальций. Анализ показателей листовой поверхности деревьев сливы показал, что наиболее отзывчивыми сортами на применение данных препаратов были сорта Кабардинская ранняя, Исполинская, Анна Шпет и Волгоградская.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тютюма Н.В., Менишутин Т.В. Перспективы развития интенсивного садоводства в Астраханской области: Монография. Волгоград: ООО “Сфера”, 2022. 176 с.
2. Причко Т.Г., Хилько Л.А., Германова М.Г. Влияние некорневых подкормок на качество ягод земляники // Плод-во и виноград-во Юга России. 2016. № . 40. С. 129–136.
3. Александрова Т.И. Влияние некорневого минерального питания на биометрические показатели сортов сливы домашней в острозасушливых условиях Северного Прикаспия // Вестн. Ульяновск. ГСХА. 2022. № 3. С. 58–63.
4. Ожерельева З.Е., Красова Н.Г., Галашева А.М. Изучение засухоустойчивости летних сортов яблоны // Достиж. науки и техн. АПК. 2019. Т. 33. № 2. С. 31–33.
5. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10208>
6. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / Под общ. ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИ селекции плод. культур, 1999. С. 46–47.
7. Овсянников А.С. Методика определения листовой поверхности у плодовых растений. М., 1985. 30 с.
8. Зволинский В.П., Лавелина Т.П., Батовская Е.К. Климатические параметры севера Астраханской области // Повышение эффективности сельскохозяйственного производства юга России: сб. научн. тр. Вестн. РАСХН. 2008. С. 13–18.
9. Александрова Т.И. Роль минерального питания в реализации потенциала продуктивности сортов сливы в острозасушливых условиях Северного Прикаспия: дис. ... канд. с.-х. наук. Мичуринск, 2022. 148 с.
10. Иваненко Е.Н., Дроник А.А. Эффективность применения некорневых подкормок на яблоне в аридных условиях // Вестн. Курск. ГСХА. 2018. С. 43–50.
11. Копнина Т.А. Биологические особенности и хозяйственно ценные признаки сортов вишни обыкновенной в условиях Краснодарского края: Дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2020. 154 с.

Dependence of Photosynthetic Activity and Yield of Plum Varieties on the Use of Non-Root Fertilizing in the Arid Zone of the Northern Caspian Sea

T. I. Alexandrova[#]

*Caspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Kvartal Severny ul. 8, Saline Zaymishche village, Astrakhan region 416251, Russia*

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

In 2021–2023, the effect of non-root fertilizer application on photosynthetic activity and yield of plum varieties in the arid zone of the Northern Caspian Sea was studied. It was found that the leaf surface area on average during the growing season in the variant of the combined use of Aquarin + Ultramag boron + Ultramag calcium exceeded the control by 50%. An increase in photosynthetic potential was noted when treated with Aquarin and Master fertilizers by 25.0 and 42%, respectively. The maximum increase in yield (12.8 t/ha) was obtained during leaf processing in the variant of the combined use of Aquarin + Ultramag boron + Ultramag calcium preparations, which exceeded the control by 34.7%. It should be noted that the best responsiveness to non-root top dressing was distinguished by the Gigantic variety, whose yield was 13.2 t/ha, which was 39% more than the control.

Keywords: plum, mineral nutrition, photosynthetic activity, variant, variety.

УДК 631.98:634.8:581.16.04

ПРИМЕНЕНИЕ СЕРОСОДЕРЖАЩЕГО РЕГУЛЯТОРА РОСТА ТИАТОН ДЛЯ УКОРЕНЕНИЯ МИКРОЧЕРЕНКОВ ВИНОГРАДА В КУЛЬТУРЕ *in vitro*[§]

© 2024 г. Э. М. Фарахат¹, С. Л. Белопухов¹, И. И. Серегина^{1,*}¹Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

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

Исследование проводили для оценки действия питательного раствора для ризогенеза микрочеренков винограда ½ среды Мурасига—Скуга (МС) с добавлением различных концентраций препарата Тиатон (0.1, 0.15, 0.20 и 0.25 мл/л). В опытах изучали влияние различных концентраций препарата Тиатон на укоренение и вегетативный рост винограда гибридов Хасанский и Московский Белый *in vitro*. При добавлении в состав питательной среды МС препарата Тиатон в различных концентрациях укореняемость микрочеренков винограда гибрида Хасанский увеличилась на 40%, суммарная длина корней возросла в 2.4 раза по сравнению с контролем. У гибрида Московский Белый при использовании регулятора роста Тиатон наблюдали увеличение укореняемости микрочеренков до 25%, суммарной длины корней в 1.5 раза. Установлены оптимальные концентрации препарата Тиатон для добавления в питательный раствор МС для наилучшего ризогенеза микрочеренков и развития вегетативного прироста черенков изучаемых гибридов винограда. Так, для винограда гибрида Хасанский наиболее оптимальной для улучшения укоренения и развития корней микрочеренков оказалась ½ среды МС + 0.15 мл/л препарата Тиатон. У гибрида Московский Белый значительное увеличение укореняемости микрочеренков и хорошее развитие корневой системы получено при добавлении в состав питательной среды препарата Тиатон в концентрациях (0.15 и 0.20 мл/л).

Ключевые слова: клональное микроразмножение, виноград, регулятор роста Тиатон, укоренение.

DOI: 10.31857/S0002188124070032, **EDN:** CGHQZW

ВВЕДЕНИЕ

Виноград, являясь одной из самых распространенных сельскохозяйственных культур, играет существенную роль в мировой экономике. В то же время возникает необходимость увеличения площадей выращивания данной культуры, а также разработки современных технологий, которые обеспечивали бы ускоренное размножение перспективных сортов [1–3].

В настоящее время благодаря достижениям селекционеров и в результате изменения климата в средней полосе Российской Федерации получило распространение направление “северное виноградарство” [4].

При вегетативном размножении винограда — регенерация, или способность возобновлять утраченные органы и развивать новое растение из отдельных частей, может развиваться в новое растение только из отрезков стебля — отводков, одревесневших,

зеленых обычных и привитых черенков, имеющих на себе хотя бы одну хорошо развитую и неповрежденную почку глазка. Основным способом при выращивании корнесобственных растений винограда является размножение зелеными и одревесневшими черенками, которые получают из хорошо вызревших однолетних побегов [4–8].

При выращивании винограда в северных регионах важным аспектом сельскохозяйственного производства является получение высококачественного посадочного материала [4]. Качественный посадочный материал является основным условием для закладки высокоурожайного, многолетнего виноградника. Однако в ряде случаев нет возможности получать хороший посадочный материал из других мест выращивания культуры. В связи с этим возникает необходимость создания собственного питомника, что является гарантией высокого качества посадочного материала [9, 10]. Кроме того, одним из путей решения этой проблемы является использование биостимуляторов роста и различных приемов подготовки черенков к укоренению [11, 12]. Одним из путей увеличения производства

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

экологически чистой продукции является применение биологически активных веществ. Преимущества различных препаратов нового поколения являются экологическая безопасность, безопасность для человека и насекомых, высокая скорость распада за короткий период, широкий спектр действия для различных сельскохозяйственных культур [13–16].

В то же время большое значение имеют препараты и удобрения, повышающие устойчивость растений к неблагоприятным условиям окружающей среды и оказывающие адаптивное действие на сельскохозяйственные культуры [4, 13, 17–20].

В современных условиях технология производства оздоровленного посадочного материала включает следующие этапы: применение усовершенствованных биотехнологических приемов, комплексное оздоровление с использованием культуры изолированных апексов, ускоренное получение оздоровленных укорененных экземпляров на искусственных питательных средах и создание коллекций оздоровленных форм *in vitro* [21–23]. Наиболее представительным примером реализации потенциала растений (или их отдельных тканей и органов) с помощью биотехнологических приемов может стать микроклональное размножение, при котором реальные коэффициенты размножения в сотни и даже тысячи раз больше, чем в случае использования любого из традиционных приемов.

Наиболее приоритетным направлением реализации потенциала растений является метод культуры растительных клеток, тканей и органов. Он позволяет повысить морфогенетический потенциал растительного организма, а также урегулировать ряд практических проблем, таких как получение сортовых линий, устойчивых к стрессовым условиям окружающей среды [22, 24–27].

Биорегулятор роста Тиатон является водным раствором серосодержащего органического лиганда (S) с концентрацией серы $\geq 4\%$. Препарат имеет pH от 6.0 до 8.0 ед. По своему химическому строению препарат Тиатон схож с соединениями, которые образуются на промежуточных стадиях синтеза белков в растениях. Предполагается, что этот препарат может активизировать процессы получения белковых соединений [3]. Как серосодержащий препарат, биорегулятор роста Тиатон имеет больше значение для растений, поскольку сера является одним из основных составляющих элементов растительного белка, входит в состав аминокислот, участвующих в его построении (цистеин, метионин, цистин). Недостаток серы приводит к задержке синтеза белков, увеличению содержания азота в небелковой форме (например, нитратов), уменьшению содержания сахаров и масел, замедлению роста растений, снижению урожая и листья растений в этом случае приобретают светло-зеленый окрас, [28]. Важнейшей ролью серы является участие в окислительно-восстановительных процессах

в качестве незаменимого компонента фитогормонов, а также данный элемент оказывает влияние на функционирование гидролитических ферментов, на увеличение интенсивности ассимиляции макро- и микроэлементов (N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Zn, Mo), что активизирует синтез органических соединений, в том числе и белков [29, 30]. Также сера оказывает существенное действие на процессы деления клетки растительного организма, активизирует формирование молодых тканей листьев, генеративных органов (в частности, семян), положительно влияет на образование клубеньковых бактерий во время азотфиксации, входит в состав витаминов (тианин, биотин, группы B). Кроме того, сера увеличивает устойчивость растений к фитопатогенам и стрессовым условиям окружающей среды (засухи, изменения температурного режима) и влияет на урожай сельскохозяйственных культур [28–31].

В связи с этим, цель работы — оценка возможности применения нового серосодержащего препарата росторегулирующего действия Тиатон на укореняемость черенков винограда и качество посадочного материала.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыты проводили в лаборатории клонального микроразмножения РГАУ—МСХА им. К.А. Тимирязева. Объектом исследования были черенки винограда межвидовых гибридов раннего срока созревания: Хасанский и Московский белый.

Для ризогенеза на этапе укоренения использовали питательную среду Мурасига—Скуга ($\frac{1}{2}$ МС). В опытных вариантах в питательную среду добавляли препарат Тиатон в 4-х концентрациях в расчете на объем прибавляемого препарата (0.1, 0.15, 0.20 и 0.25 мл/л). Повторность в опыте шестикратная, по 4 растения в каждой повторности.

Для исследования использовали микророзетки сортов винограда высотой 1.0–1.5 см. Черенки инкубировали в регулируемых условиях в термостате при интенсивности освещения 2500 лк, 16-часовом фотопериоде, температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Оценку укореняемости производили через 3 и 4 нед субкультивирования. При этом измеряли укореняемость в процентах%; количество корней в штуках; длину корней в см; суммарную длину корней в см; количество растений с новым приростом, высоту нового растения в см.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием дисперсионного анализа по общепринятым методикам [32].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основой укоренения *in vitro* является активизация процесса индуцирования адвентивных корней, что достигается регулированием гормонального состава

питательной среды [33]. На этапе укоренения необходимо получение микрорастений с хорошо развитой мочковатой корневой системой, что впоследствии позволяет реализовать адаптивные способности растений-регенерантов в условиях *ex vitro*. На данном этапе оценивается уровень развития растений, образовавшихся корни, характеристика корневой системы: количество корней и их морфологические особенности [34].

Результаты оценки развития укорененных черенков винограда гибрида Хасанский представлено в табл. 1.

Выявлена положительная динамика роста черенков винограда гибрида Хасанский в вариантах с добавлением в питательную среду препарата Тиатон в различных концентрациях. Установлено, что во всех опытных вариантах через 3 нед субкультивирования укореняемость возросла на 16.7–50.0% против 8.3% в контроле, через 4 нед — на 33.3–83.3% против 9.7% в контроле. Наибольший показатель укореняемости получен при концентрации препарата Тиатон, равной 0.15 мл/л. В данном варианте величина укореняемости возросла в 6–8.75 раза по сравнению с контролем, выращенным без применения препарата. Показано, что оптимальной концентрацией препарата Тиатон при добавлении в питательную среду МС является 0.1 и 0.15 мл/л. Дальнейшее увеличение концентрации препарата в питательной среде >0.15 мл/л способствовало снижению активности процессов укоренения черенков винограда гибрида Хасанский.

Помимо величины укореняемости черенков большое значение имеет количество образовавшихся корней, поскольку этот показатель свидетельствует

об активации синтетических процессов, которые способствуют накоплению достаточного количества углеводов и аминокислот и стимулированию развития надземной массы растущих побегов. Показано, что через 3 нед после субкультивирования наибольшее число корней образовалось в питательном растворе с добавлением препарата Тиатон в концентрациях 0.15 и 0.25 мл/л. Количество корней составило в среднем 2.67 и 3.00 шт. соответственно против 2.00 шт. в контроле. В дальнейшем корнеобразование продолжалось. Через 4 нед количество корней увеличилось, и их среднее количество составило 3.83 и 3.50 шт. соответственно против 2.50 шт. в контроле, выращенном без применения препарата Тиатон. Дальнейшее увеличение концентрации препарата Тиатон в питательном растворе >0.20 мл/л способствовало снижению индукции ризогенеза черенков винограда гибрида Хасанский.

Результаты исследования показали значительное изменение биометрических показателей корней винограда гибрида Хасанский через 3 нед культивирования черенков гибрида Хасанский во всех вариантах применения препарата. Наибольшая длина корней отмечена на питательной среде с концентрацией препарата Тиатон равной 0.25 мл/л и составляла 0.9 см. Однако через 4 нед субкультивирования выявлено преимущество вариантов, где в питательную среду добавляли препарат Тиатон в концентрациях 0.15 и 0.25 мл/л. Длина корней микрочеренков составила 2.67 см и 2.50 см соответственно против 0.82 см в контроле без применения препарата. В описанных вариантах опыта получена также и максимальная суммарная длина корней черенков, которая составила через 3 нед субкультивирования 1.07 и 1.85 см, что было в 3.1–5.3 раза больше,

Таблица 1. Влияние препарата Тиатон на ризогенез *in vitro* черенков винограда гибрида Хасанский

Концентрация препарата Тиатон, мл/л	Укореняемость, %	Среднее количество корней, шт.	Средняя длина корней, см	Суммарная длина корней, см	Растений с новым ростом, %	Высота нового растения, см
3 нед после посадки						
Контроль	8.3	2.0	0.22	0.35	25.0	1.43
0.10	16.7	1.5	0.50	0.68	25.0	1.67
0.15	50.0	2.7	0.42	1.07	25.0	1.40
0.20	16.7	1.0	0.51	0.83	25.0	1.33
0.25	25.0	3.0	0.90	1.85	50.0	1.69
HCP ₀₅	1.2	0.1	0.03	0.05	5.0	0.10
4 нед после посадки						
Контроль	9.7	2.5	0.82	2.05	41.7	1.62
0.10	58.3	2.0	0.78	1.56	33.3	2.06
0.15	83.3	3.8	2.67	10.23	50.0	1.94
0.20	33.3	1.3	0.83	1.16	25.0	1.50
0.25	33.3	3.5	2.50	8.75	75.0	1.75
HCP ₀₅	2.2	0.1	0.08	0.24	2.3	0.16

чем в контрольном варианте без применения препарата, и через 4 нед составляла 10.2 и 8.8 см соответственно против 2.1 см в контроле.

Исследование показало, что применение препарата Тиатон индуцировало новый вегетативный рост черенков гибрида Хасанский. Наибольший вегетативный прирост черенков получен при добавлении в состав питательной среды для ризогенеза микрочеренков винограда препарата Тиатон в концентрации 0.25 мл/л и составлял 50% через 3 нед и 75% — через 4 нед после посадки. Это свидетельствует об активации под действием серосодержащего препарата ростовых процессов посадочного материала винограда. Максимальная высота нового растения через 3 нед отмечена при использовании препарата Тиатон в концентрациях 0.10 мл/л и 0.25 мл/л. При других концентрациях изменения высоты выросших растений были не существенными. Через 4 нед прирост новых растений увеличился во всех вариантах опыта. Максимальный достоверный прирост получен при использовании регулятора роста в концентрациях 0.10 мл/л и 0.15 мл/л. Дальнейшее увеличение концентрации препарата способствовало снижению прироста новых побегов.

Таким образом, при клональном микроразмножении винограда гибрида Хасанский установлено эффективное действие серосодержащего регулятора роста Тиатон в условиях *in vitro* на основе минеральных солей $\frac{1}{2}$ среды Мурасига—Скуга. Применение препарата способствовало стимулированию корнеобразования микрочеренков и развитию растений с новым ростом. Проведенное исследование позволило установить оптимальную концентрацию для получения

максимальной положительной реакции черенков винограда на препарат Тиатон — 0.15 мл/л. Использование данной концентрации для укоренения микрочеренков винограда гибрида Хасанский способствовало получению наибольшего отклика растений по большинству изученных показателей.

Результаты исследований влияния серосодержащего препарата Тиатон на ризогенез микрочеренков винограда гибрида Московский белый представлены в табл. 2.

Применение регулятора роста при добавлении в разных концентрациях (0.1, 0.15, 0.20 и 0.25 мл/л) в состав питательной смеси (1/2 МС) способствовало улучшению системы укоренения и вегетативного роста черенков винограда сорта Московский белый. Установлено, что через 3 нед после посадки черенков показатель укореняемости увеличился в диапазоне от 41.7 до 75 против 37.5% в контроле без применения препарата. При дальнейшем развитии черенков еще через 1 нед выявлено последующее возрастание укореняемости, которое составило 75.0—83.3 против 66.7% в контроле.

Биометрические показатели корневой системы также улучшились при использовании в питательном растворе серосодержащего биорегулятора. Через 3 нед после посадки максимальное число корней образовалось в вариантах опыта при концентрациях препарата Тиатон 0.15 и 0.20 мл/л. Среднее количество корней составило 1.8 и 2.2 шт. соответственно против 1.3 шт. в контроле без применения препарата. В дальнейшем корнеобразование продолжалось, и через 4 нед после посадки количество корней увеличилось и составило

Таблица 2. Влияние препарата Тиатон на ризогенез *in vitro* черенков винограда гибрида Московский Белый

Концентрация препарата Тиатон, мл/л	Укореняемость, %	Среднее количество корней, шт.	Средняя длина корней, см	Суммарная длина корней, см	Растений с новым ростом, %	Длина нового растения, см
3 нед после посадки						
Контроль	37.5	1.3	0.43	0.57	66.7	1.8
0.10	33.3	1.3	0.37	0.49	91.7	1.8
0.15	75.0	1.8	0.41	0.75	83.3	1.3
0.20	41.7	2.2	0.55	1.19	91.7	2.0
0.25	50.0	1.5	0.52	0.78	66.7	1.7
HCP ₀₅	2.4	0.1	0.04	0.04	4,0	0.1
4 нед после посадки						
Контроль	66.7	2.0	0.63	1.26	91.7	2.7
0.10	65.0	1.5	0.93	1.40	100.0	2.8
0.15	83.3	2.2	1.22	2.68	83.3	2.6
0.20	75.0	2.3	1.33	2.99	91.7	2.2
0.25	83.3	2.0	1.60	3.20	75.0	2.4
HCP ₀₅	3.7	0.1	0.06	0.11	4.4	0.1

2.2 и 2.3 шт. соответственно против 2.0 шт. в контроле без применения препарата.

Средняя длина корней через 3 нед. после посадки изменилась достоверно в варианте, где концентрация препарата составила 0.20 мл/л. При последующем культивировании отмечено более значительное нарастание корневой системы во всех вариантах использования препарата Тиатон. Через 4 нед после посадки черенков средняя длина корней находилась в диапазоне от 0.93–1.60 см против 0.63 см в контрольном варианте. Наибольшая средняя величина корней отмечена при концентрации биорегулятора 0.25 мл/л и составила 1.6 см против 0.63 см в контрольном варианте. Это свидетельствовало о высокой степени отзывчивости растений винограда гибрида Московский белый на применение серосодержащего препарата. Следует отметить, что необходимо более длительное культивирование для получения наибольшей эффективности биорегулятора.

Суммарная длина корней определяется количеством корней, образовавшихся при укоренении черенков и их длины. В связи с этим у черенков гибрида Московский белый при добавлении в среду укоренения препарата Тиатон через 3 нед после посадки его максимальное действие проявилось при концентрациях 0.15, 0.20 и 0.25 мл/л. Суммарная длина корней составила 0.75 см (за счет нарастания количества корней), 1.17 см (за счет количества и длины корней), 0.78 см (за счет удлинения корней) соответственно. Таким образом, наилучшие показатели развития корневой системы получили при применении препарата Тиатон в концентрации 0.20 мл/л. При этой концентрации биорегулятора получен наибольший отклик растений, что определяло более эффективное укоренение и развитие растений винограда в последующем. Через 4 нед после посадки черенков отмечены положительные результаты применения препарата во всех вариантах опыта. Наибольшая суммарная длина корней выявлена при концентрациях препарата 0.15, 0.20 и 0.25 мл/л.

Развитие корневой системы, как правило, находится в определенной зависимости с развитием надземной вегетативной массы растений. Отмечено, что при использовании препарата Тиатон в концентрациях от 0.10 до 0.20 мл/л активизировался прирост новых вегетативных побегов в течение 3-х нед культивирования. Однако в последующем прирост новых побегов и их длина тормозились, что вероятно было обусловлено более активным нарастанием корневой системы.

Таким образом, проведенные учеты и наблюдения за развитием культивируемых черенков винограда гибрида Московский белый показали эффективное действие препарата Тиатон на развитие корневой системы, что обуславливало хорошую укореняемость и реализацию адаптивных способностей посадочного материала при пересадке его на постоянное место

выращивания. Установлено, что оптимальные концентрации биорегулятора 0.15 и 0.20 мл/л проявляли положительное влияние на большинство параметров, определяющих укоренение, развитие корневой системы и приживаемость черенков для дальнейшего выращивания качественного посадочного материала виноградных растений гибрида Московский белый.

Сделан вывод, что положительное действие изученного препарата Тиатон обусловлено его действующим веществом, которое представлено водным раствором серосодержащего органического лиганда [4]. Результаты, полученные в наших исследованиях, согласуются с данными других авторов, которые отмечали, что в период раннего роста сельскохозяйственных культур сера имеет важное физиологическое значение [35, 36], которое заключается в изменении гормонального баланса растений [37, 38]. Показано, что сера участвует в регуляции метаболизма ауксина и цистеина, что определяет развитие корневой системы и стебля [39, 40]. В связи с этим наши исследования позволяют охарактеризовать регулятор роста Тиатон как препарат, который за счет своего действующего вещества в определенных соотношениях в составе питательного раствора, влияет на процессы укоренения, развития корневой системы и надземной части растений винограда, что способствует получению посадочного материала хорошего качества, устойчивого к различным условиям выращивания. Эффективность препарата Тиатон зависела от сортовой специфики и дозы применения для выращивания растений.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что применение препарата Тиатон в составе питательной среды (1/2 смеси Мурасиге–Скуга) для ризогенеза микрочеренков винограда сортов Хасанский и Московский Белый значительно увеличило укореняемость растений *in vitro*. Это позволяет получить посадочный материал с хорошо развитой корневой системой.

2. Выявлено, что эффективность препарата Тиатон при клональном микроразмножении зависит от концентрации и сортовой специфики выращиваемых растений винограда *in vitro*.

3. Выявлено, что при клональном микроразмножении винограда гибрида Хасанский, питательная среда на основе минеральных солей 1/2 смеси Мурасиге–Скуга с добавлением препарата Тиатон 0.15 мл/л является оптимальным вариантом для стимулирования корнеобразования микрочеренков и развития новых побегов.

4. Показано, что при укоренении черенков винограда гибрида Московский белый для стимулирования корнеобразования микрочеренков и их развития оптимальными являлись растворы питательной среды на основе минеральных солей 1/2 смеси

Мурасига—Скуга с добавлением препарата Тиатон в концентрациях 0.15 и 0.20 мл/л.

5. Показано, что при применении регулятора роста Тиатон в данных условиях получены черенки *in vitro* с хорошо развитой корневой системой и побегами нового роста, что обеспечивало хорошую укореняемость и приживаемость посадочного материала растений винограда.

6. Установлено, что в зависимости от концентрации препарата Тиатон при добавлении его в питательный раствор ½ смеси Мурасига—Скуга активизировались разные механизмы ростовых процессов корневой системы и вегетативной части растений винограда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батукаев А.А. Совершенствование технологии ускоренного размножения и оздоровления посадочного материала винограда методом *in vitro*. М.: МСХА, 1988. 221 с.
2. Батукаев А.А., Шишхаева М.Г., Батукаев М.С. Оптимизация состава питательных сред и адаптация растений винограда *in vitro* к условиям *in vivo* // Изв. КБГАУ. 2017. № 1(15). С. 10–16.
3. Фарахат Э.М.С. Влияние защитно-стимулирующих комплексов на укоренение черенков винограда: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: РГАУ—МСХА, 2022. 20 с.
4. Акимов С.В., Раджабов А.К., Бухтин Д.А., Трофимова М.С. Влияние биологически активных веществ кремнийорганической природы на укореняемость и дальнейшее развитие одревесневших и зеленых черенков винограда межвидового происхождения // Изв. ТСХА. 2015. № 4. С. 36–48.
5. Кострикин И.А., Майстренко Л.А., Майстренко А.Н., Красохина С.И., Ключиков И.А., Ключиков Е.А. Размножение винограда и выращивание посадочного материала. Ч. 1, 2. Выращивание саженцев из черенков, отводки. Прививки // Запорожье, Ростов/НД., 2001. 92 с.
6. Загиров Н.Г., Баламирзоева З.М. Изучение возможности ускоренного выращивания саженцев винограда на основе зеленого черенкования в Дагестане // Плод-во и ягод-во России. 2008. Т. 18. С. 165–169.
7. Малтабар Л.М., Козаченко Д.М. Виноградный питомник (теория и практика). Краснодар: Кубан. ГАУ, 2009. 290 с.
8. Малых Г.П., Киселева Т.Г., Малых П.Г. Производство саженцев из зеленых черенков // Виноград-во и винодел. 2005. № 1. С. 40.
9. Дикань А.П., Вильчинский В.Ф., Верновский Э.А., Заяц И.Я. Виноградарство Крыма. Симферополь: Бизнес-Информ, 2001. С. 69–103.
10. Овчинников А.С., Бородычев В.В., Храбров М.Ю., Гуренко В.М. Перспективы развития виноградарства и виноделия в Нижневолжском регионе // Изв. Нижневолж. агроун-кого комплекса. 2015. № 1(37). С. 1–10.
11. Макарова Г.А. Оценка способности винограда к размножению одревесневшими черенками // Состояние и перспективы развития сибирского садоводства. НИИ садов-ва Сибири, 2007. С. 188–193.
12. Гостевских Л.И. Особенности размножения винограда зелеными черенками // Виноградарство в Западной Сибири. НИИ садов-ва Сибири им. М.А. Лисавенко, 2008. С. 81.
13. Павлова А.Ю., Борисова А.А., Казакова В.Н. Влияние силатранов и их германиевого аналога на укореняемость зеленых черенков сливы сорта Скоропелка красная // Плод-во и ягод-во в России. 1999. Т. 6. С. 102–110.
14. Романенко Е.С., Брыкалов А.В. Перспективы исследования биорегуляторов роста нового поколения в виноградарстве (обработка черенков винограда водным экстрактом биогумуса и растворами лигногуматов) // Проблемы экологии и защиты растений в сельском хозяйстве. Ставрополь; Ставропол. ГАУ, 2004. С. 15–17.
15. Серегина И.И. Влияние циркона на продуктивность пшеницы // Агрохим. вестн. 2007. № 3. С. 18–19.
16. Серегина И.И., Торшин С.П., Новиков Н.Н., Фокин А.Д., Калашникова А.Н. Агробιοтехнологии XXI века. М.: РГАУ—МСХА, 2022. 516 с.
17. Дьяков В.М., Корзинников Ю.С., Матыченков В.В. Экологически безвредные регуляторы роста мивал и крезацин // Регуляторы роста растений. М., 1990. С. 52–61.
18. Кирсанова Е.В. Экологически чистый препарат Черказ как фактор повышения продуктивности агроцепноза // Природные ресурсы — основа экономической стратегии. Орел, 2002. С. 223–227.
19. Серегина И.И., Сучкова Е.В. Действие обработки семян цирконом на продуктивность яровой пшеницы в различных условиях азотного питания и водообеспечения // Бюл. ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова. 2003. № 118. С. 79–81.
20. Серегина И.И., Ниловская Н.Т., Баранов А.В. Продуктивность, фотосинтетическая деятельность и донорно-акцепторные отношения растений яровой пшеницы при применении силиката калия // Агрохимия. 2014. № 4. С. 60–69.5.
21. Бургутин А.Б., Бутенко Р.Г., Катаева Н.В., Голодрига П.Я. Быстрое клональное размножение виноградного растения // Сел.-хоз. биол. 1983. № 7. С. 48–50.
22. Trigiano Robert N., Gray Dennis J. Plant tissue culture. Development and biotechnology. Boca Raton: CRC Press, 2010. 186 p.
23. Батукаев А.А., Зармаев А.А., Батукаев М.С. Использование регуляторов роста в системе производства оздоровленного посадочного материала винограда // Тр. БГУ. 2013. Т. 8. Ч. 2. С. 43–47.

24. *Высоцкий В.А.* Достижения биотехнологии и их использование в современном садоводстве // Субтроп. и декорат. садов-во. 2007. № 40. С. 380–385.
25. *Высоцкий В.А.* Биотехнологические приемы в современном садоводстве // Плод-во и ягод-во России. 2011. Т. 26. С. 3–10.
26. *Кузьмина Н.* Микрклональное размножение и оздоровление растений [Электр. ресурс] // Биотехнология. 2010. http://www.biotechnolog.ru/pcell/pcell6_1.html 11
27. *Сулейманова С.Д.* Микрклональное размножение плодовых культур (обзор) // Wschodnio Europejskie Czasopismo Naukowe (East Europ. Sci. J.). 2016. № 11. С. 46–54.
28. *Аристархов А.Н.* Агрохимия серы / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
29. *Шеуджен А.Х., Онищенко Л.М., Прокопенко В.В.* Удобрения, почвенные грунты и регуляторы роста растений. Майкоп: ГУРИПП Адыгея, 2005. 404 с.
30. *Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Лебедовский И.А., Осипов М.А.* Агрохимия биогенных элементов: уч. пособ. Краснодар: КубГАУ, 2020. 223 с.
31. *Аристархов А.Н.* Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. М.: МГУ, ЦИНАО, 2000. 524 с.
32. *Кобзаренко В.И., Волобуева В.Ф., Серегина И.И., Ромодина Л.В.* Агрохимические методы исследований. М.: РГАУ–МСХА. 2015. 309 с.
33. *Навальева И.А., Буковцова И.С.* Клональное микро-размножение (*Fragaria* × *ananassa* Dush.) на примере ремонтантных сортов // Инновация в науке. 2002. № 12–1. С. 12–20.
34. *Демченко В.И.* Проблемы и возможности микрклонального размножения садовых растений // Изв. ТСХА, 2005. № 2. С. 48–58.
35. *Onkar S.* The effect of sulphur fertilization at different stages of growth of mustard // Ind. J. Plant Physiol. 1984. V. 27. P. 172–176.
36. *Zaman B., Ali A., Salim M., Niazi B.H.* Role of sulphur for potassium/sodium ratio in sunflower under saline conditions // HELIA. 2002. V. 25(37). P. 69–78.
37. *Nikiforova V., Freitag J., Kempa S., Adamik M., Hesse H., Hoefgen R.* Transcriptome analysis of sulfur depletion in *Arabidopsis thaliana*: Interlacing of biosynthetic pathways provides response specificity // Plant J. 2003. V. 33. P. 633–650.
38. *Hirai M.Y., Klein M., Fujikawa Y., Yano M., Goodenow D.B., Yamazaki Y., Kanaya S., Nakamura Y., Kitayama M., Suzuki H., Sakurai N., Shibata D., Tokuhisa J., Reichelt M., Gershenzon J., Papenbrock J., Saito K.* Elucidation of gene-to-gene and metabolite-to-gene networks in *Arabidopsis* by integration of metabolomics and transcript atomics // J. Biol. Chem. 2005. V. 280. P. 25590–25595.
39. *Dan H., Yang G., Zheng Z.L.* A negative regulatory role for auxinin sulphate deficiency response in *Arabidopsis thaliana* // Plant Mol. Biol. 2007. V. 63. P. 221–235.
40. *Garcia I., Castellano J.M., Vioque B., Solano R., Gotor C., Romero L.C.* Mitochondrial beta-cyanoalanine synthase is essential for root hair formation in *Arabidopsis thaliana* // Plant Cell. 2010. V. 22. P. 3268–3279.

Use of the Sulfur-Containing Growth Regulator Tiaton for Rooting Micro-Gears of Grapes in Culture *in vitro*

E. M. Farahat^a, S. L. Belopukhov^a, I. I. Seregina^{a, #}

^aRussian State Agrarian University—K.A. Timiryazev Agricultural Academy,
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia

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

The study was carried out to evaluate the effect of a nutrient solution for the rhizogenesis of grape micro-gears in the Murasiga-Skuga medium (MS) with the addition of various concentrations of the drug Tiaton (0.1, 0.15, 0.20 and 0.25 ml/l). In experiments, the effect of different concentrations of the drug Tiaton on the rooting and vegetative growth of grapes of the Khasansky and Moskovsky White hybrids *in vitro* was studied. When the Tiaton preparation was added to the MS nutrient medium in various concentrations, the rooting capacity of the micro-gears of the Khasansky hybrid grape increased by 40%, the total root length increased by 2.4 times compared with the control. In the Moscow White hybrid, when using the Triaton growth regulator, an increase in the rooting capacity of micro gears up to 25% and the total root length by 1.5 times is shown. The optimal concentrations of the Triaton preparation for addition to the MS nutrient solution for optimal rhizogenesis of micro-gears and the development of vegetative growth of cuttings of the studied grape hybrids have been established. Thus, for Khasansky hybrid grapes, the most optimal medium for improving rooting and root development of micro gears was ½ MS + 0.15 ml/l of Tiaton preparation. In the Moscow White hybrid, a significant increase in the rooting capacity of micro-gears and good development of the root system was obtained when Tiaton was added to the nutrient medium for rhizogenase of micro-gears in concentrations (0.15 and 0.20 ml/l).

Keywords: clonal micropropagation; grapes; growth regulator Tiaton, rooting.

УДК 631.1:631.98:546.215

ОЦЕНКА УРОЖАЙНОСТИ ТРИТИКАЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА В ПРИСУТСТВИИ КАТАЛИЗАТОРОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ХАРАКТЕРА

© 2024 г. Е. К. Барнашова¹, С. Н. Сергеев², М. И. Будник^{3,*}, К. А. Тараскин^{2,**},
С. С. Деревягин⁴, О. Т. Касаикина⁵, Л. М. Апашева⁵, Е. Н. Овчаренко⁵,
А. В. Лобанов⁵, А. В. Грудзинский³

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

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

³Российская академия ракетных и артиллерийских наук
107564 Москва, ул. 1-я Мясниковская, 3, стр. 3, Россия

⁴Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова РАН
119991 Москва, ул. Косыгина, 4, Россия

*E-mail: ziraf@mail.ru

**E-mail: kant1958@yandex.ru

Проведена экспериментальная оценка влияния активаторов окислительных процессов на урожайность зерновой культуры тритикале на опытных участках Федерального аграрного научного центра Юго-Востока, г. Саратов. Растения тритикале в период вегетации опрыскивали водным раствором пероксида водорода с концентрацией 5 мкмоль/л в присутствии катализаторов окислительного характера на основе кислородсодержащих соединений: 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона. Показана эффективность применения всех использованных в настоящей работе катализаторов. Наилучшие результаты получены при двукратной обработке водным раствором циклогексанона в перексиде водорода с концентрацией 5 мкмоль/л в соотношении 1 : 300, проведенной за 4 и 3 нед до начала уборки урожая, что привело к увеличению урожайности зерна тритикале на 176% относительно контроля. Пероксид водорода является дополнительным источником кислорода, ускоряющим метаболизм в растениях. Еще большая активация обменных процессов в растениях происходила в присутствии катализаторов окислительного характера (2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона), обусловленная образованием в водных растворах высокоактивных кислородсодержащих структур, что в конечном итоге приводило к более высоким показателям урожайности культурных растений, в частности, тритикале.

Ключевые слова: пероксид водорода, тритикале, катализатор, урожайность, зерновая культура, окислительные процессы.

DOI: 10.31857/S0002188124070049, **EDN:** CGAIBO

ВВЕДЕНИЕ

Химические взаимодействия, лежащие в основе окислительных процессов, происходящих в растениях, вносят, безусловно, существенный вклад во многие аспекты жизнедеятельности как на клеточном, так и на тканевом уровнях. Вместе с тем до настоящего времени остается актуальной проблема недостаточной изученности роли отдельных кислородсодержащих соединений в регуляции ростовых функций растений. Особое значение имеет

этот вопрос при оценке возможности влияния регуляторной функции растительных систем на интенсификацию ростовых процессов, в том числе на увеличение урожайности сельскохозяйственных культур [1]. Дальнейшие исследования в этом направлении будут иметь большое значение при решении задач, поставленных в доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной указом Президента России от 21 января 2020 г., в частности, для “обеспечения

населения качественной и безопасной пищевой продукцией”, а также в рамках реализации федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства, которая продлена до 2030 г. Одним из перспективных направлений увеличения урожайности культурных растений является обработка посевов активными химическими средствами, улучшающими усвоение питательных веществ и способствующих активизации биохимических процессов.

Известно, что одним из ключевых положений перекисной теории биологического окисления А.Н. Баха, впервые обнаружившего в клетках растений пероксид водорода (H_2O_2), является необходимость предварительной активации кислородсодержащих молекул в биологических системах [2], что нашло свое дальнейшее развитие в фундаментальной работе Комиссарова [3]. Окислительные реакции оказывают существенное влияние на метаболические взаимодействия в живых организмах [4], также велика их роль в биохимических превращениях, обеспечивающих течение ростовых процессов [5, 6]. Пероксид водорода является одним из важных природных окислительных агентов [7], играющих существенную роль в жизнедеятельности растений, что в значительной степени определяется его относительной стабильностью среди прочих активных форм кислорода. По всей видимости, это свойство является фундаментальным условием, обеспечивающим участие пероксида водорода в биологических процессах, в частности, в жизнедеятельности растений.

В настоящее время, с одной стороны, установлено влияние пероксида водорода на регулирование ряда биохимических процессов в качестве сигнального медиатора [8–10], а также средства, активирующего ростовые процессы в семенном материале [11, 12]. С другой стороны, пероксид водорода, как источник ряда высоко агрессивных кислородсодержащих агентов — ионов и радикалов, представляет опасность в качестве разрушительного фактора клеточных структур живого организма [13]. Таким образом, необходимо констатировать, что роль этого химического вещества в биохимических превращениях многофункциональна и до конца не изучена. Вместе с тем исследования в области биохимии окислительных процессов в растениях показали [7], что эффективность таких взаимодействий возможна лишь при образовании активных форм кислорода, образующихся при воздействии внешних иницирующих факторов.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния на ростовые процессы культурных растений активных химических субстанций, создаваемых на основе пероксида водорода действием катализаторов окислительного характера: 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона. Объектом исследования



Рис. 1. Выращивание тритикале на опытных участках ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов.

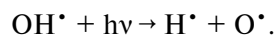
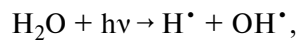
была выбрана зерновая культура тритикале [14], культивация и исследование которой освоено на опытных участках Федерального аграрного научного центра (ФАНЦ) Юго-Востока [15, 16] (рис. 1).

В соответствии с данными ранее проведенных исследований [17], среднегодовая урожайность зерна тритикале при выращивании в регионе Нижнего Поволжья находится в пределах от 120 до 780 г/м² (в среднем во всех образцах — 431 г/м²) [18] и в значительной степени определяется условиями культивирования, составом почв, сезонными климатическими особенностями и рядом других факторов воздействия [19].

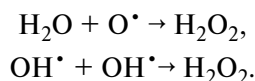
Цель работы — установление зависимости показателей урожайности тритикале при воздействии пероксида водорода, активированного внесением катализирующих добавок в рецептуру для обработки растений в период вегетации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве активатора биологических процессов в настоящем исследовании был использован водный раствор пероксида водорода слабой концентрации — экопероксид. Экологически чистый водный раствор пероксида водорода, применяемый для обработки культурных растений, был получен без использования химических субстанций, при реализации высокоэнергетического бесконтактного воздействия на дистиллированную воду стримерами высоковольтного электрического разряда [20]. В основе настоящего процесса лежит фотодиссоциация, т.е. распад молекул воды с образованием свободных радикалов:



При взаимодействии свободных радикалов с водой и друг с другом происходят следующие химические превращения:



В результате радикальных реакций образуется пероксид водорода.

Концентрацию пероксида водорода определяли с помощью йодометрического титрования [21]. С этой целью через фиксированный промежуток времени из реакционного раствора отбирали пробу объемом 1 мл, добавляли к ней 1 мл H_2SO_4 (0.2 моль/л), вытесняли растворенный кислород, продувая углекислым газом, после чего смешивали с 2 мл обескислороженного 5%-ного водного раствора йодида калия. Выделение йода, образующего с избытком йодида комплексный анион I_3^- , регистрировали методом спектрофотометрии ($\lambda_{\text{max}} = 351 \text{ нм}$, $\epsilon = 26400 \text{ М}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

На первом этапе проведения экспериментов использовали экопероксид с концентрацией 1, 5, 50 мкмоль/л, а также растворы 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона в дистиллированной воде в соотношении 1: 300 для определения наиболее эффективных растворов для дальнейших исследований. 2-Бутанон и 1-тетралон, использованные в опытах для приготовления растворов, предназначенных для обработки тритикале, соответствовали качеству фирмы Merck. Циклогексанон был получен синтетическим путем в лабораторном процессе каталитического гетерофазного взаимодействия [22] и очищен по методике [23].

На втором этапе использовали растворы 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона в перексиде водорода с концентрацией 5 мкмоль/л. Количество катализатора рассчитывали, исходя из обоснованных величин [24], составляющих 1 объемную долю на 300 объемных долей раствора экопероксида с концентрацией 5 мкмоль/л.

Для проведения полевых экспериментов использовали зерновую культуру тритикале, сорт Зубр селекции ФАНЦ Юго-Востока [25]. Настоящий сорт является высокопродуктивным образцом озимой гексаплоидной тритикале ($\times \text{Triticosecale Wittmack}$), разработанным специально для культивации в засушливых условиях Нижнего Поволжья. По результатам наблюдений за 2016–2020 гг. урожай зерна сорта Зубр в среднем составил 42.1 ц/га. Эксперимент в рамках настоящего исследования проведен на озимых посевах тритикале сезона 2022–2023 гг., на опытных стандартных делянках площадью 18 м² каждая. Посев семенного материала производили во 2-й декаде июля 2022 г. В течение сезонного выращивания посевы обрабатывали с использованием стандартных методов агротехники, разработанных

для озимых зерновых культур, выращиваемых в климатических условиях Юго-Восточного региона Российской Федерации [26]. Обработку надземной части растений водным раствором экологически чистого пероксида водорода, а также растворами, содержащими каталитические добавки, производили методом однократного или двукратного опрыскивания в 3-й декаде июня 2023 г. Такой выбор срока обработки соответствовал периоду вегетации – за 4 и 3 нед (повторное опрыскивание) до начала уборки урожая. Расход готового рабочего раствора на одну обработку составил 300 мл/м² стандартного опытного участка. Обработку посевов проводили в сухую безветренную погоду. Уборку культуры произвели в 3-й декаде июля 2022 г. Зерновой материал обрабатывали с использованием стандартных методов [27–29].

Оценка урожайности в рамках настоящего исследования проведена гравиметрическим методом по факту установления количества полученного зерна тритикале. Расчет прибавки урожайности, полученной в результате применения экспериментальных растворов, производили в % по отношению к урожайности, установленной на контрольном участке, где для опрыскивания вегетирующих растений тритикале использовали дистиллированную воду, соблюдая неизменными прочие параметры эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения поставленной задачи – повышения урожайности тритикале – использовали однократное и двукратное опрыскивание надземной части зерновой культуры тритикале в поздний период вегетации водным раствором, полученным в результате растворения катализаторов окислительного характера: 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона в экологически чистом водном растворе пероксида водорода в соотношении 1 : 300.

На первом этапе были проведены эксперименты по однократной обработке надземной части посевов тритикале на опытных участках в период вегетации за 4 нед до уборки урожая растворами экопероксида различной концентрации (1, 5, 50 мкмоль/л), а также растворами 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона в дистиллированной воде в соотношении 1: 300 для определения наиболее эффективных растворов для дальнейших исследований. Контрольный опыт предполагал однократное опрыскивание надземной части растений дистиллированной водой. Каждый полученный результат включал среднее арифметическое трехкратной повторности опытов, проведенных в одинаковых условиях. Урожайность тритикале сорта Зубр по результатам проведенных

Таблица 1. Влияние однократной обработки посевов тритикале в период вегетации растворами экопероксида различной концентрации, 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона на урожайность зерна

Вариант			Урожайность зерна		
Повторность	Раствор для обработки	Концентрация раствора	кг/м ²		прибавка к контролю, %
			в отдельной повторности	среднее арифметическое	
1	Дистиллированная вода (контроль)	—	0.462	0.465	—
2			0.470		
3			0.464		
4	Экопероксид	1 мкмоль/л	0.487	0.495	106
5			0.506		
6			0.492		
7	Экопероксид	5 мкмоль/л	0.516	0.530	114
8			0.532		
9			0.541		
10	Экопероксид	50 мкмоль/л	0.453	0.447	96
11			0.446		
12			0.447		
13	2-Бутанон	1 : 300 объемных долей дистиллированной воды	0.469	0.462	99
14			0.458		
15			0.460		
16	1-Тетралон	1 : 300 объемных долей дистиллированной воды	0.461	0.466	100
17			0.467		
18			0.468		
19	Циклогексанон	1 : 300 объемных долей дистиллированной воды	0.460	0.459	99
20			0.463		
21			0.453		

экспериментов представлена в табл. 1. Долю прироста урожайности рассчитывали по отношению к результату, полученному в контрольном опыте.

Результаты экспериментов, полученных на первом этапе, показали, что обработка надземной части растений экопероксидом с концентрацией 5 мкмоль/л приводила к максимальному увеличению урожайности тритикале по сравнению с контролем, в котором опрыскивание производили дистиллированной водой. Существенных различий при обработке тритикале растворами 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона по сравнению с дистиллированной водой не выявлено.

Одним из ключевых механизмов, обеспечивающих рост и развитие растений при применении экологически чистого водного раствора пероксида водорода, является образование из H_2O_2 кислорода, что было доказано в исследованиях [1, 30]. Кислород, в свою очередь, ускоряет метаболизм в растениях, что и приводит к активации обменных процессов и в конечном итоге более высоким

показателям урожайности культурных растений. Однако необходимо иметь в виду, что такие превращения происходят при определенных оптимальных для растений концентрациях пероксида водорода. Было показано, что экопероксид можно отнести к регуляторам роста растений при использовании его растворов в определенной концентрации для получения эффектов блокирования, либо стимулирования развития растений с учетом вида растения [31]. Это соответствовало определению “регулятор роста растений”, когда действие препарата эффективно при учете видовой и сортовой специфичности в определенной концентрации действующего вещества, что согласуется с полученными данными на первом этапе экспериментов (табл. 1).

Далее, на 2-м этапе экспериментальных исследований были проведены опыты, включающие опрыскивание растений тритикале в период вегетации водным раствором экопероксида с концентрацией 5 мкмоль/л и добавлением катализаторов окислительного характера (2-бутанона,

Таблица 2. Влияние однократной и двукратной обработок раствором экопероксида с концентрацией 5 мкмоль/л в присутствии 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона посевов тритикале в период вегетации

повторность, %	Вариант раствор для обработки в соотношении 1 : 300	количество обработок	Урожай зерна кг/м ²		*Прибавка, % относительно контроля
			в отдельной повторности	среднее арифметическое	
22	2-Бутанон: экопероксид	1	0.648	0.643	138
23			0.639		
24			0.644		
25	2-Бутанон: экопероксид	2	0.679	0.684	147
26			0.687		
27			0.683		
28	1-Тетралон: экопероксид	1	0.495	0.492	106
29			0.499		
30			0.481		
31	1-Тетралон: экопероксид	2	0.635	0.629	135
32			0.619		
33			0.627		
34	Циклогексанон: экопероксид	1	0.683	0.689	148
35			0.691		
36			0.693		
37	Циклогексанон: экопероксид	2	0.827	0.820	176
38			0.812		
39			0.821		

* Относительно средней величины урожайности зерна при использовании дистиллированной воды при однократной обработке – 0.465 кг/м² (табл. 1).

1-тетралона и циклогексанона). Расчетную долю катализатора устанавливали из соотношения 1: 300 объемных частей к раствору экопероксида. Режим обработки посевов тритикале в период вегетации включал 2 варианта опрыскивания до уборки урожая: 1 – однократное за 4 нед, 2 – двукратное за 4 и 3 нед (повторное опрыскивание). Полученные результаты представлены в табл. 2.

В соответствии с представленными в табл. 2 данными, было установлено, что каталитические добавки активировали воздействие экопероксида на растения тритикале, обеспечивая значимое повышение урожайности зерна. Активность была зарегистрирована при участии всех видов использованных катализаторов окислительного характера, что могло свидетельствовать об их способности воздействовать на окислительные биохимические процессы с участием пероксида водорода, при этом максимальное увеличение урожайности отмечали при использовании циклогексанона как при однократной (148%), так и двукратной (176%) обработке посевов тритикале. Необходимо отметить, что 2-бутанон и циклогексанон проявляли высокую активность как при однократной, так и двукратной обработке растения, а 1-тетралон был эффективен

лишь при двукратном применении. Однако необходимо отметить следующую особенность, имеющую практическое значение: разница между однократной и двукратной обработкой экопероксидом с добавкой 2-бутанона составляла всего 9% (138 и 147% соответственно), а для экопероксида с циклогексаном эта разница соответствовала 28% (148 и 176% соответственно). Можно сделать заключение, что двукратная обработка экопероксидом с добавкой 2-бутанона может быть признана малорентабельной.

Представленные экспериментальные результаты показали, что применение пероксида водорода в качестве средства обработки вегетирующих растений способствовало активации биохимических процессов, обеспечивающих увеличение урожайности зерновой культуры тритикале. Вместе с тем было показано, что дополнительная активация механизма окислительного процесса, достигаемая внесением каталитических добавок, способствовала существенному увеличению показателей урожайности. Наилучшие показатели урожайности были достигнуты при использовании циклогексанона. Такой эффект, зарегистрированный при использовании катализаторов окислительного

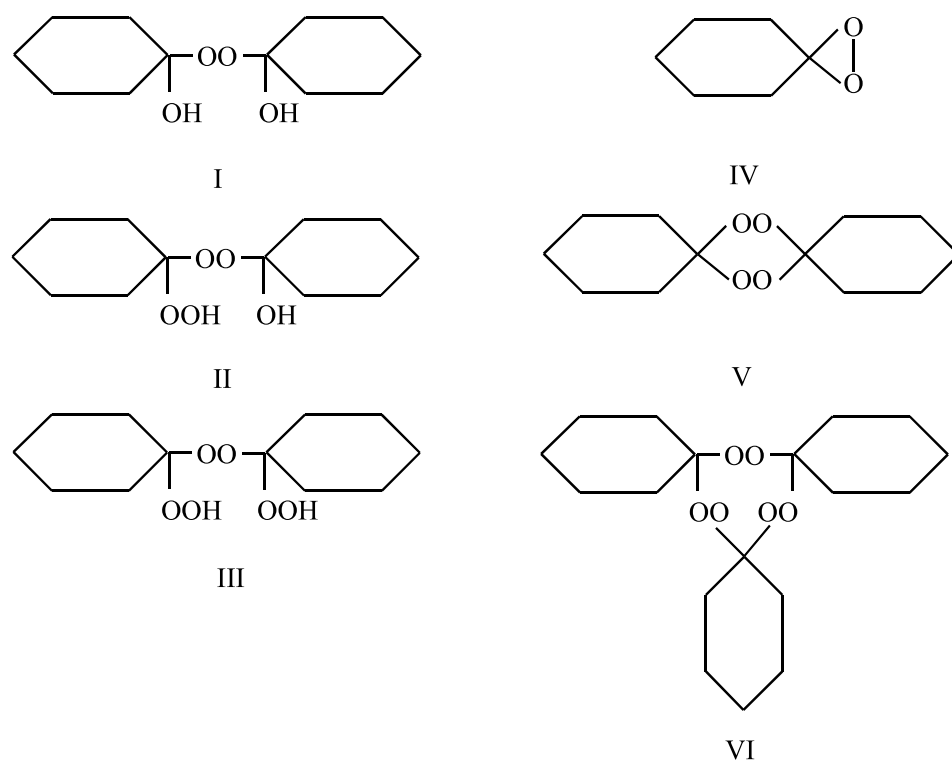


Рис. 2. Структурное строение соединений, образующихся при взаимодействии пероксида водорода и циклогексана в водном растворе.

характера, может быть обусловлен образованием высокоактивных кислородосодержащих соединений [32], имеющих структурное строение I–VI [33], представленное на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведена оценка влияния активатора ростовых процессов пероксида водорода в присутствии катализаторов окислительного характера. В результате экспериментальных исследований, проведенных на посевах зерновой культуры тритикале на опытных участках ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов, было показано, что влияние пероксида водорода на окислительные процессы, происходящие в структуре культурных растений, в значительной степени усиливают каталитические добавки кислородосодержащих соединений: 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона.

Обработка культурных растений, выращенных на опытных участках в открытом грунте, проведенная методом опрыскивания вегетирующих растений активатором роста, показала, что наилучшие результаты были получены при использовании водного раствора пероксида водорода с концентрацией 5 мкмоль/л, усиленного катализатором окислительного характера — циклогексаном. Двукратная обработка указанным раствором, проведенная за 4 и 3 нед

до начала уборки урожая, привела к увеличению урожайности зерна тритикале на 176% относительно контроля.

Повышение активности воздействия пероксида водорода на биохимические процессы, происходящие в растениях в присутствии катализаторов окислительного характера 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона, могла быть обоснована образованием в водных растворах высокоактивных кислородосодержащих структур, оказывающих существенное влияние на регуляторные функции растений, что в конечном итоге приводило к более высоким показателям урожайности культурных растений, в частности, тритикале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стребков Д.С., Будник М.И., Душков В.Ю., Апашева Л.М., Лобанов А.В., Овчаренко Е.Н., Турбин В.В., Розанцев М.В., Беляков А.М., Кулик К.Н. Повышение урожайности озимой пшеницы с помощью экологически чистого водного раствора пероксида водорода природной концентрации // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2022. № 4. С. 64–67.
2. Бах А.Н. Собрание трудов по химии и биохимии. М.: АН СССР, 1950. 648 с.

3. *Комиссаров Г.Г.* Фотосинтез: физико-химический подход. М.: Едиториал УРСС, 2003. 224 с.
4. *Полесская О.Г.* Растительная клетка и активные формы кислорода / Под ред. И.П. Ермакова. М.: КДУ, 2007. 140 с.
5. *Турпаев К.Т.* Активные формы кислорода и регуляция экспрессии генов // Биохимия. 2002. Т. 67. № 3. С. 339–352.
6. Изменение содержания агглютинаина зародышей пшеницы в растениях, обработанных перекисью водорода // Прикл. биохим. и микробиол. 2007. Т. 42. С. 247–251.
7. *Møller I.M., Jensen P.E., Hansson A.* Oxidative modifications to cellular components in plants // Ann. Rev. Plant Biol. 2007. V. 58. P. 459–481.
8. *Lander H.M.* An essential role for free radicals and derived species in signal transduction // FASEB J. 1997. V. 11. № 1. P. 118–124.
9. *Bhattacharjee S.* Reactive oxygen species and oxidative burst: roles in stress, senescence and signal transduction in plants // Curr. Sci. 2005. V. 89. P. 1113–1121.
10. *Жук В.В., Мусиенко Н.Н.* Сигнальная функция перекиси водорода в адаптации растений пшеницы к условиям засухи // Мат-лы Международ. научн. конф. “Физиология растений – теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий”. Калининград, 2014. Т. 2. С. 169–171.
11. *Будник М.И., Сергеев С.Н., Тараскин К.А., Апашева Л.М., Ростовцев Р.А., Ущановский И.В., Пролетова Н.В., Лобанов А.В., Степнова А.Ф., Казиев Г.З., Овчаренко Е.Н., Барнашова Е.К., Смурова Л.А., Грудзинский А.В.* Новый научно-методический подход к экологической обработке семян льна, повышающей всхожесть и предотвращающей слипание посевного материала // Мат-лы XVIII Международ. научн. конф. “Актуальные вопросы биологической физики и химии. БФФХ – 2023”, Севастополь. ГУ, МГУ им. М.В. Ломоносова. Севастополь, 2023. С. 116–117.
12. *Сергеев С.Н., Тараскин К.А., Касаикина О.Т., Лобанов А.В., Будник М.И., Грудзинский А.В., Сорокин П.А., Барнашова Е.К., Апашева Л.М., Овчаренко Е.Н., Лебедев С.В., Шербакова Э.А., Бондар Ю.В., Касимцева К.С.* Разработка метода химической активации светонезависимых окислительных процессов в стадии прорастивания семенного материала // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2023. № 6. С. 24–37.
13. *Шлапакова Т.И., Костин Р.К., Тягунова Е.Е.* Активные формы кислорода: участие в клеточных процессах и развитии патологии // Биоорг. химия. 2020. Т. 46. № 5. С. 466–485.
14. *Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Жилин С.В., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашикова Э.В., Окладникова В.П.* Гаплоидия тритикале *in vitro* // Зерн. хоз-во России. 2022. № 1(79). С. 39–45.
15. *Дьячук Т.И., Рудных С.К., Барнашова Е.К., Грибова Е.Д.* Разработка процесса выделения глиаина из зерновой культуры тритикале и способа идентификации образца методом капиллярного электрофореза // Вестн. Международ. ун-та природы, общества и человека “Дубна”. Сер. Естеств. и инж. науки. 2020. № 4(49). С. 23–29.
16. *Барнашова Е.К., Покидышев А.Н., Слюзова О.В., Гардина Ю.С., Жилин С.В., Тараскин К.А.* Адаптация метода аналитического контроля содержания α-амилазы в зерне тритикале // Агрохимия. 2023. № 9. С. 56–64.
17. *Жилин С.В., Акинина В.Н., Дьячук Т.И., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашикова Э.В., Куликова В.П., Сайфетдинов Е.А.* ДГ линии – исходный материал для селекции тритикале в Нижнем Поволжье // Генофонд и селекция растений: Сб. мат-лов 6-й Международ. конф., Новосибирск, 23–25 ноября 2022 г. Новосибирск: ФИЦ Институт цитологии и генетики СО РАН, 2022. С. 66–68.
18. *Поминов А.В.* Исходный материал для селекции тритикале в Нижнем Поволжье: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2015. 22 с.
19. *Акинина В.Н., Дьячук Т.И., Хомякова О.В., Жилин С.В., Барнашова Е.К., Калашикова Э.В., Куликова В.П.* Характеристика сортов и перспективных линий тритикале в условиях Нижнего Поволжья // Тритикале: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 7–8 июня 2022 г. Вып. 10. Ростов/нД.: Изд-во Юг, 2022. С. 42–52.
20. *Стребков Д.С., Будник М.И., Апашева Л.М., Лобанов А.В., Овчаренко Е.Н.* Получение экологически чистых растворов пероксида водорода при высокоэнергетическом бесконтактном воздействии на воду и их применение // Мат-лы XV Международ. научн. конф. БФФХ-2020. Севастополь, 2020. С. 191–192.
21. *Лобанов А.В., Рубцова Н.А., Веденеева Ю.А., Комиссаров Г.Г.* Фотокаталитическая активность хлорофилла в образовании пероксида водорода в воде // Докл. АН. 2008. Т. 421. № 6. С. 773–776.
22. *Лебедев С.В., Шантроха А.В., Тараскин К.А.* Окислительный катализ в процессе гетерофазного синтеза с участием олефинов циклического строения. Ч. 1. Обоснование направления исследований // Auditorium. 2022. № 3(35). С. 30–38.
23. *Лебедев С.В., Шантроха А.В., Тараскин К.А.* Окислительный катализ в процессе гетерофазного синтеза с участием олефинов циклического строения. Ч. 2. Экспериментальные исследования: результаты и обсуждение // Auditorium. 2022. № 3(35). С. 39–46.
24. *Сергеев С.Н., Будник М.И., Лебедев С.В., Барнашова Е.К., Деревягин С.С., Тараскин К.А., Грудзинский А.В.* Способ увеличения урожайности зерновой культуры тритикале путем опрыскивания водным раствором пероксида водорода и циклогексана надземной части растений в период

- поздней вегетации: Пат. 2797916, РФ // Изобретения, полезные модели. 2023. № 17.
25. Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Жилин С.В., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашникова Э.В., Куликова В.П. Новый сорт озимой тритикале Зубр // Аграрн. научн. журн. 2022. № 6. С. 19–22.
 26. Прянишников А.И., Гапонов С.Н., Ляцева С.В., Ермолаева Т.Я., Нуждина Н.Н., Дьячук Т.И., Заворотина А.Д., Жолинский Н.М., Деревягин С.С., Курдюков Ю.Ф., Азизов З.М., Стрижков Н.И., Левицкая Н.Г., Ярошенко Т.М. Озимые культуры. Саратов: НИИСХ Юго-Востока, 2017. 37 с.
 27. Munoz-Insa A., Gastl M., Becker T. Influence of malting on the protein composition of *Triticale* ($\times$ *Triticosecale* Wittmack) “Trigold” // *Cereal Chem.* 2016. Т. 93. № 1. Р. 10–19.
 28. Панкратов Г.Н., Кандроков Р.Х., Щербакова Е.В. Исследование процесса измельчения зерна тритикале // *Хлебопродукты*. 2016. № 10. С. 59–61.
 29. Мацкевич И.В., Невзоров В.Н., Кох Ж.А., Беззязов Д.С. Совершенствование технологии подготовки зерна к переработке // Мат-лы научн. конф. “Научно-практические аспекты развития АПК”. Т. 2. Красноярск: КрасГАУ, 2020. С. 25–27.
 30. Douglass W.C. Hydrogen peroxide — medical miracle. Rhino Publishing, S.A., 2003. 177 p.
 31. Апашева Л.М., Будник М.И., Лобанов А.В., Овчаренко Е.Н., Розанцев М.В., Турбин В.В., Сергеев А.И., Стребков Д.С. Экологически чистый пероксид водорода: получение, рострегулирующие свойства // *Актуал. вопр. биол. физики и хим.* 2021, Т. 6. № 2. С. 358–361.
 32. Антоновский В.Л., Хурсан С.Л. Физическая химия органических пероксидов. М.: Академкнига, 2003. 391 с.
 33. Гайфуллин А.А., Тунцева С.Н., Гайфуллин Р.А., Харлампиди Х.Э. Получение пероксида циклогексана с использованием пероксидсодержащих сточных вод // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2012. Т. 15. № 23. С. 26–30.

Evaluation of Triticale Yield under the Influence of Hydrogen Peroxide in the Presence of Oxidative Catalysts

**Е. К. Barnashova^a, S. N. Sergeev^b, M. I. Budnik^{c, #}, K. A. Taraskin^{b, ##},
S. S. Derevyagin^d, O. T. Kasaikin^e, L. M. Apasheva^e, E. N. Ovcharenko^e,
A. V. Lobanov^e, A. V. Grudzinsky^c**

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

^bScientific Research Institute of Applied Acoustics, ul. 9 May 7a, Moscow region, Dubna 141981, Russia

^cRussian Academy of Rocket and Artillery Sciences, 1st Myasnikovskaya ul. 3, bld. 3, Moscow 107564, Russia

^dFederal Agricultural Research Center of the South-East, ul. Tulaykova 7, Saratov 410010, Russia

^eFederal Research Center of Chemical Physics named after N.N. Semenov of the RAS, ul. Kosygina 4, Moscow 119991, Russia

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

^{##}E-mail: kant1958@yandex.ru

An experimental assessment of the effect of activators of oxidative processes on the yield of triticale grain crops was carried out at experimental sites of the Federal Agrarian Scientific Center of the South-East, Saratov. Triticale plants during the growing season were sprayed with an aqueous solution of hydrogen peroxide with a concentration of 5 mmol/l in the presence of oxidative catalysts based on oxygen-containing compounds: 2-butanone, 1-tetralone, cyclohexanone. The effectiveness of the use of all catalysts used in this work is shown. The best results were obtained by double treatment with an aqueous solution of cyclohexanone in hydrogen peroxide with a concentration of 5 mmol/l in a ratio of 1: 300, carried out 4 and 3 weeks before the start of harvesting, which led to an increase in the yield of triticale grain by 176% relative to the control. Hydrogen peroxide is an additional source of oxygen that accelerates metabolism in plants. An even greater activation of metabolic processes in plants occurred in the presence of oxidative catalysts (2-butanone, 1-tetralone, cyclohexanone), due to the formation of highly active oxygen-containing structures in aqueous solutions, which ultimately led to higher yields of cultivated plants, in particular triticale.

Keywords: hydrogen peroxide, triticale, catalyst, yield, grain crop, oxidative processes.

УДК 632.959

ВОЗМОЖНОСТЬ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТИМОЛА И КАРВАКРОЛА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧИСЛЕННОСТИ ПЕРСИКОВОЙ ТЛИ *Myzus persicae* (Sulzer, 1776)

© 2024 г. Е. А. Степанычева^{1,*}, М. О. Петрова¹, Т. Д. Черменская¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: stepanycheva@yandex.ru

Широкий спектр биологической активности эфирных масел в отношении вредителей дает основание рассматривать их в качестве дополнительных средств защиты растений и в других мероприятиях, направленных на снижение численности вредных членистоногих. В данной работе представлены результаты исследования биологической активности смеси тимола и карвакрола, входящих в состав эфирных масел многих растений в том числе душицы обыкновенной *Origanum vulgare* L. на персиковую тлю *Myzus persicae*. Использование эфирного масла и смеси его компонентов в качестве фумигантов продемонстрировало их высокий афидоцидный потенциал. При обработке листьев кормового растения (бобов) установлена способность смеси тимола и карвакрола снижать жизнеспособность самок тли и численность потомства, а на вегетирующих растениях (перце) негативно воздействовать на выживаемость особей дочернего поколения в преимагинальный период. Короткая продолжительность действия позволяет применять масла и отдельные компоненты совместно с агентами биологической борьбы и опылителями, и предполагает незначительное или полное отсутствие их остатков в пищевых продуктах. Препараты на основе эфирных масел растений можно использовать непосредственно перед уборкой урожая, в связи с минимальным периодом ожидания.

Ключевые слова: эфирное масло *Origanum vulgare*, фумигация, контактно-кишечное действие, контроль численности.

DOI: 10.31857/S0002188124070058, **EDN:** CFZUWS

ВВЕДЕНИЕ

С начала 2000-х гг. интенсивное изучение широкого спектра биологической активности эфирных масел (ЭМ) в отношении вредителей и болезнетворных микроорганизмов позволило рассматривать их в качестве альтернативы синтетическим химическим пестицидам для защиты растений и в других мероприятиях, направленных на снижение численности вредных для сельского хозяйства членистоногих.

Сегодня в разработке находится ряд инсектицидов, которые содержат в качестве активных ингредиентов масла розмарина, мяты перечной, корицы, гвоздики, эвкалипта и тимьяна и др. Некоторые продукты содержат смеси масел [1], в то время как в других используют одно эфирное масло или даже индивидуальное соединение, входящее в его состав. В ряде эфирных масел инсектицидную активность объясняют свойствами доминирующего компонента, например, тимолом в масле тимьяна *Thymus vulgaris* L. или цитралем в масле лемонграсса

Cymbopogon citratus (DC.) Stapf, в других, со сложным составом биологическую активность связывают не с основным компонентом, а с синергетическим взаимодействием составляющих [2, 3]. Быстрое проявление эффекта воздействия ЭМ на многие виды вредителей дает основание предполагать, что их мишенью является нервная система. Масла, как правило, легко взаимодействуют с насекомыми при контакте и питании обработанным субстратом, а летучий характер ЭМ и их компонентов позволяет считать многих из них потенциально эффективными фумигантами в закрытых помещениях. Эти компоненты демонстрируют потенциально важные сублетальные поведенческие эффекты вредных членистоногих, в том числе отказ насекомых питаться и откладывать яйца на (в) обработанный пищевой субстрат [4, 5]. Влияние летучих соединений на поведение вредных членистоногих также может играть роль в защите растений, продуктов растениеводства, снижая их привлекательность для вредителей. Но приходится учитывать, что повышенный интерес к растительным ЭМ в качестве потенциальных

пестицидов, неизбежно столкнется с нехваткой необходимого объема растительных ресурсов. Чтобы избежать этих проблем, изучают различные способы производства натуральных терпенов из источников, отличных от эфирных масел [6, 7].

Исследования показали, что синергия между терпенами эфирных масел, по-видимому, обычное явление и его механизм был продемонстрирован на маслах из растений рода *Rosmarinus* [8]. Эффективность активных ингредиентов биоинсектицида против сосущих фитофагов уже доказана коммерческим успехом препарата Requiem® (фирма Bayer), представляющего собой смесь синтетически полученных монотерпенов (α -терпинен, p -цимен и d -лимонен), которые являются основными компонентами растения *Chenopodium ambrosioides* L. [9, 10]. Продукты на основе эфирных масел или их составляющих используют в США уже более 10 лет, а в ЕС — последние 4–5 лет [7].

Цель работы — изучить виды биологической активности смеси тимола и карвакрола, входящих в состав многих ЭМ растений и, в том числе, душицы обыкновенной *Origanum vulgare* [11–14] для многоядного вредителя сельскохозяйственных культур открытого и закрытого грунта — персиковой тли *Myzus persicae* (Sulzer, 1776).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментов культуру персиковой тли *M. persicae* в течение нескольких поколений разводили в лабораторных условиях на проростках конских бобов (*Vicia faba* L.) при температурном режиме $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ и световом периоде 18 ч.

Эфирное масло *O. vulgare* и смесь тимол-карвакрол (20%, в соотношении 1 : 1) были получены из Crop Research Institute (г. Прага, Чешская Республика).

Фумигационное действие на самок тли. Тестируемые образцы растворяли в этаноле до определенной концентрации и наносили на фильтровальную бумагу (диспенсер) по 10 мкл/повторность. Использовали дозировки 7.5, 7.0, 6.0, 5.0, 4.5, 4.0 и 3.0 мкл/л воздуха.

Изучения фумигационного действия проводили в контейнерах с плотно закрывающимися крышками по описанной ранее методике [15], основанной на бесконтактном воздействии летучих ЭМ. В качестве субстрата для питания самок и развития потомства использовали листья бобов на влажной фильтровальной бумаге. Через 1 сут подсчитывали живых, погибших самок и рожденных личинок. В каждой из 6-ти повторностей первоначально было по 20 самок тли.

Контактно-кишечное действие на самок тли. Для испытаний ЭМ *O. vulgare* готовили 1%-ный раствор, растворяя 100 мкл масла в 900 мкл этилового спирта с последующим добавлением 9 мл воды при перемешивании. Концентрации 0.03–0.05% получали методом последовательного разбавления 1%-ного раствора водой. Смесь тимол-карвакрол растворяли в воде до необходимых концентраций.

Изучение контактно-кишечного действия проводили двумя способами:

1. На изолированных листьях бобов. На дно чашки Петри (диаметр 10 см) помещали влажную фильтровальную бумагу, на нее укладывали лист растения, обработанный погружением в раствор препарата на 3 с, в контроле — лист, подвергшийся таким же манипуляциям, но с водой. В каждую чашку выпускали по 20 самок тли и закрывали их стеклянным садком с крышкой-сеткой (для вентиляции и исключения фумигационного действия). Через 24 ч учитывали живых, погибших самок и число родившихся личинок;

2. На вегетирующих растениях. Растения перца сорта Ласточка выращивали индивидуально в пластиковых стаканчиках и использовали в экспериментах в фазе 2-х настоящих листьев. Растения опрыскивали растворами масла, смеси тимол-карвакрол (20%) или водой (в контроле). На каждое растение, подготовленное таким образом, помещали по 15 самок тли. Через 2 сут самок удаляли, учитывая живых и число родившихся личинок. Во время следующего учета через 5 сут подсчитывали выживших особей дочернего поколения.

Оценку действия тестируемых образцов на персиковую тлю проводили по следующим формулам:

Смертность, % = $[(\text{Гибель в опыте} - \text{гибель в контроле}) / (100 - \text{гибель в контроле})] \times 100$;
 снижение численности потомства (СЧП) = $(\text{число личинок дочернего поколения в контроле} - \text{число личинок в опыте}) / \text{число личинок в контроле} \times 100$.

Для анализа математических и статистических данных использовали программу SIGMA PLOT 12.5. Достоверность различий оценивали при 5%-ном уровне значимости. Концентрации, вызывающие 50%-ную смертность тли, снижение численности дочернего поколения, снижение плодовитости и жизнеспособности потомства на 50% (ЛД_{50}) рассчитывали с помощью пробит-анализа [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фумигационная активность. Летучие тестируемые образцы — эфирного масла душицы обыкновенной и смеси 2-х ее компонентов (тимол-карвакрол (20%)) обладали достаточно высоким афидицидным потенциалом. Например, при воздействии

Таблица 1. Фумигационная активность смеси тимол–карвакрол (20%) и ЭМ *O. vulgare* для самок персиковой тли

Дозировка, мкл/л воздуха	Исходное количество особей, экз.	Гибель, %	Смертность, %	Личинок на 1 самку	Снижение числа живых личинок на самку, %
Тимол–карвакрол					
7.5	100	68.7 ± 4.29*	64.5	0.04 ± 0.02*	91.3
7.0	121	42.3 ± 4.23*	39.8	0.17 ± 0.06*	75.4
6.0	107	39.8 ± 7.34*	31.8	0.13 ± 0.05*	72.3
5.0	129	19.2 ± 1.95*	14.2	0.43 ± 0.05*	57.8
4.0	122	12.1 ± 2.60	7.0	0.47 ± 0.03*	53.9
3.0	132	6.9 ± 1.99	4.4	0.92 ± 0.05*	45.6
ЭМ <i>O. vulgare</i>					
6.0	105	57.4 ± 6.41*	56.1	0.07 ± 0.04*	94.4
5.0	119	52.9 ± 4.30*	52.9	0.23 ± 0.05*	81.8
4.5	102	50.6 ± 3.75*	49.1	0.28 ± 0.07*	76.9
3.0	100	19.2 ± 2.06*	17.1	0.55 ± 0.04*	64.7

* Различия между средними достоверны при $p \leq 0.05$.

(в закрытых контейнерах) на персиковую тлю тестируемой смесью в дозе 7.5 мкл/л (0.75 мкл каждого вещества/л) зарегистрирована гибель самок более 60% от исходного количества и отмечено снижение числа личинок дочернего поколения более чем в 11 раз (табл. 1).

Однако при такой дозировке уже через 1 сут на листьях проявлялась фитотоксичность. Постепенное снижение дозировки смеси привело к достаточно резкому повышению жизнеспособности самок, в то время как изменение негативного влияния на потомство проходило более плавно. После применения 4.0 мкл/л (0.4 мкл каждого вещества/л) показатель гибели самок достоверно не отличался от контроля, тогда как число молодых личинок дочернего поколения на 1 самку было в 2 раза меньше, чем в контроле.

Использование в аналогичном эксперименте многокомпонентного масла душицы *O. vulgare* показало его высокую токсичность и способность влиять на потомство и дольше сохранять оба вида активности при изменении дозировки. Сравнение дозировки 6.0 мкл/л в обоих вариантах показало, что при использовании смеси тимол–карвакрол (20%) смертность самок тли была в 1.8 раза меньше, чем после применения масла, а влияние смеси на число потомства соответственно в 1.3 раза слабее, чем масла. После использования дозировки 3.0 мкл/л эти показатели различались соответственно в 3.9 и 1.4 раза. ЛД₅₀ смеси тимол–карвакрол (20%) для самок тли составила 7.3 мкл/л, ЛД₅₀ ЭМ *O. vulgares* = 4.77 мкл/л воздуха. Дозировки, необходимые для снижения числа личинок

на 50% для смеси и масла, находились на уровне 3.60 и <3.0 мкл/л соответственно.

Контактно-кишечное действие. При первичной оценке контактно-кишечного действия смеси тимол–карвакрол (20%) (на изолированных листьях бобов) было установлено, так же как и при фумигации, ее влияние на жизнеспособность самок тли и численности потомства (табл. 2).

При концентрациях смеси 0.15 и 0.1% происходила быстрая гибель самок, в результате чего отсутствовало дочернее поколение. Использование концентраций тимол–карвакрола от 0.15 до 0.04% вызывало смертность самок тли соответственно в пределах 100–73% с высокой степенью достоверности по сравнению с контролем ($p < 0.001$). После разведения рабочего раствора до 0.03% гибель самок была в 10 раз больше, чем в контроле, в то время как число личинок дочернего поколения снизилось лишь в 1.4 раза, что могло быть связано с постепенным накоплением в организме самок веществ, приводящих к отсроченному летальному исходу, что давало время на рождение личинок.

Что касается ЭМ *O. vulgares*, то при таком способе воздействия на самок персиковой тли оно вызывало сходные эффекты, но процесс нивелирования активности происходил раньше, чем у смеси тимол–карвакрол. Уже после использования 0.04% концентрации показатели смертности взрослых особей и снижение их плодовитости были значительно меньше 50%.

ЛД₅₀ смеси тимол–карвакрол (20%) для самок тли составила 0.022%, ЛД₅₀ ЭМ *O. vulgares* = 0.049%. Дозировки, необходимые для снижения

Таблица 2. Контактно-кишечное действие смеси тимол–карвакрол (20%) и ЭМ *O. vulgare* на персиковую тлю

Концентрация, %	Исходное количество особей, экз.	Гибель, %	Смертность, %	Личинок на 1 самку	Снижение числа живых личинок на самку, %
Тимол–карвакрол					
0.15	89	100 ± 0.0*	100	0.0 ± 0.0*	100
0.10	92	98.9 ± 1.03*	98.1	0.0 ± 0.0*	100
0.07	97	85.8 ± 3.58*	85.6	0.17 ± 0.07*	78.5
0.05	104	78.8 ± 2.97*	78.6	0.27 ± 0.03*	65.8
0.04	116	72.7 ± 2.55*	70.9	0.22 ± 0.02*	52.1
0.03	112	66.5 ± 5.02*	63.9	0.33 ± 0.02*	28.3
0.02	109	49.7 ± 1.67*	46.4	0.39 ± 0.06	15.2
ЭМ <i>O. vulgare</i>					
0.05	116	65.1 ± 5.80*	63.8	0.25 ± 0.06*	63.8
0.04	108	17.9 ± 4.90*	15.1	0.43 ± 0.04*	38.7
0.03	116	2.58 ± 1.17	0.0	0.47 ± 0.10	32.8

* Различия между средними достоверны при $p \leq 0.05$.

Таблица 3. Влияние смеси тимол–карвакрол (20%) на персиковую тлю при обработке растений перца

Показатели активности*	Концентрация смеси, %			
	0.1	0.2	0.3	0.4
	Через 2 сут			
Гибель самок, %	31.1 ± 8,55	36.7 ± 2.86	38.3 ± 5.14	50.1 ± 5.69
Смертность личинок с учетом контроля, %	27.0	31.3	32.3	45.2
Число личинок на 1 исходную самку	1.2 ± 0.14	1.2 ± 0.11	1.4 ± 0.11	0.8 ± 0.07
Снижение плодовитости (личинок на исходную самку)	40.0	50.0	48.1	70.3
Через 5 сут в дочернем поколении				
Живых личинок на 1 исходную самку	0.9 ± 0.10	0.8 ± 0.08	0.8 ± 0.12	0.3 ± 0.08
Гибель личинок, %	22.0 ± 1.80	28.9 ± 3.25	49.2 ± 3.59	70.6 ± 10.0
Смертность личинок (с учетом контроля)	12.8	22.3	42.8	66.7
Снижение жизнеспособного потомства, %	49.9	63.6	66.7	87.5

* Различия между средними достоверны при $p \leq 0.05$ для всех показателей.

числа живых личинок на самку на 50% для смеси и масла, находились на уровне 0.039% и 0.042% соответственно.

Эксперименты на вегетирующих растениях подтвердили данные, полученные при изучении влияния смеси тимол–карвакрол (20%) на самок тли на отдельных листьях (табл. 3).

Гибель самок тли была больше, чем в контроле с высокой степенью достоверности (только в варианте с 0.1%-ной концентрацией $p = 0.017$, а в остальных случаях $p < 0.001$). Концентрация смеси 0.4% обеспечивала гибель половины самок. Во всех вариантах число личинок на 1 исходную самку было значительно меньше, чем в контроле

($p < 0.001$). Смесь 0.2% снижала плодовитость самок в 2 раза по сравнению с контролем. Дальнейшее наблюдение за молодыми личинками показало снижение их жизнеспособности (во всех вариантах $p < 0.001$) по сравнению с личинками, развивающимися на растениях, обработанных водой. Максимальная смертность отмечена в вариантах с применением 0.3 и 0.4%-ных растворов и превосходила контрольный показатель в 4.4 и в 6.3 раза. Суммарный эффект от снижения плодовитости самок и гибели личинок обеспечил снижение численности жизнеспособного потомства в 2 раза после использования 0.1%-ного раствора. Самый высокий показатель был получен после применения

0.4%-ной концентрации, но через 2-е сут на растениях проявились признаки фитотоксичности.

Тимол и карвакрол являются основными компонентами эфирных масел растений семейств Lamiaceae — Яснотковых (Губоцветных), Verbenaceae — Вербеновых, Ranunculaceae — Лютиковых, представителями которых являются *Origanum* spp., *Thymus* spp., *Satureja* spp. и т.п. Данные вещества обладают антимикробной и антиоксидантной активностью [17], что является основой их широкого применения в косметической, пищевой, фармацевтической и других отраслях. Не менее важны их инсектицидные свойства. Проведение анализа сравнительной активности отдельных веществ с образцами ЭМ растений, в состав которых они входят, не позволил выявить общей закономерности эффективности на членистоногих при различных способах воздействия.

Например, оценка фумигационной активности по отношению к *Trichoplusia ni* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae) эфирного масла лемонграсса *Cymbopogon citratus* и тимьяна *Thymus vulgaris* выявила более высокий потенциал многокомпонентных масел по сравнению с чистым веществом [2]. После такого же способа воздействия на личинок 4-го возраста комаров *Anopheles stephensi*, тимол был в 1.6 раза более токсичен, чем масло семян *Trachyspermum ammi* (Linn.) Sprauge. Токсичность летучих соединений для самок *A. stephensi* и их влияние на потомство (число и жизнеспособность личинок) были значительно выше у тимола, чем у ЭМ [18]. В похожих экспериментах с ЭМ *Mosla chinensis* Maxim. cv. Jiangxiangru и его основными компонентами тимолом (50.6%) и карвакролом (18.4%), масло проявило более высокую токсичность для имаго *M. persicae* ($ЛК_{50} = 4.34$ мкл/л воздуха), чем тимол ($ЛК_{50} = 5.88$ мкл/л воздуха), а карвакрол значительно уступал по активности им обоим ($ЛК_{50} = 10.06$ мкл/л воздуха) [19].

Наши исследования подтвердили потенциал ЭМ *O. vulgare* в качестве биопестицида против персиковой тли, примененного методом фумигации. При таком способе воздействия на самок персиковой тли масло душицы обыкновенной оказалось более эффективным ($ЛД_{50} = 4.77$ мкл/л воздуха), чем смесь тимола с карвакролом ($ЛД_{50} = 7.30$ мкл/л воздуха), а снижение плодовитости на 50% вызывали дозировки масла <3.0 мкл/л, смеси — на уровне 3.60 мкл/л воздуха.

При обработке пищевого субстрата (изолированных листьев бобов) (контактно-кишечное действие) ЭМ *O. vulgares* приводило к гибели 50% самок и снижению числа особей дочернего поколения на 50% при концентрации 0.049 и 0.042% соответственно.

Смесь тимол—карвакрол (20%) показала высокую активность в отношении персиковой тли в вегетационных экспериментах. Кроме гибели самок и снижения числа потомства установлено пролонгированное действие, проявляющееся в снижении жизнеспособности особей дочернего поколения. Максимальный эффект (87.5%), был получен при использовании 0.4%-ной концентрации, но при такой концентрации на листьях перца проявилась фитотоксичность. По данным [20], 100%-ную гибель обеспечивало применение ЭМ *O. vulgare* в концентрации 0.3% при заселении обработанных листьев картофеля самками персиковой тли. Но и в этих экспериментах отмечены следы фитотоксичности. Способность масел различных растений и *O. vulgare* в том числе, при определенных концентрациях негативно влиять на растения известно, и необходимо это учитывать для каждой культуры [21].

Широкое использование эфирных масел в качестве вкусовых и ароматических веществ предполагает их безопасность и поэтому приветствуется возможность их применения в качестве пестицидов. Короткий период действия (низкая стойкость в полевых условиях) способствует применению масел совместно с агентами биологической борьбы и опылителями и объясняет, как правило, относительно низкую токсичность для птиц, рыб и других диких животных и предполагает незначительное или полное отсутствие остатков в пищевых продуктах. Препараты на основе эфирных масел растений можно использовать непосредственно перед уборкой урожая, в связи с минимальным периодом ожидания. Совместное использования нескольких отдельных химически сложных масел может не только повысить биологическую эффективность за счет синергетического действия, но и снизить вероятность выработки устойчивости. Поэтому так необходимо оценивать биологическую активность каждого соединения ЭМ и возможность проявления синергетического эффекта при их совместном применении. При обработке растений эфирные масла, как правило, оказывают минимальное остаточное действие в качестве контактных инсектицидов, но в полевых условиях есть свидетельства того, что вредителей можно сдерживать или отпугивать в течение гораздо более длительного времени при использовании специальных препаративных форм (нанопрепараты и технологии микрокапсулирования). Технологии рецептур, которые замедляют испарение вполне могут улучшить использование эфирных масел [22, 23].

Из всех одобренных биопестицидов на основе ЭМ и их составляющих нет ни одного, предназначенного для фумигации [7]. Поэтому, установленное нами наличие у смеси тимол—карвакрол (20%) фумигационного действия может играть роль в процессе дальнейшего поиска эффективных и малоопасных фумигантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты продемонстрировали более высокую эффективность смеси тимол–карвакрол для персиковой тли по сравнению с ЭМ. При обработке пищевого субстрата у обоих образцов конечный эффект состоял из гибели имаго и снижения плодовитости самок фитофага. Длительное наблюдение за персиковой тлей на вегетирующих растениях позволило установить и повышенную смертность личинок дочернего поколения.

Представленные результаты могут пополнить сведения о инсектицидной активности эфирных масел и их составляющих для разработки препаратов форм и способов применения биопестицидов. Использование в качестве инсектицидов отдельных соединений из состава эфирных масел позволит избежать зависимости от количества и качества сырьевого материала, зависящего от места произрастания, сроков сбора, условий хранения и т.п., а применение их смесей снизит вероятность развития резистентности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmed Q., Agarwal M., Al-Obaidi R., Wang P., Ren Y. Evaluation of aphicidal effect of essential oils and their synergistic effect against *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) // *Molecules*. 2021. V. 26. Iss. 10. Art. 3055.
2. Tak J.-H., Jovel E., Isman M.B. Contact, fumigant, and cytotoxic activities of thyme and lemongrass essential oils against larvae and an ovarian cell line of the cabbage looper, *Trichoplusia ni* // *J. Pest. Sci.* 2016. V. 89. Iss. 1. P. 183–193.
3. Tak J.-H., Isman M.B. Penetration-enhancement underlies synergy of plant essential oil terpenoids as insecticides in the cabbage looper, *Trichoplusia ni* // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. Iss. 1. Art. 42432.
4. Park J.-H., Jeon Y.-J., Lee C.H., Chung N., Lee H.-S. Insecticidal toxicities of carvacrol and thymol derived from *Thymus vulgaris* Lin. against *Pochazia shantungensis* Chou & Lu., newly recorded pest // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. Iss. 1. Art. 40902.
5. Damtie D., Mekonnen Y. Toxicity and oviposition deterrent activities of thyme essential oils against *Anopheles arabiensis* // *Psyche: J. Entomol.* V. 2021. Ar. ID6684156. 7 p.
6. Forti L., Di Mauro S., Cramarossa M.R., Filipucci S., Turchetti B., Buzzini P. Non-conventional yeast whole cells as efficient biocatalysts for the production of flavors and fragrances // *Molecules*. 2015. V. 20. Iss. 6. P. 10377–10398.
7. Isman M.B. Commercial development of plant essential oils and their constituents as active ingredients in bioinsecticides // *Phytochem. Rev.* 2020. V. 19. Iss. 2. P. 235–241.
8. Isman M.B., Wilson J.A., Bradbury R. Insecticidal activities of commercial rosemary oils (*Rosmarinus officinalis*) against larvae of *Pseudaletia unipuncta* and *Trichoplusia ni* in relation to their chemical compositions // *Pharmaceut. Biol.* 2008. V. 46. Iss. 1–2. P. 82–87.
9. Requiem® EC (QRD452). Terpenoid Blend QRD460 (α -terpinene, p-cymene, and d-limonene) // *Doc M III. Sec. 6. AgraQuest, Inc.*, 2011. 28 p.
10. Belaam-Kort I., Mansour R., Attia S., Boulahia Kheder S. Thrips (Thysanoptera: Thripidae) in northern Tunisian citrus orchards: population density, damage and insecticide trial for sustainable pest management // *Phytoparasitica*. 2021. V. 49. Iss. 4. P. 527–538.
11. Rodriguez-Garcia I., Silva-Espinoza B.A., Ortega-Ramirez L.A., Leyva J.M., Siddiqui M.W., Cruz-Valenzuela M.R., Gonzalez-Aguilar G.A., Ayala-Zavala J.F. Oregano essential oil as an antimicrobial and antioxidant additive in food products // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2016. V. 56. Iss. 10. P. 1717–1727.
12. Sakkas H., Papadopoulou C. Antimicrobial activity of basil, oregano, and thyme essential oils // *J. Microbiol. Biotechnol.* 2017. V. 27. № 3. P. 429–438.
13. Hou H., Zhang X., Zhao T., Zhou L. Effects of *Origanum vulgare* essential oil and its two main components, carvacrol and, thymol, on the plant pathogen *Botrytis cinerea* // *Peer J.V.* 8. Iss. 2 Art. e96262018.
14. Zamuner C.F.C., Marin V.R., Dilarrri G., Hypolito G.B., Sass D.C., Ferreira H. Oregano essential oil and its main components Thymol and Carvacrol as alternatives to control citrus canker // *Front. Agron.* 2023. V. 5. Art. 1148969.
15. Stepanycheva E., Petrova M., Chermenskaya T., Pavela R. Fumigant effect of essential oils on mortality and fertility of thrips *Frankliniella occidentalis* Perg // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. V. 26. Iss. 30. P. 30885–30892.
16. Srinivasan M.R. Probit analysis // *Electronic manual on pesticides and environment* / Eds. Palaniswamy S., Kuttalam S., Chandrasekaran S., Kennedy J.S. and Srinivasan M.R. Department of Agricultural Entomology, TNAU, 2004.
17. Badi H.N., Abdollahi M., Mehrafarin A., Ghorbanpour M., Tolyat M., Qaderi A., Ghiaci Yekta M. An overview on two valuable natural and bioactive compounds, thymol and carvacrol, in medicinal plants // *J. Med. Plants*. 2017. V. 16. № 63. P. 1–32.
18. Pandey S.K., Upadhyay S., Tripathi A.K. Insecticidal and repellent activities of thymol from the essential oil of *Trachyspermum ammi* (Linn) Sprague seeds against *Anopheles stephensi* // *Parasitol. Res.* 2009. V. 105. Iss. 2. P. 507–512.

19. Lu X., Weng H., Li C., He J., Zhang X., Ma Z. Efficacy of essential oil from *Mosla chinensis* Maxim. cv. Ji-angxiangru and its three main components against insect pests // Ind. Crops Prod. 2020. V. 147. Art. 112237.
20. Nikolova M., Yovkova M., Yankova-Tsvetkova E., Traikova B., Stefanova T., Aneva I., Berkov S. Biocidal activity of *Origanum vulgare* subsp. Hirtum essential oil // Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun. 2021. V. 69. Iss. 5. P. 569–578.
21. Dunan L., Malanga T., Bearez P., Benhamou S., Monticelli L.S., Desneux N., Michel T., Lavoie A.-V. Biopesticide evaluation from lab to greenhouse scale of essential oils used against *Macrosiphum euphorbiae* // Agriculture. 2021. V. 11. Iss. 9. Art. 867.
22. De Oliveira J.L., Ramos Campos E.V., Bakshi M., Abhilash P.C., Franceto L.F. Application of nanotechnology for the encapsulation of botanical insecticides for sustainable agriculture: prospects and promises // Biotechnol. Adv. 2014. V. 32. Iss. 8. P. 1550–1561.
23. Isman M.B. Bioinsecticides based on plant essential oils: a short overview // Z. Naturforsch. 2020b. V. 75. Iss. 7–8. P. 179–182.

Possibility of Combined Use of Thymol and Carvacrol to Control the Number of Peach Aphids *Myzus persicae* (Sulzer, 1776)

E. A. Stepanycheva^{a, #}, M. O. Petrova^a, T. D. Chermenskaya^a

^aAll-Russian Institute of Plant Protection,
shosse Podbelskogo 3, St. Petersburg–Pushkin 196608, Russia

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

The wide range of biological activity of essential oils in relation to pests gives reason to consider them as additional plant protection products and in other measures aimed at reducing the number of harmful arthropods. This paper presents the results of a study of the biological activity of a mixture of thymol and carvacrol, which are part of the essential oils of many plants, including oregano *Origanum vulgare* L. for the peach aphid *Myzus persicae*. The use of essential oil and a mixture of its components as fumigants has demonstrated their high aphidocidal potential. When processing the leaves of a forage plant (beans), the ability of a mixture of thymol and carvacrol to reduce the viability of female aphids and the number of offspring was established, and on vegetative plants (pepper) to negatively affect the survival of individuals of the daughter generation in the preimaginal period. The short duration of action allows the use of oils and individual components in conjunction with biological control agents and pollinators, and assumes a slight or complete absence of residues in food products. Preparations based on essential oils of plants can be used immediately before harvesting, due to the minimum waiting period.

Keywords: *Origanum vulgare* essential oil, fumigation, contact-intestinal action, ulation control.

УДК 631.526.32:631.81:633.1

ВЛИЯНИЕ СОРТА НА ПОТРЕБЛЕНИЕ И ВЫНОС ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ЗЕРНОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ

© 2024 г. С. А. Шафран^{1,*}, С. Б. Виноградова¹

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

*E-mail: shafran38@mail.ru

Представлены результаты полевых опытов, в которых изучали влияние сортовых особенностей зерновых культур различных периодов селекции на эффективность применения под них минеральных удобрений на различных почвах. Особое внимание уделяли удельному выносу элементов питания, что означает потребление азота, фосфора и калия 1 т урожая зерна с соответствующим количеством соломы. Результаты экспериментов показали, что изученные сорта по-разному отзывались на внесение удобрений. Практически все современные сорта обеспечивали получение более высоких урожаев по сравнению с ранее районированными. Сорт озимой пшеницы Мироновская 808 на дерново-подзолистой почве почти в 2 раза уступал сорту Московская 39 и в 1.7 раза на выщелоченных черноземах сорту Львовская 4 при внесении одинаковой дозы NPK. Аналогичные данные получены также для ярового ячменя сорта Московский 121 и сортов НУР и Эльф на дерново-подзолистых почвах, где при внесении N60P60K60 получен урожай 2.7 т/га в первом случае и 4.9 и 4.7 – во втором. Идентичные результаты отмечены также на черноземах выщелоченных и светло-каштановых почвах. В опытах с яровой пшеницей результат был таким же, но урожайность этой культуры оказалась меньше по сравнению с озимой пшеницей и яровым ячменем. Сорта изученных зерновых культур в меньшей степени реагировали на изменение удельного выноса питательных веществ, и полученные данные не отображали достаточно четкой закономерности, что вызывает необходимость продолжения исследований в этом направлении.

Ключевые слова: зерновые культуры, сорта, урожайность, вынос питательных веществ.

DOI: 10.31857/S0002188124070062, **EDN:** CFXRFX

ВВЕДЕНИЕ

Среди множества методов определения доз минеральных удобрений под сельскохозяйственные культуры в отечественной агрохимии, одним из перспективных является расчет по коэффициентам возмещения выноса питательных веществ намеченным урожаем. Коэффициент возмещения выноса представляет собой соотношение величины дозы внесенного удобрения к его выносу урожаем. Достоинство данного метода состоит в том, что он позволяет оптимизировать питание растений в зависимости от потребности в питательных веществах и их наличия в пахотном слое почвы.

В ЦИНАО были разработаны нормативы выноса питательных веществ сельскохозяйственными культурами в расчете на 1 т урожая. В выполнении данной работы принимали участие соисполнители, которые проводили полевые опыты в регионах страны в отраслевых и зональных институтах, учреждениях агрохимической службы, Госсортсети,

областных опытных станциях и сельскохозяйственных учебных заведениях [1].

Нормативы выноса были предназначены для определения потребности в минеральных удобрениях балансовым методом и определения баланса азота, фосфора и калия в земледелии на уровне экономических районов, природно-сельскохозяйственных зон, областей, краев и автономных республик. Использование этих нормативов дало возможность установить закономерности изменения содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах в зависимости от степени выноса их урожаями сельскохозяйственных культур. Параллельно выполняли исследования по выявлению связи между балансом и изменением содержания питательных веществ в почвах, были разработаны дозы удобрений, обеспечивающие увеличение содержания подвижных форм фосфора и калия на 10 мг/кг или 1 мг/100 г почвы и нормы убыли этих питательных веществ из почвы при превышении их выноса над внесением. Предложены методы

расчета для обоих случаев и составлен прогноз содержания подвижных форм фосфора и калия для области Центрального района [2]. Апробация методики дала положительный результат, поскольку прогнозируемые и фактические данные оказались близкими по величине [3].

Вместе с тем следует иметь в виду, что разработанные нормативы выноса элементов питания охватывают период прошлого столетия, когда возделывали иные сорта сельскохозяйственных культур и была другая технология их выращивания. В научной литературе уже имеются данные, которые свидетельствуют о том, что новые сорта лучше отзываются на дозы минеральных удобрений и уровень почвенного плодородия, что способствует формированию более высоких урожаев [4]. Однако практически нет данных о том, как это отражается на выносе питательных веществ в расчете на 1 т урожая основной и побочной продукции, как это было в упомянутых нормативах.

В связи с этим, цель работы – установить влияние сортовых особенностей зерновых культур различного периода селекции и районирования на вынос питательных веществ единицей урожая.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на базе полевых опытов, проведенных сотрудниками и аспирантами института, а также в ряде случаев на основе данных, опубликованных в работах прошлого периода [5–9]. В основу установления нормативов взяты методы ЦИНАО. Изучение влияния сорта проводили на различных типах почв с основными зерновыми культурами: озимой и яровой пшеницей, яровым ячменем, при этом сравнивали результаты экспериментов, проведенных с современными сортами и с теми, которые были районированы ранее. Для этого были использованы ранее опубликованные работы или отчетные карточки опытов, которые были проведены агрохимической службой в XX веке.

Подобными исследованиями был охвачен достаточно широкий спектр почвенных разновидностей, в который входили дерново-подзолистые и серые лесные почвы, различные типы черноземов и каштановые почвы. При этом представилась возможность учесть наибольшее количество научной информации, полученной в опытах, проведенных в Нечерноземной зоне [10–13].

Для сравнения научных данных, полученных в различные периоды исследований, использовали информацию опытов, которые были проведены в течение 3-х лет и более на одном и том же типе почв по идентичным программам. В ряде случаев были использованы отчетные карточки опытов агрохимической службы, содержащих нужную

информацию. Вынос элементов питания в вариантах опытов в расчете на 1 т основной (зерна) и побочной (соломы) продукции определяли по методике ЦИНАО [1], коэффициенты возмещения выноса питательных веществ – по методике ВНИИА [1], согласно которой они представляют собой соотношение количества внесенных удобрений к их выносу урожаем, и рассчитывали по формуле:

$$K_v = DФ / ВФ,$$

где ДФ – внесенная доза удобрения, кг/га, ВФ – вынос питательного вещества полученным урожаем основной и побочной продукцией, кг/га.

Исследованиями был охвачен период интенсивной химизации в сельском хозяйстве, начиная от начала 1970-х и заканчивая 1980-ми гг. прошлого столетия. Полученные в этот период данные сопоставляли с результатами исследований, которые были получены после 2000 г. При выборе сорта для исследования предпочтение оказывали тем сортам, которые доминировали в условиях производства. К ним относится, например, озимая пшеница Мироновская 808, которую длительное время возделывали во многих регионах нашей страны. Это, наряду с увеличением количества примененных удобрений, позволило за короткое время значительно повысить урожайность зерновых культур в Европейской части страны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали, что сорта зерновых культур по-разному реагировали на внесение удобрений, и их применение способствовало значительному приросту урожая. В опыте на дерново-подзолистых почвах сравнивали эффективность различных сочетаний минеральных удобрений на урожайность 2-х сортов озимой пшеницы ППГ 186 и Мироновской 808. Полученные данные свидетельствовали о том, что при одних и тех же условиях Мироновская 808 превосходила намного сорт ППГ 186 по продуктивности (табл. 1).

Однако на выносе питательных веществ в расчете на 1 т урожая разница между сортами отразилась в меньшей степени. Вынос фосфора и калия отличался между обоими сортами.

Сорта более поздней селекции обеспечили получение более высокой урожайности озимой пшеницы, по которым получена двойная прибавка урожая как в контрольных вариантах, так и вариантах с внесением удобрений. При этом удельный вынос азота и калия заметно превосходил сорта более ранней селекции, а фосфора – только сортом Московская 56.

Аналогичные результаты были получены в опытах, проведенных на серых лесных почвах (табл. 2).

Таблица 1. Урожайность и вынос питательных веществ сортами озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах

Вариант	Урожайность, ц/га	Вынос 1 т зерна с учетом соломы, кг		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт ППГ 186 (среднее за 1960–1967 гг.)				
Без удобрений	7.2	22.6	7.6	17.0
Известь 2.0 т	9.2	20.9	7.2	16.3
N60P60	21.7	21.1	8.1	13.8
N60K60	12.2	26.3	8.2	19.7
P60K60	20.0	17.8	7.4	14.8
N60P60K60	21.7	21.4	6.9	14.4
Сорт Мироновская 808 (среднее за 1965–1968 гг.)				
Без удобрений	10.4	19.2	8.5	14.6
Известь 2.0 т	11.9	21.4	8.4	14.3
N60P60	22.9	21.6	8.3	13.1
N60K60	15.0	21.3	8.2	15.2
P60K60	22.0	18.9	8.8	13.9
N60P60K60	26.0	22.7	8.1	15.1
Сорт Московская 39 (среднее за 2017–2019 гг.)				
Без удобрений	21.8	26.3	8.3	20.6
N120K90	35.8	26.9	9.0	19.5
N120P60K90	50.2	26.7	9.3	18.5
N120P60K90 + Zn	55.0	26.1	9.4	17.5
Сорт Московская 56 (среднем за 2017–2019 гг.)				
Без удобрений	27.7	30.6	11.7	23.8
Навоз 50 т/га	36.1	27.6	11.4	23.7
Навоз + N80P30K30	48.1	30.9	11.1	25.1
ОМУ + N50	43.6	32.5	10.6	21.5

В опыте агрохимической службы эффективность удобрений, внесенных под сорт Мироновская 808 обеспечили получение достаточно высокой прибавки урожая на известкованной и известкованной почве. Максимальная урожайность составила 37.4 ц/га. Наиболее высокий сбор зерна сорта Московская 39 (34.8 ц/га) отмечен при внесении N30, в контроле – 23.4 ц/га, т.е. значительно больше по сравнению с сортом Мироновская 808.

Вместе с тем следует отметить, что удельный вынос элементов питания несколько отличался от данных, полученных в опытах на дерново-подзолистых почвах. Вынос азота и калия сортом Московская 39 оказался несколько меньше, чем Мироновский 808, фосфора – превышал.

В опытах, проведенных на типичных черноземах, сравнивали эффективность применения минеральных удобрений под озимую пшеницу современного сорта Льговская 4 со старым сортом Мироновская 808. Результаты исследования показали, что пшеница сорта Льговская 4 лучше отзывалась

на внесение удобрений. Прибавка урожайности в зависимости от варианта составила 7.5–11.3 ц/га, тогда как прирост урожая сорта Мироновская 808 достигал только 1.9–3.9 ц/га (табл. 3, 4).

Сорт Льговская 4 имел также преимущество в варианте без удобрений, его урожайность составила 3.7 т/га, что на 1.4 т/га больше, чем даже в удобренных вариантах выращивания сорта Мироновская 808.

Действие фосфорных удобрений на растения обоих сортов оказалось невысоким, поскольку содержание подвижного фосфора в черноземах и каштановых почвах относилось к категории повышеннообеспеченных и высокообеспеченных, где, по данным ВНИИА, эффект от внесения фосфора приближался к нулевой отметке [14]. Малоэффективно было также внесение калийных удобрений под оба сорта озимой пшеницы, т.к. степень обеспеченности почвы опытных участков подвижным калием была достаточно высокой.

Таблица 2. Урожайность и вынос питательных веществ сортами озимой пшеницы на серых лесных почвах

Вариант	Урожайность, ц/га	Вынос 1 т зерна с учетом соломы, кг		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Мироновская 808 (среднее за 1971–1979 гг.)				
Без извести				
Без удобрений	9.7	31.4	9.4	16.7
Навоз 60 т/га	11.5	26.7	9.7	15.1
Навоз + N45P45K45	18.2	29.2	9.1	13.4
Навоз + N90P90K90	21.9	32.7	9.2	15.0
Навоз + N120P120K120	24.9	31.8	9.7	16.9
Известь 6 т/га				
Без удобрений	13.1	29.4	7.0	15.9
Навоз 60 т/га	15.7	27.1	8.6	13.5
Навоз + N45P45K45	20.8	31.2	9.2	18.2
Навоз + N90P90K90	23.8	30.9	10.4	16.6
Навоз + N120P120K120	27.4	32.8	10.5	18.3
Сорт Московская 39 (среднее за 2017–2019 гг.)				
Без удобрений	23.4	26.3	11.4	12.1
БДП500 + Б2П501	28.0	25.9	11.0	10.8
БДП + экстрасол	26.4	25.7	12.0	13.2
N30 (N _м)	34.8	25.8	10.5	10.8
N30 (N _{аа})	34.6	27.0	11.4	12.3
Бисолбисан	31.5	27.9	12.4	13.0
Альбит	28.4	27.7	12.5	13.4
V417	28.7	27.3	11.8	12.3
ОМУ	28.1	28.4	11.6	12.5

Таблица 3. Урожайность и вынос питательных веществ урожаями различных сортов озимой пшеницы на черноземах типичных

Вариант	Урожайность, т/га	Вынос, кг/т		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Мироновская 808 (среднее за 1982—1984 гг.)				
Без удобрений	2.3	29.0	9.7	21.5
P60K60	2.7	26.9	10.0	21.0
N60P60K60	2.9	27.8	9.9	21.8
N90P60K60	3.0	29.1	9.8	22.0
N120P60K60	3.0	29.0	9.6	21.4
N60K60	2.8	26.8	9.6	21.3
N60P90K60	2.9	28.7	9.6	19.8
N60P60	3.0	25.6	9.1	21.3
N60P60K90	3.5	25.9	9.7	19.6
N60P60K120	3.3	28.7	9.6	20.1
Сорт Льговская 4 (средне за 2016—2018 гг.)				
Без удобрений	3.7	21.9	6.6	9.6
P60K60	3.9	21.8	7.5	5.6
N60P60K60	4.9	24.6	8.6	5.2

Таблица 3. Окончание

Вариант	Урожайность, т/га	Вынос, кг/т		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N90P60K60	4.7	20.9	8.1	4.2
N120P60K60	5.0	28.2	7.7	5.6
N60K60	5.1	22.0	8.4	8.3
N60P30K60	5.2	28.2	8.0	10.5
N60P90K60	4.5	17.1	7.9	9.0
N60P60	4.6	20.7	8.6	8.6
N60P60K30	4.6	21.0	7.3	9.1
N60P60K90	4.5	24.2	7.4	9.8
N60P60K120	4.5	24.5	7.3	13.5

Таблица 4. Урожайность и вынос питательных веществ сортами озимой пшеницы на каштановых почвах

Вариант	Урожайность, ц/га	Вынос урожая зерна с учетом соломы, кг/т		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Донская остистая (среднее за 1988–1990 гг.)				
Без удобрений	17.8	33.7	8.1	28.1
P30	19.2	35.9	9.2	27.4
P60	19.6	34.4	9.3	25.8
P90	20.3	34.9	9.5	26.7
N30	18.0	36.1	9.1	28.3
N30P30	18.9	35.0	9.0	28.3
N30P90	19.5	35.4	9.5	28.2
N30P60	20.0	36.3	9.4	29.5
N60P60	19.6	35.7	9.2	33.9
N30P60K30	21.4			

Все это нашло соответствующее отражение в потреблении и выносе питательных веществ урожаями обоих сортов озимой пшеницы. Согласно полученным данным, удельный вынос азота сортом Мироновская 808 в среднем значительно превосходил сорт Льговская 4. Аналогичные результаты отмечены также для выноса фосфора и калия 1 т урожая. При этом наиболее существенный эта разницы была по содержанию K₂O (табл. 3).

Следует также отметить, что сорт Льговская 4 несколько лучше реагировал на увеличение доз калия, способствуя возрастанию его выноса с 42 до 61 кг/га, тогда как изменений потребления калия сортом Мироновская 808 не отмечено. Аналогичные данные получены также и для удельного выноса K₂O.

Данные, полученные в опытах с яровым ячменем, свидетельствовали также о том, что урожайность современных сортов превосходила сбор зерна сортов более раннего периода селекции.

Это проявилось на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, черноземах выщелоченных и на светло-каштановых почвах (табл. 5–7).

Например, на дерново-подзолистой почве урожайность сорта Московский 121 в контрольном варианте составила 1.3 т/га, сорта НУР – 2.5 т/га. Внесение под них минеральных удобрений обеспечило увеличение урожая в обоих случаях в 2 раза, но при этом прибавка, полученная с использованием современными сортами, также в 2 раза превосходила аналогичные показатели сорта Московский 121, а урожайность сортов Московского 2, НУРа и Эльфа значительно ее превышала.

Вынос элементов питания 1 т урожая увеличивался за счет внесения азотных удобрений. Вместе с тем это увеличение в меньшей степени касалось сорта Московский 121, поскольку дозы азота в данном случае составили 50–90 кг N/га, а под современные сорта варьировали от 60 до 150 кг N/га, что повлекло за собой увеличение удельного выноса

Таблица 5. Урожайность и вынос питательных веществ сортами ярового ячменя на дерново-подзолистых почвах

Вариант	Урожайность, т/га	Вынос 1 т зерна с учетом соломы, кг		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Московский 121 (среднее за 1970—1972 гг.)				
Без удобрений	1.3	23.8	10.3	23.6
N60P60K60 ФМ	2.1	25.2	9.5	21.8
N60P60K60 НФК	2.1	23.3	9.0	20.2
N60P60K60 смесь	2.3	23.2	9.4	20.5
N60P60K60 смесь	2.0	25.6	9.1	21.1
N60P60K60 смесь	2.2	29.3	9.7	20.7
Сорт Московский 121 (среднее за 1974—1976 гг.)				
Без удобрений	2.3	18.3	5.3	6.8
N60P60	2.4	24.2	6.0	7.3
N60K60	2.4	25.3	6.0	10.3
P60K60	2.7	21.9	7.0	10.1
N60P60K60	2.7	21.6	6.1	9.4
N50P60K60	2.5	25.4	6.7	9.7
N90P30K60	2.1	30.8	7.1	17.3
N60P30K60	2.1	28.5	6.5	11.2
N90P90K60	2.1	27.8	7.5	11.9
N90P60K60	2.1	27.9	7.2	12.5
N60P60K30	2.5	26.5	6.8	12.4
N60P60K90	2.2	28.5	7.9	10.5
Сорт Московский 2 (среднее за 2015—2017 гг.)				
Без удобрений	2.2	21.4	13.4	16.5
N60P80K60	3.4	22.3	15.2	19.3
N90P80K60	4.6	25.8	14.8	19.5
N120P120K120	4.9	33.5	15.0	28.4
N150P150K150	4.9	43.5	17.7	31.2
Сорт НУР (среднее за 2015—2017 гг.)				
Без удобрений	2.9	17.9	10.5	10.1
N60P80K60	4.1	20.0	10.6	14.3
N90P90K60	4.9	22.7	12.2	14.8
N120P120K120	6.0	29.5	13.3	22.2
N150P150K150	6.2	31.6	15.2	22.6
Сорт Эльф (среднее за 2016—2018 гг.)				
Без удобрений	2.8	18.6	10.5	13.4
N60P80K60	3.9	21.0	11.1	15.7
N90P80K60	4.7	24.0	11.6	16.5
N120P120K120	6.2	27.3	13.3	23.1
N120P120K150	6.4	34.5	13.4	24.4

Таблица 6. Урожайность и вынос питательных веществ сортами ярового ячменя на выщелоченных черноземах

Вариант	Урожайность, т/га	Вынос 1 т зерна с учетом соломы, кг		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Вальтички (средне за 1974–1977 гг.)				
Без удобрений	2.1	20.5	9.0	15.2
P65K60 (фон 1)	2.3	20.9	9.1	15.7
Фон 1 + N35	2.5	20.8	8.4	15.6
Фон 1 + N65	2.5	21.6	8.8	16.0
Фон 1 + N95	2.6	21.2	8.8	16.2
N65K60 (фон 2)	2.3	20.4	9.1	14.8
Фон 2 + P35	2.3	21.7	9.1	16.5
Фон 2 + P65	2.4	21.7	9.2	15.4
Фон 2 + P80	2.7	22.6	8.9	15.6
N65P65 (фон 3)	2.3	20.9	9.1	15.6
Фон 3 + K30	2.3	20.0	9.1	16.1
Фон 3 + K60	2.4	21.3	8.3	15.8
Фон 3 + K90	2.5	21.6	9.2	19.2
Сорт Дворан (среднее за 1976–1978 гг.)				
Без удобрений	2.3	20.4	10.4	16.1
P90K83 (фон 1)	2.5	21.6	10.8	16.8
Фон 1 + N30	2.7	20.7	10.4	17.4
Фон 1 + N60	2.8	22.1	10.7	16.8
Фон 1 + N90	2.9	22.0	10.7	18.6
N90K90 (фон 2)	2.6	21.1	10.8	16.2
Фон 2 + P30	2.7	21.9	10.0	16.7
Фон 2 + P60	2.8	22.5	10.7	16.8
Фон 2 + P90	2.8	22.5	11.1	18.6
N90P60 (фон 3)	2.7	21.5	10.3	16.7
Фон 3 + K30	2.7	22.6	10.7	16.7
Фон 3 + K60	2.8	22.1	11.1	17.1
Фон 3 + K90	2.9	22.8	10.3	17.2
Сорт Саншайн (среднее за 2015–2017 гг.)				
Без удобрений	2.3	20.0	13.0	17.4
P60K60 (фон 1)	3.7	19.5	12.2	16.8
Фон 1 + N30	4.1	19.0	11.7	17.1
Фон 1 + N60	4.2	20.5	12.1	19.8
Фон 1 + N90	4.7	21.7	12.3	20.2
Фон 1 + N120	4.5	25.3	13.1	24.6
N60K60 (фон 2)	4.0	20.5	11.5	18.5
Фон 2 + P30	4.6	20.4	11.7	19.8
Фон 2 + P60	4.2	20.4	12.1	19.8
Фон 2 + P90	4.6	22.0	12.0	18.7
Фон 2 + P120	4.6	24.8	12.2	19.1
N60P60 (фон 3)	3.7	21.1	13.2	18.1
Фон 3 + K30	4.3	20.5	11.9	18.6
Фон 3 + K60	4.2	20.5	12.1	19.8
Фон 3 + K90	4.4	20.7	11.8	18.4
Фон 3 + K120	5.1	20.6	11.4	19.2

Таблица 7. Урожайность и вынос питательных веществ ячменем яровым на светло-каштановых почвах

Вариант	Урожайность, т/га	Вынос, кг/т		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Простор (среднее за 1988–1990 гг.)				
Без удобрений	2.4	21.6	9.9	26.1
P10	2.5	21.0	9.8	25.5
N30	2.9	23.3	9.2	30.3
P60	2.5	21.3	11.1	26.4
N30P60	2.3	24.1	9.8	29.7
N30P90	2.4	25.0	10.4	31.7
N30P60K30	2.4	24.6	10.9	32.5
Сорт Одесский 111 (среднее за 1984–1987 гг.)				
Без удобрений	1.5	25.9	9.2	18.5
P30	1.6	25.6	8.8	18.4
P60	1.7	24.3	9.0	19.3
P90	1.8	28.7	9.9	22.6
N30	1.7	26.3	8.2	21.0
N30P30	1.7	27.6	9.3	22.3
N30P90	1.7	28.1	9.2	23.5
N60P60	1.8	30.4	9.2	23.2
N30P60K30	1.7	26.1	8.5	23.0
Сорт Странник (среднее за 2016–2020 гг.)				
Без удобрений	2.7	23.8	8.2	14.3
N30	3.2	24.8	8.2	11.9
N30P30	3.2	23.8	8.8	12.5
N30P60	3.2	23.9	8.7	12.8
P30	2.9	24.8	8.6	13.0
N60P30	3.3	24.2	8.3	12.8
N60	3.2	25.4	8.2	15.4
N60P60	3.3	25.0	8.3	13.8
P60	3.0	24.8	9.2	13.8

этого элемента в 1.5–2.0 раза и составило 31.6–43.5 кг N/т.

В определенной мере увеличение доз фосфорных и калийных способствовало увеличению выноса 1 т продукции фосфора в 1.3–1.4 раза, калия – в 1.8–2.2 раза.

На выщелоченных черноземах прибавка урожая от применения минеральных удобрений под более ранние сорта Вальтички и Дворан были невысокими, а урожайность в контроле составила 2.1–2.3 т/га, включая и районированный сорт Саншайн (табл. 7). Однако при этом сорт Саншайн лучше реагировал на внесение минеральных удобрений, что позволило получить в вариантах с внесением NPK по 4.5–5.1 т зерна ячменя/га. При этом наибольший прирост урожайности отмечали в вариантах с азотными удобрениями. Применение минеральных удобрений мало отразилось

на величине удельного выноса питательных веществ, если не считать некоторого увеличения выноса P₂O₅ сортом Саншайн в отдельных вариантах.

Сравнение этих данных с нормативами выноса элементов питания показало, что вынос азота оказался на 2 кг меньше нормативного, фосфора – больше на 2.1 кг, калия – таким же [1].

Результаты опытов, проведенных в засушливых условиях на светло-каштановых почвах республики Калмыкия, свидетельствовали о том, что установленная закономерность в этом случае также сохранилась, но лишь с той разницей, что действие минеральных удобрений проявилось в меньшей степени по сравнению с описанными ранее. С одной стороны, это можно объяснить погодными условиями, с другой – меньшими дозами удобрений [15, 16].

Тем не менее, разница в урожайности изученных сортов ячменя оказалась достаточно

ощутимой, особенно в вариантах, где были применены минеральные удобрения. Например, в варианте с внесением N30 прибавка урожайности сортов Простор и Одесский 11 составила 0.3 т/га, тогда как сорта Странник – 0.5 т/га, общая урожайность соответственно 2.0 и 2.7 т/га (табл. 7).

Вынос азота в расчете на 1 т ячменя во всех опытах имел тенденцию к увеличению в вариантах с применением удобрений, но несмотря на это полученные величины не превышали норматив для сухостепной зоны Поволжья за исключением отдельных показателей (табл. 7). Вынос фосфора сортами Простор и Одесский 11 в большинстве вариантов несколько превышал норматив, тогда как вынос P₂O₅ сортом Странник оказался немного меньше нормативного, исключая вариант Р60.

Вынос калия заметно отличался между испытанными сортами ячменя. Наибольшее количество этого питательного элемента выносил сорт Простор, оно варьировало от 25.5 до 32.5 кг/т, значительно больше норматива (21.7 кг/т). Вынос K₂O сортом Странник менялся в пределах 11.9–15.4 кг/т, что было намного меньше нормативного показателя [1].

В отечественной агрохимической литературе имеется много сведений о выносе питательных

веществ урожаями сельскохозяйственных культур. Немалое внимание при этом обращали на вынос элементов питания яровой пшеницей, т.к. ее возделывали и сейчас возделывают на большей территории страны [17–19]. Существует ряд работ прошлого столетия обобщающего характера, в которых рассматривали изменения выноса питательных веществ в зависимости от почвенно-климатических условий и удобрений [20]. Эти данные свидетельствовали о том, что в пределах Европейской территории России установлена определенная закономерность увеличения выноса азота яровой пшеницей при перемещении от дерново-подзолистых почв к лесостепной, степной и сухостепной зонам. При этом удельный вынос этого питательного элемента возрастал как в вариантах без удобрений, так и с их внесением (табл. 8), т.е. с продвижением с севера на юг увеличивался вынос азота зерном яровой пшеницы при адекватном снижении прибавки урожая от азотных удобрений.

Результаты наших исследований на дерново-подзолистых почвах показали, что вынос азота сортом Ладе изменился незначительно под действием удобрений, тогда как у сортов Маргарита и Любава наблюдался определенный прирост выноса не только данного элемента, но также фосфора и калия (табл. 9). Урожайность при этом

Таблица 8. Вынос азота яровой пшеницей на почвах Европейской территории России, кг/т зерна с соответствующим количеством соломы [20]

Почвы	Без удобрений	NPK
Дерново-подзолистые	2.55	3.04
Выщелоченные черноземы	3.21	3.82
Обыкновенные и южные черноземы	3.93	4.02
Каштановые	4.36	5.06

Таблица 9. Урожайность и вынос питательных веществ сортами яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах

Вариант	Урожайность, т/га	Вынос 1 т зерна с учетом соломы, кг/т		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Ладе (среднее за 1976—1978 гг.)				
Без удобрений	0.9	30.1	3.6	18.2
P80K60	1.0	31.5	4.6	21.3
N60P60K60	1.1	31.7	4.2	20.2
Сорт Маргарита (среднем за 2016—2018 гг.)				
Без удобрений	1.6	24.7	5.3	24.3
N120P90K90	2.4	28.8	5.7	25.8
N120P90K90 + Se60	2.6	34.4	6.4	32.7
Сорт Любава (среднем за 2018—2020 гг.)				
Без удобрений	1.7	31.8	9.0	22.4
N60	2.0	35.6	8.8	21.4
N90	2.4	33.7	8.9	21.5
N120	2.6	33.2	8.5	22.2

Таблица 10. Урожайность и вынос питательных веществ сортами яровой пшеницы на серых лесных почвах

Вариант	Урожайность, т/га	Вынос 1 т зерна с учетом соломы, кг		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Сорт Скала (среднем за 1977–1980 гг.)				
Без удобрений	1.9	28.7	6.0	20.4
P60K60	1.9	27.5	6.6	20.2
N60K60	2.2	31.8	6.6	20.8
N60K60	2.1	30.3	6.4	20.1
N60P60K60	2.4	30.0	6.0	19.9
Сорт Симбирцит (среднее за 2015–2017 гг.)				
Без удобрений	2.6	27.5	2.7	12.4
P60K60 (фон 1)	3.1	26.3	2.8	12.9
Фон 1 + N30	3.1	26.6	3.0	16.9
Фон 1 + N60	3.5	30.2	3.2	14.5
Фон 1 + N90	3.6	30.2	3.2	16.5
Фон 1 + N120	3.7	32.2	3.1	14.6
Сорт Экада (среднее за 2016, 2018–2019 гг.)				
Без удобрений	2.2	33.7	7.2	20.8
N120P90K90	3.0	41.4	8.0	33.0
N120P90K90 + Se60	3.2	42.6	7.8	26.8

существенно возрастала в контроле и при внесении удобрений.

В опытах на серых лесных почвах получены аналогичные данные, но при этом урожайность яровой пшеницы в данном случае намного превышала таковую, полученную на дерново-подзолистых почвах. Это относится ко всем вариантам (табл. 10).

Вынос азота сортами Скала и Экада различался незначительно, а сортом Симбирцит превышал их показатель. Вынос фосфора заметно различался между сортами и вынос элемента сортом Экада превышал остальные, причем сорт Симбирцит — в 2 раза. Величиной выноса калия также выделялся сорт Симбирцит, у которого содержание K₂O в 1 т зерна с учетом соломы в 1.5 раза было меньше, чем у сортов Скала и Экада, а также среднероссийского норматива — 20.1 кг/т [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования свидетельствовали о том, что сортовые особенности зерновых культур оказывают большое влияние на урожайность. Это касается всех культур, с которыми были проведены соответствующие наблюдения. Вместе с тем следует отметить, что сортовые особенности этих культур оказывают меньшее воздействие на удельный вынос питательных веществ. Наибольшее существенное влияние на этот процесс оказывают азотные удобрения, т.к. в большинстве рассмотренных опытов отмечено увеличение

выноса азота вследствие внесения азотных удобрений зерном озимой пшеницы сортов Мироновская 808 и Московская 56, возделываемых на дерново-подзолистых почвах, сорта Льговская 4 — на типичных черноземах.

Все представленные сорта ярового ячменя в большей степени реагировали при внесении удобрений повышением выноса элементов питания на дерново-подзолистых почвах. Наиболее заметно такие изменения коснулись современных сортов [21]. В опытах на черноземах выщелоченных отмечено незначительное увеличение выноса при внесении азота в дозе N120 [7]. Похожая закономерность отмечена для сорта Странник на каштановой почве [15]. Значительным выносом азота выделялись сорта Маргарита, Симбирцит и Экада. Первый из них выращивали на дерново-подзолистой почве, второй и третий — на серых лесных почвах.

Вынос фосфора в меньшей степени изменялся под влиянием сорта, тем не менее наиболее заметное его увеличение отмечено у сорта Московская 56 на дерново-подзолистой почве и Льговская 39 на серой лесной почве. В то же время вынос P₂O₅ сортом Льговская 4 оказался меньше по сравнению с Мироновской 808 на типичном черноземе.

Современные сорта ярового ячменя характеризовались заметным увеличением удельного веса выноса азота по сравнению с ранее районированными сортами. Районированный в настоящее время сорт Саншайн заметно превосходил сорта

Вальтички и Дворан, которые возделывали в прошлом тысячелетии.

Удельное потребление калия также различалось между изученными сортами озимой пшеницы. Вынос K_2O сортами Московская 39 и Московская 56 существенно превосходил аналогичные показатели сортов ППГ 186 и Мироновская 808 на дерново-подзолистых почвах. На серых лесных почвах вынос калия сортом Московская 39 оказался меньше по сравнению с сортом Мироновская 808. Похожие данные получены также на типичных черноземах.

Вынос калия сортом ячменя Московский 121 в опыте в 1970–1972 гг. в 2 раза превышал показатели опытов более поздних лет. Вероятно, погодные условия могут оказать существенное влияние на потребление калия растениями. Современные сорта ячменя также различались по величине выноса калия. При этом отмечено, что вынос этого элемента всеми сортами возрастал при увеличении доз калийных удобрений. Между вариантами, в которых не вносили калий и с применением его наибольшей дозы в удобрениях разница в выносе элемента была двукратной. В опытах на выщелоченных черноземах применение калийного удобрения в меньшей степени способствовало увеличению удельного выноса калия. Наиболее заметно это проявилось на сорте Саншайн, районированном в настоящее время. На светло-каштановых почвах подобная закономерность проявилась у сортов Простор и Одесский 111 в вариантах, где удобрения были внесены в более высоких дозах.

Среди сортов яровой пшеницы по величине выноса калия выделялись сорта Маргарита и Экада, у которых вынос K_2O из почвы заметно возрастал при внесении калия и селена.

Таким образом, анализ представленного материала свидетельствовал о том, что сортовые особенности зерновых культур могут оказывать большое влияние на их урожайность и потребление питательных веществ, что вызывает необходимость продолжения исследований в данном направлении. Для более эффективного использования новых сортов нужна надежная нормативно-справочная база, привязанная к почвенно-агрохимическим условиям, которые оказывают влияние на потребление питательных веществ из почвы и удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормативы выноса элементов питания сельскохозяйственными культурами. М.: ЦИНАО, 1991. 65 с.
2. Шафран С.А. Прогнозирование обеспеченности подвижными формами фосфора и калия почв

Нечерноземной зоны // Агрохимия. 1997. № 5. С. 5–12.

3. Шафран С.А. Прогноз содержания фосфора и калия в почвах Центрального района Нечерноземной зоны // Агрохимия. 2006. № 9. С. 5–12.
4. Иванова О.М. Оценка влияния азотных удобрений на продуктивность сортов озимой пшеницы на типичном черноземе // Агрохим. вестн. 2012. № 5. С. 44–45.
5. Сорокин А.И. Удобрение озимой пшеницы в условиях Калмыцкой АССР // Агрохимия. 1987. № 9. С. 45–48.
6. Сорокин А.И. Влияние минеральных удобрений на питательный режим почвы под зерновыми культурами и урожай зерна // Бюл. научн.-техн. информ. Элиста: Калмыцкий НИИМС, 1989. Вып. 1. С. 40–47.
7. Бабунов А.Б. Сравнение эффективности применения минеральных удобрений на сортах ярового ячменя различных периодов селекции // Плодородие. 2017. № 4. С. 22–24.
8. Бабунов А.Б., Бадин А.Е. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество ярового ячменя Саншайн, а также вынос элементов питания // Достиж. науки и техн. АПК. 2018. Т. 32. № 8. С. 32–34.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10808>
9. Иванова О.М. Влияние азотных удобрений на урожайность и качество различных сортов озимой пшеницы на типичном черноземе Тамбовской области // Вестн. Мичуринск. ГАУ. Мичуринск-наукоград РФ. 2012. № 4. С. 49–54.
10. Волков А.В. Отзывчивость яровой пшеницы сорта Злата на применение цинковых удобрений в центральном Нечерноземье // Сб. докл. Молод. ученых, специалистов-агрохимиков и экологов на Международ. конф. “Агроэкологические основы применения удобрений в современном земледелии”. М.: ВНИИА, 2014. С. 44–48.
11. Аристархов А.Н., Бусыгин А.С., Яковлева Т.А. Эффективность применения различных способов и доз селеновых удобрений под яровую пшеницу в почвенно-климатических условиях Северо-Восточного Нечерноземья // Международ. сел.-хоз. журн. 2018. № 2. С. 38–44.
12. Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Влияние фосфорных и цинковых удобрений в зависимости от известкования дерново-подзолистой почвы на урожай и качество зерна озимой пшеницы // Агрохим. вестн. 2020. № 3. С. 41–45.
13. Кирпичников Н.А., Бижан С.П., Морачевская Е.В. Влияние фосфорных удобрений на качество зерна озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при известковании дерново-подзолистой почвы // Пробл. агрохим. и экол. 2019. № 3. С. 31–33.

14. *Шафран С.А.* Научные основы и современные методы определения доз применения минеральных удобрений. М.: ВНИИА, 2022. 236 с.
15. *Музраев В.Н.* Эффективность применения минеральных удобрений на посевах ярового ячменя в сухостепной зоне республики Калмыкия // Мат-лы 52-й Международ. научн. конф. молод. ученых, специалистов-агрохимиков и экологов, посвящ. 200-летию проф. Я.А. Линовского "Агроэкологические и экономические аспекты применения средств химизации в условиях биологизации и экологизации сельскохозяйственного производства". М., 2018. С. 140–142.
16. *Музраев В.Н., Сычев В.Г., Виноградова С.Б., Муравьева О.А.* Влияние агрометеорологических условий и удобрений на урожай ярового ячменя в сухостепной зоне Калмыкии // Агрохим. вестн. 2019. № 4. С. 39–43.
<https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10057>
17. *Семенова Е.А., Афанасьев Р.А.* Эффективность применения удобрений под яровую пшеницу в условиях Уральского региона // Плодородие. 2018. № 6 (105). С. 2–4.
18. *Нестеренко В.А., Лапушкин В.М.* Влияние обеспеченности почв подвижным фосфором и доз азотных удобрений на формирование урожая и качества яровой пшеницы // Агрохим. вестн. 2021. № 1. С. 38–42.
19. *Сычев В.Г., Мерзлая Г.Е., Волошин С.П., Панкратенкова И.В.* Биологическая активность почвы и урожайность яровой пшеницы при использовании органических и минеральных удобрений // Плодородие. 2016. № 6. С. 2–4.
20. *Петербургский А.В., Аникст Д.М.* Вынос питательных веществ зерновыми культурами в разных почвенно-климатических зонах // Агрохимия. 1973. № 2. С. 144–150.
21. *Тованчев И.В., Кирпичников Н.А.* Эффективность применения фосфорных удобрений в посевах ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Нур на дерново-подзолистой почве с различной степенью окультуренности // Пробл. агрохим. и экол. 2018. № 1. С. 34–37.

Effect of Variety on Nutrient Intake and Nutrient Removal by Cereals

S. A. Shafran^{a, #}, S. B. Vinogradova^a

^a *Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry,
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia*

[#] *E-mail: shafran38@mail.ru*

The results of field experiments are presented, in which the influence of varietal characteristics of grain crops of different breeding periods on the effectiveness of using mineral fertilizers for them on various soils was studied. Special attention was paid to the specific removal of nutrients, which means the consumption of nitrogen, phosphorus and potassium of 1 ton of grain harvest with an appropriate amount of straw. The results of the experiments showed that the studied varieties responded differently to the application of fertilizers. Almost all modern varieties provided higher yields compared to previously zoned ones. The Mironovskaya 808 winter wheat variety on sod-podzolic soil was almost 2 times inferior to the Moskovskaya 39 variety and 1.7 times inferior to the Lgovskaya 4 variety on leached chernozems when applying the same dose of NPK. Similar data were also obtained for spring barley of the Moskovsky 121 variety and NUR and Elf varieties on sod-podzolic soils, where when N60P60K60 was applied, a yield of 2.7 t/ha was obtained in the first case and 4.9 and 4.7 in the second. Identical results were also observed on leached chernozems and light chestnut soils. In experiments with spring wheat, the result was the same, but the yield of this crop was lower compared to winter wheat and spring barley. The varieties of the studied cereals reacted to a lesser extent to changes in the specific removal of nutrients, and the data obtained did not show a sufficiently clear pattern, which necessitates continued research in this direction.

Keywords: cereals, varieties, yield, nutrient removal.

УДК 581.132:631.433.53:631.417.1:631.445.24

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ И УГЛЕРОД СЕКВЕСТРИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛЕВЗЕИ САФЛОРОВИДНОЙ И НАКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2024 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, Г. П. Майсак¹, И. В. Казакова¹, О. В. Иванова¹¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
ул. Культуры, 12, с. Лобаново, Пермский край, 614532, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

По величине содержания пигментов фотосинтеза выявлен наиболее активный период поглощения фотосинтетически активной радиации листьями левзеи сафлоровидной в течение вегетации. С момента полного отрастания до цветения сумма хлорофиллов *a* и *b* в листьях составила 6.2–8.5 мг/г сухой массы, каротина — в 3–4 раза меньше. В процессе фотосинтеза содержание углерода в листьях левзеи сафлоровидной практически не менялось и составляло 39.5–42.5%. Массовая доля основного продукта фотосинтеза — сахаров увеличивалась от фазы отрастания до формирования семян с 4.0 до 11.8%. В период активного роста содержание азота в листьях левзеи составило 1.3–1.6, фосфора — 1.1–1.6, калия — 4.4–5.1%. После уборки левзеи сафлоровидной 14-го года жизни в дерново-подзолистой почве определили высокое количество ПКО — 13.7–17.3 т/га. Количество поглощенного в процессе фотосинтеза углерода составило 6.8–11.5 т/га (24.3–41.3 т CO₂/га) в зависимости от варианта опыта, для естественного фитоценоза этот показатель был равен 2.4 т C/га (или 8.6 т CO₂/га) за вегетационный период. Содержание органического углерода под левзеей сафлоровидной 14-го года жизни в слое 0–20 см почвы повысилось относительно исходного уровня на 3.6% в варианте без удобрений, на 15.1% — в варианте N60P60K60, в слое 20–40 см — на 8.8–42.6% соответственно. Относительно целинного аналога в слое 0–20 см содержание углерода было больше на 15.2–28.0, в слое 20–40 см — на 25.0–64.4% в зависимости от варианта опыта, что свидетельствовало о депонировании углерода в виде гумусовых веществ за счет его запасаения в более глубоких слоях почвы.

Ключевые слова: левзея сафлоровидная, фотосинтез, органический углерод, элементы минерального питания, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S0002188124070073, **EDN:** CFUKTU

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным природным способом секвестрации углерода является перевод атмосферного углекислого газа в органическое вещество растениями, то есть фотосинтез. В процессе фотосинтеза углерод превращается в сахара и включается в процессы жизнедеятельности растений. С увеличением фотосинтетической активности происходит наращивание новой биомассы, из атмосферы удаляются излишние объемы CO₂, повышается урожайность сельскохозяйственных культур, создаются условия для длительного запасаения (депонирования) углерода почвой. Уровень секвестрации углерода существенно зависит от фотосинтетической способности трав [1]. По данным [2], объемы секвестрации естественным травостоем варьируют в пределах 2.2–2.5 т/га/год. Примерно 40% территории суши покрыто травянистыми растениями — их роль в секвестрации углерода

чрезвычайно велика, в них содержится до 30% глобальных запасов почвенного углерода [3]. Для травянистой растительности и сельскохозяйственных культур продукционная эффективность хлорофилла составляет 300 кг C/кг хлорофилла/год [4, 5].

По данным [6], общая первичная продукция фотосинтеза — это весь углерод, поглощенный в процессе фотосинтеза. Чистая первичная продукция представляет весь углерод, ассимилированный растениями в течение периода вегетации за вычетом дыхания надземной массы растений, корней и микроорганизмов. Отношение общей первичной продукции к чистой первичной продукции равно 2 : 1, чистая первичная продукция фотосинтеза для посевов сельскохозяйственных культур в среднем на основании урожайных данных Росстата составляет 5.25 т C/га/год.

Известно, что многолетние травы имеют не только кормовое значение, но и способствуют

повышению плодородия почвы и увеличению урожая последующих за ними культур в севообороте. Количество органической биомассы, поступающее в почву с корневыми и пожнивными остатками многолетних трав при благоприятных погодных условиях, в 3–5 раз превышает его количество, оставляемое однолетними культурами [7].

Одним из основных показателей потенциальной продуктивности растений является содержание пигментов фотосинтеза в ассимилирующих органах [8]. Количество пигментов фотосинтеза зависит от фазы развития растений и является наследуемым сортовым признаком [9]. Поглощение атмосферного углерода растениями зависит от интенсивности процессов фотосинтеза, который более активно проходит у культур с высокой ассимиляционной поверхностью листьев, чем у злаковых [10]. Изучение продуктивности и содержания углерода в тканях растений позволяет оценить их секвестрационный потенциал [11].

Накопление и депонирование атмосферного углерода в почве — один из путей смягчения парникового эффекта. В связи с этим большой интерес представляет изучение возможности многолетних культур аккумулировать углерод из атмосферы и накапливать его в почве.

Цель работы — изучение влияния фотосинтетической и углерод-секвестрирующей способности левзеи сафлоровидной на накопление органического вещества в дерново-подзолистой почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Травостой левзеи сафлоровидной (маралий корень, рапонтникум сафлоровидный, большоголовник сафлоровидный, *Rhaponticum carthamoides* (Willd.) Pjin maral root) был заложен в 2010 г. на опытном поле Пермского НИИСХ — филиала ПФИЦ УрО РАН на дерново-подзолистой тяжелоуглинистой почве в соответствии с общепринятой в Предуралье технологией возделывания многолетних трав на корма. Агрохимическая характеристика пахотного слоя (0–20 см): pH_{KCl} 4.9 ед., гидролитическая кислотность — 3.9, сумма поглощенных оснований — 21.4 мг экв/100 г, содержание подвижных форм фосфора — 355, обменного калия — 165 мг/кг почвы (по Кирсанову). Содержание органического углерода в слое 0–20 см составляло 1.39, в слое 20–40 см — 0.68%.

Исследование проводили в 2022–2023 гг. контрольного варианта (без использования минеральных удобрений) и варианта с внесением в почву удобрения в дозе N60P60K60. Минеральные удобрения под левзею сафлоровидную вносили ежегодно весной с 2010 по 2017 гг. в виде N_{aa} , P_c и K_x . С 2018 г. минеральные удобрения не вносили,

изучали их последствие. Учет урожайности зеленой массы проводили в фазе цветения.

Для сравнения аккумулированного из атмосферы и накопленного в почве углерода использовали целинный аналог — злаково-разнотравный луг, который является некосимым и неудобренным лугом. Видовой состав травостоя естественного злаково-разнотравного луга: 62% злаковые, 13% бобовые, 25% разнотравье. Травостой не отчуждается. Избыточное накопление отмершей надземной массы приводит к обеднению видового разнообразия. В результате естественного отбора сохранились виды растений, наиболее жизнеспособные в данных почвенно-климатических условиях: ежа сборная (*Dactylis glomerata*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*), шавель конский (*Rumex confertus*), подмаренник цепкий (*Galium aparine*) и др.

Почвенные образцы отбирали перед уборкой возделываемой культуры буром в 3-х полевых повторениях в 3-х точках на делянке на глубину 0–20 и 20–40 см. Основные агрохимические показатели почвы определяли в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почве оценивали методом бихроматного окисления с титриметрическим окончанием. Углерод в растительных образцах определяли на элементном анализаторе Elementary Vario ElCub.

Содержание хлорофилла в листьях растений определяли по методике [12]. Максимум поглощения хлорофилла *a* в области 665 нм, хлорофилла *b* — 649 нм. Каротин определяли по ГОСТ 13496.17 (максимум поглощения 440 нм). Легкорастворимые углеводы (сахара) определяли по ГОСТ 26176-2019, клетчатку — по ГОСТ 31675-2-12, жир — по ГОСТ 13496.15-1016, содержание влаги — по ГОСТ Р 549510-2012.

Определение азота, фосфора и калия в растениях проводили в воздушно-сухих размолотых образцах после мокрого озоления: общего азота — по методу Кьельдаля (ГОСТ 13496.4–93), общего фосфора — спектрофотометрическим методом (ГОСТ 28902–91), общего калия — пламенно-фотометрическим методом (ГОСТ 30504–97).

Урожайность левзеи сафлоровидной определяли площадочным методом, учетная площадь — $50 \times 50 = 2500 \text{ см}^2$. Количество пожнивных остатков определяли рамочным способом взятия корней по методике Станкова с последующей отмывкой монолитов [13].

Доверительный интервал определяли с помощью программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Левзея сафлоровидная является многолетним травянистым растением, относится к сем. Астровые или Сложноцветные. Продолжительность периода от весеннего отрастания до первого укоса в Пермском крае составляет 44–52 сут при сумме положительных температур 456.2–676.5°C, до второго укоса – 44–52 сут после первого скашивания при сумме температур 899.2–1355.7°C.

В качестве универсальных показателей для оценки первичной продукции фотосинтеза левзеи сафлоровидной использовано содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротина. Хлорофилл и каротиноиды являются фоторецепторами–пигментами фотосинтеза у высших растений, они превращают световую энергию в химическую. Основная фотосинтетическая растительная биомасса – это листья, они являются центром образования первичных продуктов и их трансформации. В структуре урожая зеленой массы левзеи сафлоровидной количество листьев составляет 84–90%. Площадь листовой (ассимилирующей) поверхности листьев левзеи в фазе бутонизации составляет 41.8–80.8 тыс. м²/га, в фазе цветения – 126–181 тыс. м²/га [14]. В процессе вегетации при нарастании вегетативной массы левзеи сафлоровидной от момента отрастания до фазы цветения наблюдали накопление в листьях хлорофилла – зеленого пигмента, который помогает листьям улавливать энергию солнечного света для синтеза питательных веществ. Содержание хлорофилла в период отрастание–цветение (03–25 мая) составило 6.8–8.5 мг/г сухой массы (табл. 1).

Последействие применения N60P60K60 не оказало значимого влияния на накопление хлорофилла. Содержание каротина в левзее сафлоровидной

в период наиболее интенсивного поглощения фотосинтетически активной радиации было в 4.0–4.5 раза меньше, чем хлорофилла. Снижение фотосинтетической активности левзеи наблюдали с 06.06 до формирования семенной головки (19.06), сумма хлорофиллов *a* и *b* в этот период в листьях уменьшилась в 4.5–5.3 раза, содержание каротина – в 3.5–4.0 раза. При этом отмечено пожелтение и отмирание нижних листьев.

В процессе фотосинтеза углекислый газ атмосферы восстанавливается, водород молекул воды соединяется с углеродом с образованием молекул сахара (глюкозы). Сахара – это не только промежуточные соединения, образующиеся в процессе фотосинтеза, но и основные продукты ассимиляции углекислого газа, а их содержание – важнейший показатель биохимического состава и физиологического состояния вегетирующих растений [15–17]. Полученные экспериментальные данные показали накопление сахаров в листьях левзеи сафлоровидной в процессе роста и развития растений от 4.0 до 11.8% (табл. 2).

В процессе фотосинтеза происходит трансформация простых углеводов в более сложные – крахмал, клетчатку и в жиры. Содержание жира возрастало в 1.6 раза от периода отрастания к моменту формирования семян. Наблюдали повышение содержания трудногидролизуемых углеводов – клетчатки от 14.7 до 17.7%.

Следует отметить, что содержание углерода в листьях левзеи сафлоровидной практически не менялось в течение всего периода вегетации и оставалось на уровне 39.5–42.5%. По-видимому, это связано с непрерывным ходом параллельно идущих процессов – образование сахаров при аккумуляции атмосферного углерода, их трансформации в более

Таблица 1. Содержание хлорофилла, каротина и углерода в листьях левзеи сафлоровидной в вегетационный период 2023 г.

Дата отбора	Вариант	Сухое вещество, %	Хлорофилл, мг/г сухой массы			Каротин, мг/г сухой массы	Углерод, %
			<i>a</i>	<i>b</i>	Σ хл. <i>a+b</i>		
03.05	Без удобрений	15.0 ± 2.3	4.8 ± 1.0	2.0 ± 0.5	6.8 ± 1.5	2.0 ± 0.3	42.5 ± 0.3
	N60P60K60	16.6 ± 2.0	5.9 ± 1.1	2.5 ± 0.6	8.5 ± 1.7	2.1 ± 0.3	42.3 ± 0.1
15.05	Без удобрений	19.3 ± 2.8	4.5 ± 0.3	2.2 ± 0.1	6.7 ± 0.4	1.6 ± 0.6	41.7 ± 0.9
	N60P60K60	18.4 ± 2.4	4.1 ± 0.5	2.1 ± 0.2	6.2 ± 0.7	1.5 ± 0.3	42.3 ± 0.9
25.05	Без удобрений	23.6 ± 2.0	4.7 ± 0.7	2.1 ± 0.3	6.8 ± 0.9	1.5 ± 0.5	41.1 ± 1.0
	N60P60K60	21.6 ± 1.4	4.8 ± 1.3	2.2 ± 0.7	7.0 ± 2.0	1.5 ± 0.4	40.6 ± 0.8
06.06	Без удобрений	30.3 ± 2.4	1.2 ± 0.7	0.4 ± 0.2	1.7 ± 0.9	0.4 ± 0.2	41.2 ± 0.2
	N60P60K60	27.3 ± 1.3	1.1 ± 0.5	0.4 ± 0.2	1.5 ± 0.7	0.4 ± 0.2	41.8 ± 0.6
19.06	Без удобрений	29.9 ± 0.8	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1	1.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	39.5 ± 0.3
	N60P60K60	29.9 ± 1.3	0.9 ± 0.3	0.5 ± 0.2	1.5 ± 0.5	0.3 ± 0.1	39.8 ± 0.1

Таблица 2. Содержание углеводов и жира в листьях левзеи сафлоровидной в вегетационный период 2023 г.

Дата отбора	Вариант	Массовая доля, %		
		жира	клетчатки	сахаров
03.05	Без удобрений	0.5 ± 0.1	14.7 ± 1.7	4.0 ± 0.1
	N60P60K60	0.8 ± 0.1	16.1 ± 1.7	4.2 ± 0.1
15.05	Без удобрений	0.8 ± 0.1	15.3 ± 1.7	8.9 ± 1.2
	N60P60K60	1.1 ± 0.1	16.5 ± 1.7	7.6 ± 1.1
25.05	Без удобрений	1.2 ± 0.1	17.2 ± 1.8	7.2 ± 1.0
	N60P60K60	1.6 ± 0.1	17.4 ± 1.8	8.6 ± 1.1
06.06	Без удобрений	1.2 ± 0.1	14.9 ± 1.7	12.4 ± 1.4
	N60P60K60	1.5 ± 0.1	15.1 ± 1.7	8.9 ± 1.2
19.06	Без удобрений	1.2 ± 0.1	15.8 ± 1.7	10.4 ± 1.3
	N60P60K60	1.8 ± 0.1	17.7 ± 1.8	11.8 ± 1.4

сложные соединения и оттока из листа к корням растений. При этом атмосферный углерод на 30–70% окисляется растениями, расходуется на дыхание и биосинтез их новой биомассы. В период активного развития и наращивания биомассы баланс сдвинут в сторону поглощения и секвестрации CO₂ [3].

Вегетирующие растения нуждаются в постоянном притоке элементов минерального питания, которые они получают из почвенного раствора, воздушной или водной среды. Известно, что через листья растения получают >95% углекислого газа, а путем некорневого питания могут усваивать из водных растворов зольные элементы и азот. Основное количество азота, воды и зольных питательных веществ поступает из почвы через корневую систему. Содержание азота, фосфора и калия — основных элементов минерального питания в листьях левзеи сафлоровидной снижалось

в процессе вегетации растений и было минимальным в период формирования семян. Молодые листья левзеи до фазы цветения содержали 2.3–3.2% азота, 1.1–1.6% фосфора и 4.1–5.1% калия (рис. 1).

Под почвенной секвестрацией органического углерода понимается перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией биомассы в почвенное органическое вещество и его долговременное хранение в почвенном резервуаре с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу [18, 19, 20–22]. Внесение в почву растительных остатков приводит к усилению эмиссии углерода за счет разложения органического вещества. Однако в результате дыхания почва теряет лишь часть углерода растительных остатков (от 15 до 85%), остальной углерод

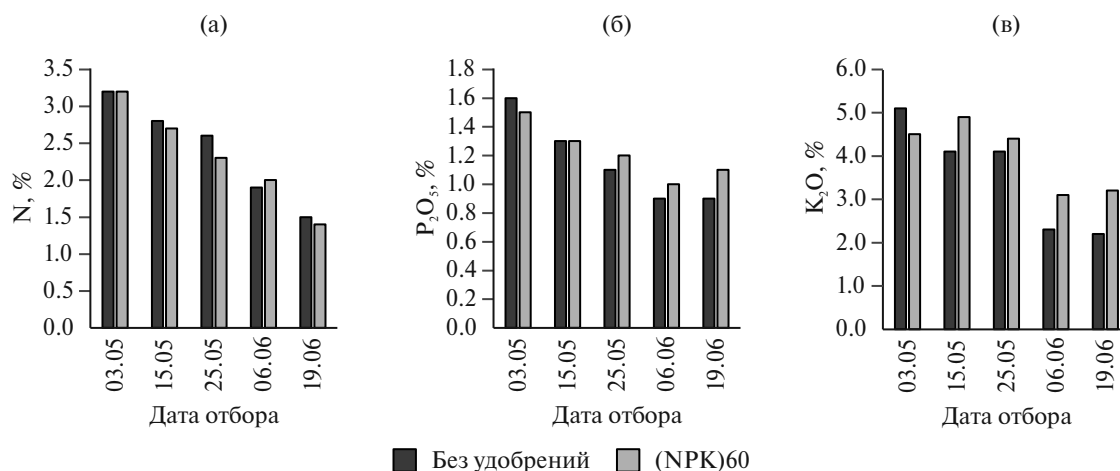


Рис. 1. Содержание азота (а), фосфора (б) и калия (в) в листьях левзеи сафлоровидной в различные периоды вегетации.

Таблица 3. Содержание углеводов и жира в растениях перед уборкой

Культура	Вариант	Органы растения	Массовая доля, %		
			жира	клетчатки	сахаров
Левзея сафлоро-видная	Без удобрений	Надземная часть	1.3 ± 0.4	32.1 ± 2.5	15.6 ± 1.7
		ПКО	0.1 ± 0.1	42.2 ± 3.0	16.5 ± 1.7
	N60P60K60	Надземная часть	2.08	31.1 ± 2.5	15.6 ± 1.7
		ПКО	0.3 ± 0.4	41.7 ± 3.0	16.0 ± 1.7
Травостой злаково-разнотравного луга	Без удобрений	Наземная часть	1.2 ± 0.4	29.8 ± 2.4	12.0 ± 1.4
		ПКО	1.8 ± 0.5	38.5 ± 2.8	8.5 ± 1.1

Примечание. ПКО – пожнивно-корневые остатки. То же в табл. 4, 5.

Таблица 4. Содержание элементов питания в различных органах растений перед уборкой

Образец	Органы растения	C, %	N, %	P ₂ O ₅ , %	K ₂ O, %
Левзея сафлоровидная, без удобрений	Зеленая масса	41.3 ± 0.4	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.1	2.6 ± 0.4
	ПКО	40.1 ± 0.7	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.1	1.6 ± 0.3
	Семенная головка	41.8 ± 0.4	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	3.1 ± 0.1
Левзея сафлоровидная, N60P60K60	Зеленая масса	41.8 ± 1.2	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1	3.0 ± 0.6
	ПКО	41.1 ± 0.8	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.8 ± 0.1
	Семенная головка	41.9 ± 0.6	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1	3.4 ± 0.1
Травостой злаково-разнотравного луга	Зеленая масса	44.1 ± 1.4	1.1 ± 0.1	0.4 ± 0.1	2.4 ± 0.8
	ПКО	36.7 ± 2.9	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.2

переходит преимущественно в почвенное органическое вещество и микробную биомассу [10].

При выполнении работы проведено сравнение количества и качества биомассы левзеи сафлоровидной и травостоя злаково-разнотравного луга, накопленной в процессе фотосинтеза, и количества аккумуляированного углерода.

Перед уборкой надземная продукция и пожнивно-корневые остатки (ПКО) левзеи сафлоровидной характеризовались высоким содержанием сахара (15.6 и 16.5%), низким содержанием жира и высоким содержанием клетчатки (32.1 и 42.2%) соответственно (табл. 3).

В травостое злаково-разнотравного луга в период массового цветения трав, представленного в основном злаковыми травами, определено высокое содержание сахаров и клетчатки. Пожнивно-корневые остатки левзеи имели в 1.9 раза больше содержание сахаров, в 1.1 раза больше клетчатки и в 9 раз меньше жира, чем ПКО естественного травостоя.

Концентрация основных элементов минерального питания в биомассе изученных травостоев зависела в основном от органа растения (табл. 4).

Зеленая масса левзеи сафлоровидной содержала 0.6–0.8% азота в зависимости от варианта опыта. В пожнивно-корневых остатках этой культуры азота было в 2.0 раза меньше. При этом высокое содержание

калия определено в семенной головке и зеленой массе левзеи. Концентрация фосфора изменялась от 0.3 до 0.8% в различных органах левзеи сафлоровидной. Содержание углерода в различных частях растения практически не менялось в зависимости от варианта опыта и находилось в интервале 40.1–41.9%. Зеленая масса травостоя злаково-разнотравного луга характеризовалась более высоким (в 1.4–1.8 раза) содержанием азота, чем зеленая масса левзеи сафлоровидной. Содержание калия в наземной и подземной биомассе травостоя естественного луга составляло 2.4 и 0.8% соответственно. По содержанию фосфора биомасса травостоев практически не отличалась.

Важнейшим показателем фотосинтетической продуктивности растений является накопление ими сухой массы. Длительность использования травяной биомассы и ее качество отражаются на секвестрации углерода. С возрастом травостоя почвенная углеродная секвестрация имеет тенденцию к увеличению. В наших исследованиях левзея 14-го года жизни аккумуляировала из атмосферы 24.3 т CO₂/га (или 6.8 т C/га) в варианте без удобрений (табл. 5).

Применение азота в составе NPK оказало стимулирующее действие на депонирование углерода [6], величина CO₂, поглощенного травостоем левзеи, возросла в 1.7 раза. Высокое содержание поглощенного углекислого газа связано с высокой урожайностью зеленой массы и корней. По данным работы

Таблица 5. Урожайность (средняя за 2022–2023 гг.) и аккумуляция углерода левзеей сафлоровидной за вегетационный период

Образец	Органы растения	Урожайность, т/га	Содержание углерода, %	Накопление углерода, т/га	Аккумуляция, т/га	
					C	CO ₂
Левзея сафлоровидная, без удобрений	Зеленая масса	3.2	41.3	1.31	6.8	24.3
	ПКО	13.7	40.2	5.49		
Левзея сафлоровидная, N60P60K60	Зеленая масса	10.6	41.8	4.43	11.5	41.3
	ПКО	17.3	41.1	7.10		
Травостой злаково-разнотравного луга	Зеленая масса	2.3	44.1	1.0	2.4	8.6
	ПКО (войлок)	3.8	36.7	1.4		

[23], урожайность левзеи сафлоровидной в варианте без удобрений в среднем за 2 года составила 3.2 т сухой массы/га, в варианте N60P60K60—10.6 т/га. С корневыми и пожнивными остатками в почву поступило 13.7 и 17.3 т/га органической биомассы. Считается, что увеличение поступления углерода растительных остатков на 5.5% может обусловить рост секвестрации углерода в 2 раза, а увеличение на 20% — в 5 раз [24]. Левзея сафлоровидная сформировала в переводе на углерод чистой первичной продукции фотосинтеза от 6.8 до 11.5 т/га в зависимости от варианта опыта.

В современном земледелии большое значение уделяется повышению плодородия почв за счет использования растительных остатков и побочной продукции культур. Пожнивные и корневые остатки сельскохозяйственных культур — основной источник поступления углерода в пахотные почвы, на их долю приходится 60–65% от всех источников органического вещества, используемых для поддержания почвенного плодородия [25]. Использование стерни способствует накоплению не только органического углерода в пахотных почвах, но и поддерживает азотный статус, увеличивает запасы минеральных элементов и содержание микробной биомассы.

Углероддепонирующие функции связаны с показателями продуктивности растительной биомассы и с качественным составом растительного сырья, прежде всего с содержанием углерода и азота [26]. В дерново-подзолистую почву после уборки левзеи сафлоровидной поступило 13.7–17.3 т ПКО/га в зависимости от варианта опыта. Применение минеральных удобрений стимулировало развитие корневой системы изученной культуры. Разложение и минерализация растительных остатков в почве зависит от соотношения в них углерода к азоту. ПКО левзеи сафлоровидной разлагаются медленно, соотношение C : N = 134–103. Минеральные удобрения (NPK) в дозе 60 кг д.в./га способствовали сужению соотношения C : N.

Длительное возделывание левзеи сафлоровидной способствовало обогащению дерново-подзолистой почвы органическим веществом. Содержание углерода выросло в слое 0–20 см относительно исходного уровня на 3.6% в варианте без удобрений и на 15.1% в варианте N60P60K60. Относительно целинного аналога (почвы под злаково-разнотравным лугом) содержание углерода в варианте без удобрений было больше на 15.2%, в варианте N60P60K60 — на 28.0% (рис. 2).

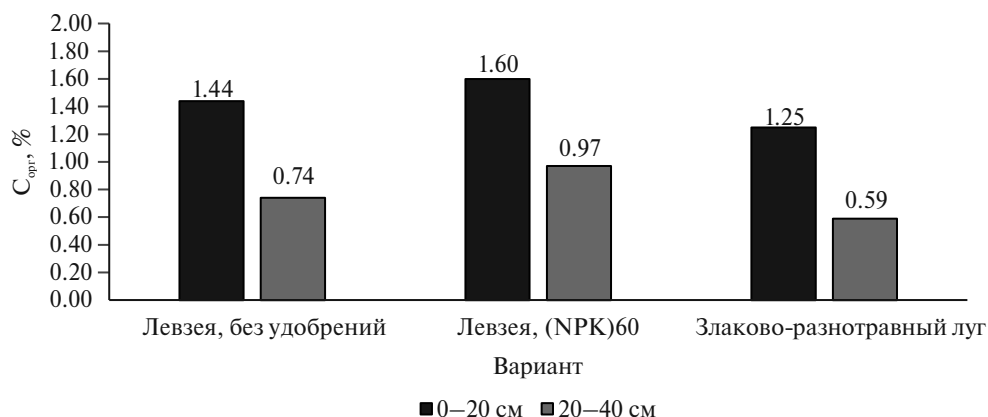


Рис. 2. Содержание органического углерода в дерново-подзолистой почве (среднее за 2022–2023 гг.).

Минеральные удобрения, с одной стороны, активизируют процессы микробного разложения органического вещества в почве. С другой стороны, минеральные удобрения определяют рост и развитие растений, интенсификацию корневой экссудации, накопление растительного опада, т.е. повышение секвестрации углерода в почве [3]. В наших исследованиях внесение N60P60K60 способствовало повышению урожайности зеленой массы левзеи в 3.3 раза относительно неудобренного варианта, что обеспечило накопление 17.3 т ПКО/га и повышение содержания углерода в слое 0–20 см почвы до 1.60%.

При оценке почвенной секвестрации необходимо учитывать более глубокие слои почвы, которые изменяются под влиянием растительной корневой массы. Обычно в слое почвы ниже 20 см содержание углерода уменьшается в связи с меньшим поступлением органической биомассы в эти горизонты, и его накопление происходит медленно. Перед посевом левзеи сафлоровидной содержание углерода в слое 20–40 см составляло 0.68%, в целинной почве злаково-разнотравного луга – 0.59%. В почве под левзеей сафлоровидной 14-го года жизни содержание углерода в слое 20–40 см в варианте без удобрений было больше в 1.1 раза, в варианте N60P60K60 – в 1.4 раза, чем в исходной почве, и в 1.3–1.6 раза соответственно больше целинного аналога. Таким образом, большое количество пожнивно-корневых остатков левзеи сафлоровидной способствовало накоплению и депонированию атмосферного углерода в глубинных слоях почвы.

Содержание органического углерода в естественной почве злаково-разнотравного луга находилось на уровне $1.25 \pm 0.03\%$ в слое 0–20 см, $0.59 \pm 0.04\%$ – в слое 20–40 см [27]. С основной продукцией, образующейся в процессе фотосинтеза, из атмосферы связывается и ежегодно в почву поступает ≈ 1.01 т С/га, в качестве войлока – 1.39 т С/га. При этом соотношение С : N равно в органической биомассе соответственно 44 и 26, следовательно, биомасса разлагается значительно интенсивнее, чем ПКО левзеи сафлоровидной. Объем секвестрации естественным травостоем за вегетационный период составлял 2.40 т/га, что согласуется с литературными данными. Естественная дерново-подзолистая почва находится в устойчивом состоянии, процессы минерализации и гумусообразования под луговой растительностью уравновешены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее активно процесс поглощения фотосинтетически активной радиации для левзеи сафлоровидной проходил в период отрастание–цветение, сумма хлорофиллов

a и *b* в листьях составила 6.2–8.5 мг/г сухой массы. Содержание каротина в листьях было в 3–4 раза меньше, чем хлорофилла, его динамика в различные периоды роста культуры была аналогичной динамике содержания хлорофилла. В процессе вегетации содержание углерода в листьях левзеи сафлоровидной составляло 39.5–42.5%. Массовая доля основного продукта фотосинтеза – сахаров в листьях левзеи увеличивалась от фазы отрастания до фазы формирования семян с 4.0 до 11.8%, клетчатки – с 14.7 до 17.7%, жира – с 0.5 до 1.8%. Содержание элементов минерального питания (азота, фосфора и калия) в листьях левзеи сафлоровидной снижалось в процессе вегетации растений. Минеральные удобрения в дозе N60P60K60 в последствии не оказали значимого влияния на накопление основных минеральных элементов. В период активного роста содержание азота в листьях левзеи составило 1.3–1.6, фосфора – 1.1–1.6, калия – 4.4–5.1%.

Количество поглощенного в процессе фотосинтеза углерода для травостоя левзеи сафлоровидной составило 6.8–11.5 т С/га (24.3–41.3 т CO₂/га) в зависимости от варианта опыта, для естественного фитоценоза – 2.4 т С/га или 8.6 т CO₂/га за вегетационный период.

Левзея сафлоровидная характеризуется большой надземной и подземной зеленой массы уборки левзеи сафлоровидной 14-го года жизни в дерново-подзолистой почве обнаружено высокое количество ПКО – 13.7–17.3 т/га. В целинную почву злаково-разнотравного луга ежегодно поступало в среднем по 2.3 т зеленой массы/га, содержание ПКО (войлока) составило 3.8 т/га.

Содержание органического углерода в почве под левзеей сафлоровидной 14-го года жизни определяли величина ежегодного поступления большого количества растительных остатков и скорость их гумификации, которые зависели от качественного состава и гидротермических условий. В слое 0–20 см почвы содержание углерода повысилось относительно исходного уровня на 3.6% в варианте без удобрений и на 15.1% в варианте N60P60K60, в слое 20–40 см – на 8.8–42.6% соответственно. В почве под многолетней кормовой культурой наблюдали депонирование углерода в виде гумусовых веществ за счет его запасаения в более глубоких слоях почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калов Р.О., Гакаев Р.А. Место природных травяных экосистем в глобальном углеродном балансе // Вестн. Чечен. гос. ун-та. 2022. № 6. С. 50–54.

2. 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. 3–16. <https://doi.org/10.7868/S0002188118020011>
3. Кудеяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (Аналит. обзор) // *Почвоведение*. 2018. № 6. С. 643–658. <https://doi.org/10.1134/S1064229318060091>
4. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М: Наука, 1993. 293 с.
5. Шарков И.Н., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // *Почвы и окр. среда*. 2022. Т. 5. № 2. С. 1–7.
6. Кудеяров В.Н. Почвенно-биохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121. <https://doi.org/10.1134/S1064229319010095>
7. Эседулаев С.Т. Многолетние травы и их смеси – важнейший фактор повышения плодородия почв и продуктивности пашни в Верхневолжье // *Плодородие*. 2022. № 6. С. 59–63. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.129.16>
8. Тарчевский И.А., Андрианова Ю.Е. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы // *Физиология растений*. 1980. Т. 27. Вып. 2. С. 341–348.
9. Кумаков В.А. Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. М.: Агропромиздат, 2003. 270 с.
10. Мамаева Г.Г. Сравнительная оценка количества углерода, поступившего в почву из корневых или послеуборочных остатков при нулевой и традиционной обработках почвы (США) // *Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн.* 2005. № 32. С. 390.
11. Артемьева Е.П., Валдайских В.В., Радченко Т.А., Карпунин М.Ю. Перспективы выращивания высокотравных растений в качестве углероддепонирующих культур // *Аграрн. вестн. Урала*. 2022. № 12(227). С. 2–10. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-227-12-2-10>
12. Лобков В.Т., Наполова Г.В. Способ определения хлорофилла в растениях гречихи: Пат. 2244916 РФ // Б.И. 2005. № 2. С. 1–4.
13. Доспехов Б.А., Васильев И.П., Туликов А.М. Практикум по земледелию. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
14. Матолинец Д.А. Кормовая продуктивность левзеи сафлоровидной при различных приемах возделывания в Среднем Предуралье: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Самара, 2021. 18 с.
15. Курсанов А.Л. Транспорт ассимилятов в растении. М.: Наука, 1976. 646 с.
16. Никитин С.Н. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах и динамика ростовых процессов при применении биологических препаратов // *Усп. совр. естествознания*. 2017. № 1. С. 33–38.
17. Ничипорович А.А. Физиология фотосинтеза и продуктивность растений. Физиология фотосинтеза. М., 1982. С. 7–34.
18. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумификация и почвенная секвестрация углерода // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
19. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // *Плодородие*. 2021. № 6. С. 38–41. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10>
20. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biol. Biochem.* 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
21. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles // *Plant and Soil*. 1997. V. 191. P. 77–87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
22. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and the global carbon cycle // *Biogeochemistry*. 2000. V. 48. P. 7–20.
23. Майсак Г.П., Авдеев Н.В., Старцева А.В., Иванова К.Ю. Накопление органического вещества и элементов минерального питания при длительном возделывании многолетних трав на дерново-подзолистой почве Пермского края // *Земледелие*. 2023. № 7. С. 18–21. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-7-1-48>
24. Благовещенский Г.В., Конанчук В.В., Тимошенко С.М. Углеродная секвестрация в травяных экосистемах // *Кормопроизводство*. 2019. № 9. С. 17–21.
25. Суховеева О.Э. Поступление органического углерода в почву с послеуборочными остатками сельскохозяйственных культур // *Почвоведение*. 2022. № 6. С. 737–746. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060120>
26. Столбовой В.С. Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2020. Т. 34. № 7. С. 19–26. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10703>
27. Завьялова Н.Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // *Почвоведение*. 2022. № 8. С. 1046–1055. <https://doi.org/10.1134/S1064229322080166>

Photosynthetic and Carbon Sequestering Ability of Safflower *Leucea* and Accumulation of Organic Carbon in Sod-Podzolic Soil

N. E. Zavyalova^{a, #}, G. P. Maysak^a, I. V. Kazakova^a, O. V. Ivanova^a

^aPerm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS,
ul. Kultury 12, Perm region, d. Lobanovo 614532, Russia

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

According to the content of photosynthesis pigments, the most active period of photosynthetically active radiation absorption by the leaves of *Leucea safflower* during the growing season was revealed. From the moment of full regrowth to flowering, the amount of chlorophylls a and b in the leaves was 6.2–8.5 mg/g of dry weight, carotene – 3–4 times less. During photosynthesis, the carbon content in the leaves of *Leucea safflower* practically did not change and amounted to 39.5–42.5%. The mass fraction of the main product of photosynthesis, sugars, increased from the regrowth phase to seed formation from 4.0 to 11.8%. During the period of active growth, the nitrogen content in the leaves of the leucea was 1.3–1.6, phosphorus – 1.1–1.6, potassium – 4.4–5.1%. After harvesting the safflower leucea of the 14th year of life, a high amount of crop and root residues (CRR) was determined in the sod-podzolic soil – 13.7–17.3 t/ha. The amount of carbon absorbed during photosynthesis was 6.8–11.5 t C/ha (24.3–41.3 t CO₂/ha), depending on the experiment variant, for natural phytocenosis this indicator was equal to 2.4 t C/ha (or 8.6 t CO₂/ha) during the growing season. The organic carbon content under the safflower leucea of the 14th year of life in the 0–20 cm soil layer increased relative to the initial level by 3.6% in the version without fertilizers, by 15.1% in the N60P60K60 variant, and in the 20–40 cm layer by 8.8–42.6%, respectively. Relative to the virgin analogue, the carbon content in the 0–20 cm layer was 15.2–28.0 higher, in the 20–40 cm layer – 25.0–64.4%, depending on the experiment variant, which indicated the deposition of carbon in the form of humic substances due to its storage in deeper soil layers.

Keywords: safflower leucea, photosynthesis, organic carbon, elements of mineral nutrition, sod-podzolic soil.

УДК 546.47./49:546.56:633.16

ОЦЕНКА МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ЦИНКА И МЕДИ НА ТОКСИЧЕСКИЙ СТРЕСС РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ, ВЫЗВАННЫЙ КАДМИЕМ

© 2024 г. А. В. Дикарев^{1,*}, Д. В. Дикарев¹, Д. В. Крыленкин¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”

249035 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 1, корп. 1, Россия

*E-mail: ar.djuna@yandex.ru

В вегетационном опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве с внесением Cd^{2+} в дозах 25 и 45 мг/кг изучили, как изменяется ответ растений ячменя на токсическое воздействие кадмия, если совместно с ним вносили различные количества тяжелых металлов (ТМ) с функциями микроэлементов на примере цинка и меди. Кроме того, были заложены несколько вариантов, в которых вместе с кадмием вносили также медь и цинк. Таким образом, в опыте использовали дозы и комбинации металлов: Cd_{45} , $\text{Cd}_{25}\text{Cu}_{50}$, $\text{Cd}_{25}\text{Cu}_{100}$, $\text{Cd}_{25}\text{Cu}_{100}$, $\text{Cd}_{25}\text{Cu}_{200}$, $\text{Cd}_{45}\text{Cu}_{50}$, $\text{Cd}_{45}\text{Cu}_{100}$, $\text{Cd}_{45}\text{Cu}_{200}$, $\text{Cd}_{45}\text{Zn}_{50}$, $\text{Cd}_{45}\text{Zn}_{100}$, $\text{Cd}_{45}\text{Zn}_{150}$. У опытных растений оценивали морфометрические параметры (внешний вид, высоту растений, их биомассу и площадь листьев), биохимические параметры (накопление МДА, общих антиоксидантов и сырого протеина), структуру урожая (массу соломы, массу зерна, массу 1000 зерен). Кроме этого, анализировали валовое содержание ТМ и других элементов в почве и их переход в почвенный раствор. Показано, что внесение одного кадмия приводило к значимому угнетению процессов роста и развития растений ячменя. При этом совместное с кадмием внесение ТМ-микроэлементов существенно модифицировало воздействие кадмия. Цинк способствовал уменьшению токсического воздействия кадмия, причем интенсивность этого эффекта возрастала по мере увеличения концентрации цинка, а токсическое воздействие этого ТМ при рассмотренных дозах еще не проявлялось. Медь, как более токсичный элемент, обнаруживала свое стимулирующее действие при меньших дозах, нежели цинк, а при более высоких дозах наблюдали развитие острого стресса, вызванного совместным токсическим воздействием 2-х ТМ. Это справедливо для дозы кадмия 45 мг/кг, при меньшей дозе кадмия (25 мг/кг) медь в основном оказывала стимулирующее действие. Рассмотренные эффекты в первую очередь отмечали при оценке морфометрических показателей и продуктивности. На основе биохимических параметров не удалось сделать четких выводов о том, как внесение цинка и меди изменяло воздействие кадмия. Судя по всему, для оценки стрессовых эффектов уместнее было использовать другие биохимические параметры. Отмечено, что внесение микроэлементов в целом способствовало сокращению накопления кадмия в надземной биомассе растений ячменя, однако добавление цинка приводило к усиленному переходу кадмия в солому, но не в зерно.

Ключевые слова: яровой ячмень, токсический стресс, вегетационный опыт, кадмий, цинк, медь, морфометрические и биохимические показатели, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188124070082, **EDN:** CFPEBN

ВВЕДЕНИЕ

Кадмий является одним из основных загрязнителей наземных и водных экосистем. Данный химический элемент, относящийся к группе тяжелых металлов (ТМ), поступает в окружающую среду в первую очередь в составе выхлопных газов, а также с отходами промышленности и сельского хозяйства [1]. В почвах сельскохозяйственных угодий содержание кадмия может достигать 400–800 мг/кг,

в почвах промышленных зон — подниматься более 1000 мг/кг [2].

Накапливаясь в растениях в токсических концентрациях, кадмий вызывает множественные повреждения во всех системах, органах, клетках, нарушает биохимические реакции, связанные с питанием, дыханием, фотосинтезом, изменяет активность ферментов и их состав, нарушает процессы минерального питания и водного обмена, меняет гормональный статус, воздействует

на структуру плазмалеммы и ее проницаемость [3]. В результате на загрязненных этим ТМ почвах зачастую наблюдают снижение продуктивности сельскохозяйственных культур. Более того, продукты питания, произведенные на загрязненных территориях, могут содержать кадмий в опасных для здоровья человека и домашних животных концентрациях [2].

Медь и цинк также входят в группу ТМ, однако, в отличие от кадмия, обладают важными физиологическими ролями, относясь к микроэлементам. Например, среднее содержание цинка в растениях составляет $\approx 0.002\%$ от массы [4]. В растительном организме он входит в состав активных центров более чем 30 ферментов, таких как карбоангидразы, фосфатазы, РНК-полимераза, алкогольдегидрогеназа. Например, первый из этих энзимов катализирует процесс разложения гидратированной угольной кислоты на углекислый газ и воду, таким образом, контролируя одну из реакций фотосинтеза. Кроме того, цинк участвует в синтезе ауксинов, катализируя в виде кофактора триптофансинтетазы образование соответствующей аминокислоты. Таким образом, внесение в почву цинка стимулирует рост растения, активизируя указанный процесс. Важна роль цинка для поддержания нормального функционирования плазмалеммы, для образования протеинов и активности РНКазы, в регуляции процесса транскрипции ДНК. Цинк вовлечен в антиоксидантную защиту организма, будучи кофактором супероксиддисмутазы.

Медь содержится в растениях в среднем в количестве 0.0002% . Она также является коферментом ряда энзимов из группы оксидаз [5]. К их функциям, например, относятся окисление полифенолов и аскорбиновой кислоты; таким образом, медь вовлечена в контроль антиоксидантного статуса организма. Кроме того, в составе цитохрома-С медь участвует в работе митохондрий. Задействована медь и в азотном обмене, стимулируя активность нитратредуктаз и протеаз. Наиболее велико содержание меди в хлоропластах, где она входит в состав белка пластоцианина, функцией которого является перенос электронов между первой и второй фотосистемами.

Тем не менее, при повышенном содержании в почве цинк и медь оказывают токсическое воздействие на растительный организм, вызывая эффекты, сходные с действием других ТМ, таких, как кадмий [6]. Среднее содержание цинка в почвах Нечерноземной зоны составляет 35, меди — 13 мг/кг. ПДК для обоих элементов одинакова и составляет 55 мг/кг [7].

Большинство исследований влияния ТМ на растения проведено на модельных объектах. Это позволило оценить многие особенности

реакции растений на воздействие наиболее опасных ТМ на клеточном, физиолого-биохимическом и молекулярно-генетическом уровнях [3]. Несмотря на несомненную научную ценность и общебиологическую значимость полученной информации остается малоизученным большой пласт вопросов, касающихся особенностей действия конкретных ТМ на те, или иные сельскохозяйственные культуры. Требуют дополнительного изучения механизмы поступления ТМ из почвы в растения, их транспорта, распространения и аккумуляции в разных органах и клеточных структурах, а также их влияния на продуктивность и качество урожая.

Особенный интерес представляют исследования, посвященные анализу комплексного воздействия нескольких ТМ на растения. Действительно, в реальных условиях редко встречается ситуация, когда почва загрязнена только одним ТМ, чаще встречаются смеси из нескольких токсических элементов. При этом возможно такое, что некоторые ТМ в подобных смесях, такие как кадмий, будучи сильно ядовитыми, не обладают доказанным физиологическим действием [3, 4], в то время как другие, например, медь и цинк, являются микроэлементами. Логично предположить, что внесение в загрязненную почву низких количеств микроэлементов может до определенной степени ослаблять воздействие вредных ионов, но по мере возрастания дозы микроэлементов этот эффект исчезает, сменяясь комбинированным токсическим воздействием смеси ТМ. В связи с этим было бы интересно рассмотреть особенности синергического и антагонистического взаимодействия, с одной стороны, кадмия, а с другой — меди и цинка.

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) — одна из основных сельскохозяйственных культур. Он известен с глубокой древности и широко возделывается по всему миру, в самых разнообразных почвенных и климатических условиях. Помимо этого, эта культура тщательно изучена на всех уровнях ее организации, что делает ее подходящей моделью для исследования ответа растительных организмов на действие техногенных стрессоров и, в частности — кадмия, а также смесей ТМ.

Цель работы — изучение ответа растений ярового двурядного ячменя на сочетанное воздействие токсического ТМ (кадмия) и двух ТМ, обладающих функциями микроэлементов питания (медь и цинк) в различных дозах, по морфометрическим, физиолого-биохимическим показателям и продуктивности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент для изучения сочетанного действия ТМ на растения ярового двурядного ячменя

Таблица 1. Физико-химические характеристики почвы опыта

Показатель	Величина показателя
pH_{KCl} , ед. pH	5.27 ± 0.01
Гумус, %	1.31 ± 0.02
H_T , мг-экв/100 г почвы	1.82 ± 0.03
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	6.05 ± 0.18
Обменный K_2O , мг/кг почвы (по Масловой)	77.6 ± 3.3
Подвижный P_2O_5 , мг/кг почвы (по Кирсанову)	65.0 ± 0.6

был заложен на дерново-подзолистой супесчаной почве. Для работы были взяты семена ячменя сорта Зазерский 85 (Белоруссия). Растения выращивали в пластиковых сосудах емкостью 5 кг по общепринятой методике [8]. Агрохимические характеристики почвы [9] приведены в табл. 1.

Кадмий был внесен в почву в виде нитрата $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ в концентрациях 25 и 45 мг/кг. Цинк вносили в аналогичной форме $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ в концентрациях 50, 100, 150 мг/кг. Медь вносили в форме $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ в дозах 50, 100 и 200 мг/кг. Таким образом, были реализованы следующие варианты внесения ТМ: контроль без ТМ, Zn/Cu_0Cd_{45} , $Zn_{50}Cd_{45}$, $Zn_{100}Cd_{45}$, $Zn_{150}Cd_{45}$; $Cu_{50}Cd_{25}$, $Cu_{100}Cd_{25}$, $Cu_{200}Cd_{25}$; $Cu_{50}Cd_{45}$, $Cu_{100}Cd_{45}$, $Cu_{200}Cd_{45}$ (числа в нижнем индексе означают содержание соответствующего элемента, мг/кг почвы).

При выборе концентрации ТМ, использованных в данном исследовании, руководствовались данными, полученными в проведенных ранее коллективом ВНИИРАЭ вегетационных опытах по изучению ответа растений ячменя на действие различных ТМ [10]. На основе анализа данных по реакции морфометрических и биохимических показателей растений ячменя была выбрана доза кадмия, которая может считаться критической, т.е. такой, которая вызывает существенное угнетение рассматриваемых параметров, но еще позволяет растению нормально развиваться и завершать свой жизненный цикл. Кроме того, была выбрана доза, которая вызывает развитие эффектов, выраженных примерно в 2 раза меньшей степени, чем вышеуказанная. Для меди и цинка выбрали такой диапазон концентраций, который вызывал бы эффекты от незначительных или стимулирующих до явного угнетения растений. Предполагали, что при минимальных дозах микроэлементов удалось бы компенсировать токсическое воздействие кадмия, однако по мере возрастания дозы, стимулирующее действие микроэлементов должно было бы постепенно исчезнуть. Таким образом, ожидаемые эффекты проявлялись вероятно в большей степени при внесении в почву кадмия

25 мг/кг и в меньшей — при внесении 45 мг/кг, т.е. в последнем случае быстрее бы развивался токсический стресс.

Эксперимент во всех вариантах закладывали в трехкратной повторности, всего было использовано 33 сосуда. При закладке опыта просеянную и подготовленную почву тщательно перемешивали и вносили в нее питательные элементы в виде водных растворов солей NH_4NO_3 и K_2SO_4 из расчета $N_{200}K_{100}$. На основе данных табл. 1 было установлено, что P_2O_5 содержится в почве в достаточном количестве, и его дополнительное внесение не требуется. При внесении в почву питательных веществ учитывали и корректировали количество азота, поступавшее с раствором соли ТМ так, чтобы азота во всех вариантах содержалось поровну. Контролем служил вариант с НК без внесения ТМ. При выборе варианта солей питательных элементов, а также их концентраций руководствовались рекомендациями, приведенными в работах [8, 9], на которых и основывалась вся методика данного опыта. Перед посевом почву инкубировали в течение 30 сут при температуре 20–23°C и влажности 60% ПВ. Растения выращивали до товарной спелости в условиях постоянной влажности почвы (60% ПВ). Положение вегетационных сосудов меняли ежедневно по схеме, обеспечивающей равномерное освещение и однородные условия роста и развития растений. Поливали растения дистиллированной водой.

Отбор растительных проб для биометрического и биохимического анализов проводили через 30 сут после всходов. Биохимические показатели (содержание малонового диальдегида (МДА) [11], общее содержание антиоксидантов [12] и белков [13, 14]) определяли в пробах листьев. До урожая оставляли по 10 растений в сосуде. В течение всего вегетационного периода вели фенологические наблюдения. При уборке урожая через 90 сут после всходов в пробах определяли структуру урожая по следующим показателям: высота растений, общее число стеблей и число продуктивных стеблей, масса колосьев и соломы, общее число колосьев и число колосьев с зерном, масса зерна, число зерен в колосе. Также на 30-е сут эксперимента определяли

содержание элементов в почвенном растворе и самой почве с помощью стандартной методики [15].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили стандартными методами с использованием программных пакетов MS Excel 2003 и Statistica 10.0. На графиках и диаграммах приведены среднеарифметические величины в расчете на одно растение и доверительные интервалы определявшихся показателей в % к контролю при 95%-ном уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внешний вид растений. Внешний вид растений ярового ячменя сорта Зазерский 85 показан на рис. 1.

Показано, что внесение в почву кадмия 45 мг/кг вызывало заметное угнетение роста и развития растений ячменя. Однако последующее добавление в почву микроэлементов позволило компенсировать токсическое воздействие кадмия. Например,



Рис. 1. Внешний вид растений ячменя сорта Зазерский 85 на 30-е сут выращивания (слева направо (а) — варианты $Zn_{150}Cd_{45}$, $Zn_{100}Cd_{45}$, $Zn_{50}Cd_{45}$, Zn_0Cd_{45} , контроль; (б) — варианты $Cu_{200}Cd_{25}$, $Cu_{100}Cd_{25}$, $Cu_{50}Cd_{25}$, контроль; (в) — варианты $Cu_{200}Cd_{45}$, $Cu_{100}Cd_{45}$, $Cu_{50}Cd_{45}$, Cu_0Cd_{45} , контроль).

в случае с цинком (рис. 1а) добавление этого катиона в дозе 50 мг/кг заметно улучшало состояние растений, а при больших дозах (100 и 150 мг/кг) удавалось практически полностью компенсировать воздействие стресса.

Иное наблюдали при внесении кадмия совместно с медью. В случае, если кадмий вносили в концентрации 25 мг/кг (рис. 1б) практически все изученные концентрации меди вызвали ослабление токсического стресса, и различия с контролем визуально не обнаруживали.

В то же время при внесении в почву кадмия в концентрации 45 мг/кг медь иным образом взаимодействовала с этим поллютантом. При минимальной дозе меди (50 мг/кг) уровень токсического стресса снижался почти до контрольного уровня, но при дальнейшем возрастании дозы меди состояние растений ухудшалось. При внесении дозы 100 мг Cu/кг растения демонстрировали заметное угнетение, но все же могли еще продолжать рост и развитие, но при внесении 200 мг Cu/кг наблюдали полное угнетение растений.

Таким образом, медь показала себя как более токсичный элемент, чем цинк. Последний позволял уменьшать вызываемый кадмием токсический стресс, но в случае с медью это было возможно лишь при внесении половинной дозы кадмия. При той дозе кадмия (45 мг/кг), которую в сочетании с цинком успешно переносили растения, воздействие меди компенсировало влияние кадмия лишь при минимальной дозе Cu^{2+} (50 мг/кг), а по мере роста дозы оба элемента оказывали уже только токсическое воздействие.

Морфометрические показатели. На рис. 2 приведены количественные данные, которые отражают

влияние кадмия в сочетании с медью и цинком на морфометрические показатели ячменя сорта Зазерский 85.

Наиболее значимые эффекты наблюдали при совместном внесении цинка и кадмия. Cd^{2+} оказывал угнетающее воздействие на растения ячменя, хотя в рассматриваемой дозе (45 мг/кг) еще не вызывал тяжелого стресса. Внесение в почву цинка позволило снизить это воздействие. По мере роста концентрации цинка наблюдали увеличение всех 3-х показателей: высоты растений, площади листьев, биомассы. Уже при внесении цинка 50 мг/кг эти показатели практически возвращались к контрольному уровню, а при дозах 100 мг/кг и особенно 150 мг/кг отмечена их стимуляция. Самым наглядным показателем оказалась биомасса, она по мере роста концентрации цинка увеличивалась практически линейно, составляя при максимальной дозе цинка 178% от контроля. В меньшей степени на воздействие цинка среагировала высота растений. При внесении дозы цинка 50 мг/кг она практически не изменялась, но начинала постепенно возрастать при увеличении доз цинка. При дозе 100 мг/кг высота растений приближалась к контрольному уровню, и на 120% превышала его в варианте с внесением дозы цинка 150 мг/кг. Добавление в почву цинка в целом стимулировало и увеличение площади листьев. При дозе цинка 50 мг/кг площадь листьев увеличивалась на 124% от контроля, а увеличение дозы цинка в 2 раза, до 100 мг/кг практически никак не влияло на площадь листьев, хотя при максимальной дозе цинка площадь листьев снова возрастала до 145% от контроля. Таким образом, цинк не только позволял сгладить токсический стресс, вызванный кадмием, но и стимулировал рост и развитие растений.

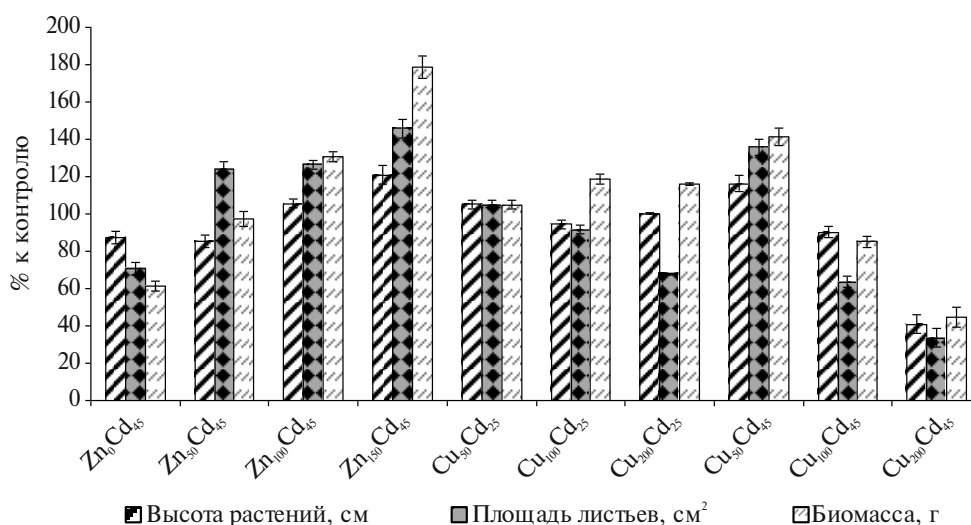


Рис. 2. Влияние кадмия в сочетании с цинком и медью на высоту, площадь листьев и биомассу растений ячменя сорта Зазерский 85.

Совершенно иную закономерность наблюдали при внесении совместно с кадмием меди. Эффекты, оказываемые обоими ТМ на растения ячменя, различались в зависимости от концентрации кадмия. Как было установлено в нашем предшествующем исследовании [16, 17], кадмий в дозе 25 мг/кг не вызывал существенного угнетения процессов роста и развития ячменя. Если в почву, в которую уже был внесен кадмий в такой концентрации, добавляли различные дозы меди, то это в целом существенно не изменяло ситуацию. При применении дозы меди 50 мг/кг все 3 морфометрических показателя оставались примерно на уровне контроля. Когда концентрация меди увеличивалась в 2 раза, до 100 мг/кг, высота растений и площадь листьев несколько сокращались, но не уменьшились значительно относительно контроля, в то же время биомасса ячменя даже возрастала, но не существенно. Так же и при максимальной дозе меди (200 мг/кг) показатели менялись не сильно, лишь площадь листьев сокращалась до 70% от контроля. Таким образом, доза кадмия 25 мг/кг была явно недостаточной для развития каких-либо значимых изменений, это касалось как одного кадмия, так и его сочетания с медью.

Куда более интересные данные удалось получить при совместном внесении дозы кадмия 45 мг/кг и различных доз меди. Минимальная доза меди (50 мг/кг) позволяла устранить воздействие токсического стресса и способствовала стимуляции развития растений. Изученные три морфометрических показателя возрастали на 116–141%. Однако по мере увеличения дозы меди эффект стимуляции роста постепенно исчезал, и снова развивался токсический стресс. Например, при внесении меди в дозе 100 мг/кг высота растений и биомасса сокращались до примерно контрольного уровня, а площадь листьев уменьшилась более значительно, до 63% от контроля. При максимальной дозе меди наступало полное угнетение роста и развития растений, довольно много семян даже не проросли, другие растения погибали на стадии кущения. В целом морфометрические показатели уменьшились при этом до 44–33% от контроля.

На основе анализа ответа растений ячменя на совместное действие кадмия, цинка и меди по морфометрическим показателям можно сделать такие выводы. Медь проявила себя как более токсичный металл, чем цинк. Добавление цинка вело не только к сглаживанию токсического стресса, вызванного кадмием, но и к стимуляции роста и развития. При этом, чем больше была доза цинка, тем более ярко проявлялся стимулирующий эффект. Вероятно, его возникновение связано с тем, что цинк, будучи микроэлементом, способствовал активации всех защитных механизмов растительного организма, при этом его собственная токсичность была несущественной. Медь при аналогичной концентрации

кадмия воздействовала совершенно иначе. При минимальной дозе меди также отмечали стимуляцию, но при возрастании концентрации меди морфометрические показатели возвращались к контрольному уровню, а далее развивалось глубокое угнетение растений. Логично предположить, что в последнем случае имело место совместное токсическое воздействие 2-х ТМ, когда роль меди, как микроэлемента, была уже несущественной. Если же кадмий вносили в почву в половинной концентрации, то никаких значимых эффектов не наблюдали: защитные механизмы растительного организма успешно справлялись с преодолением стресса, но и стимулирующего эффекта также не отмечали.

Оценка содержания элементов в почве. В табл. 2 приведены данные оценки содержания элементов в почвенном растворе на 30-е сут эксперимента, а также влажность и рН почвы. Кроме того, в табл. 3 дано содержание элементов в самой почве. Такие исследования были проведены с целью проконтролировать точность внесения в почву ТМ и оценить их количества, доступные для растений, а значит те, которые могли бы спровоцировать развитие наблюдаемых эффектов.

Данные табл. 2 и 3 показали, что концентрации внесенных в почву ТМ, которые находились в несвязанном состоянии, в целом не превышали те, которые были внесены в почву или даже оказались несколько меньше. Концентрация ТМ в почвенном растворе в большинстве вариантов находилась на достаточно низком уровне, потому, вероятно, стрессовая нагрузка оказалась не слишком высокой (рис. 1, 2). Только в варианте $\text{Cu}_{200}\text{Cd}_{45}$ концентрация кадмия и меди в почвенном растворе была достаточно высокая, что и вызывало глубокое угнетение растений.

По мере роста доз ТМ отмечено возрастание в почвенном растворе концентраций таких элементов, как калий, кальций, марганец, а в некоторых случаях — стронций. Это могло свидетельствовать об угнетении функций ризодермы корней при выбранных концентрациях ТМ. Поглощение указанных ионов (K^+ , Ca^{2+} , Mn , Sr^{2+}) нарушалось, и они накапливались в почвенном растворе. Наиболее отчетливо это проявлялось при внесении максимальной дозы меди (200 мг/кг), в меньшей степени — одного кадмия, и довольно слабо — цинка.

Содержание в почве всех элементов находилось на фоновых уровнях для дерново-подзолистой почвы Нечерноземной зоны средней полосы [7]. В целом содержание в почве ионов металлов (не внесенных дополнительно) оставалось стабильным при всех дозах загрязнения ТМ.

Биохимические параметры. Действие повреждающих агентов вызывает включение у живых организмов механизмов защиты. Так, ТМ способствуют

Таблица 2. Влажность почвенных проб и средняя концентрация ионов металлов в почвенном растворе

Вариант	Гипоскопическая влажность, %	pH	Концентрация, мг/л									
			Cd	Cu	Fe	Mn	Sr	Zn	Ca	K	Mg	Na
Контроль	21.1 ± 5.3	6.31 ± 3.14	0.08 ± 0.37	0.05 ± 0.28	0.32 ± 0.73	5.80 ± 3.02	1.13 ± 1.37	0.16 ± 0.52	34.9 ± 6.2	0.90 ± 1.22	1.57 ± 1.61	1.06 ± 1.33
Zn ₀ Cd ₄₅	19.2 ± 5.1	5.44 ± 2.93	5.28 ± 2.89	0.06 ± 0.31	0.44 ± 0.85	34.7 ± 6.1	3.57 ± 2.39	0.28 ± 0.68	130 ± 8	18.1 ± 5.0	6.57 ± 3.20	2.96 ± 2.19
Zn ₅₀ Cd ₄₅	13.3 ± 4.4	5.52 ± 2.95	2.52 ± 2.02	0.14 ± 0.49	0.82 ± 1.17	12.9 ± 4.3	1.78 ± 1.71	2.59 ± 2.05	55.8 ± 6.4	4.77 ± 2.75	2.53 ± 2.03	1.65 ± 1.65
Zn ₁₀₀ Cd ₄₅	11.7 ± 4.1	5.56 ± 2.96	1.27 ± 1.45	0.10 ± 0.41	1.56 ± 1.60	9.63 ± 3.81	1.08 ± 1.34	2.07 ± 1.84	36.4 ± 6.2	18.6 ± 5.0	2.02 ± 1.82	2.45 ± 2.00
Zn ₁₅₀ Cd ₄₅	14.1 ± 4.5	6.22 ± 3.12	1.07 ± 1.33	0.06 ± 0.32	0.79 ± 1.14	16.1 ± 4.8	1.75 ± 1.69	2.30 ± 1.93	57.8 ± 6.4	3.33 ± 2.32	3.53 ± 2.38	2.33 ± 1.95
Cu ₅₀ Cd ₂₅	19.7 ± 5.1	6.13 ± 3.10	0.92 ± 1.23	0.47 ± 0.88	0.33 ± 0.74	8.69 ± 3.64	1.74 ± 1.69	0.22 ± 0.60	66.7 ± 6.1	2.91 ± 2.17	3.17 ± 2.26	2.27 ± 1.92
Cu ₁₀₀ Cd ₂₅	18.1 ± 5.0	5.87 ± 3.03	3.67 ± 2.43	1.73 ± 1.68	0.12 ± 0.44	8.92 ± 3.68	5.21 ± 2.87	0.29 ± 0.69	177 ± 15	20.4 ± 5.2	10.2 ± 3.9	4.23 ± 2.60
Cu ₂₀₀ Cd ₂₅	19.8 ± 5.1	4.99 ± 2.81	6.03 ± 3.07	3.18 ± 2.27	0.51 ± 0.92	15.3 ± 4.7	16.8 ± 4.8	1.80 ± 1.71	487 ± 56	121 ± 7	31.8 ± 6.0	18.4 ± 5.0
Cu ₅₀ Cd ₄₅	14.7 ± 4.6	5.28 ± 2.89	2.38 ± 1.97	0.57 ± 0.97	0.72 ± 1.09	13.6 ± 4.4	2.57 ± 2.04	0.47 ± 0.88	102 ± 2	18.9 ± 5.1	6.11 ± 3.09	4.78 ± 2.75
Cu ₁₀₀ Cd ₄₅	16.9 ± 4.8	5.39 ± 2.91	3.03 ± 2.21	1.05 ± 1.32	0.56 ± 0.97	49.2 ± 6.5	3.15 ± 2.26	0.56 ± 0.96	129 ± 8	10.9 ± 4.0	8.41 ± 3.58	5.16 ± 2.86
Cu ₂₀₀ Cd ₄₅	15.9 ± 4.7	5.23 ± 2.87	24.8 ± 5.6	13.1 ± 4.4	0.19 ± 0.57	130 ± 8	6.13 ± 3.10	0.46 ± 0.87	248 ± 25	15.5 ± 4.7	14.7 ± 4.6	9.87 ± 3.85

Таблица 3. Содержание различных элементов в почве при 3-х способах экстракции, мг/кг

Вариант	Ацетатно-аммонийный буфер с ЭДТА											
	Cd	Cu	Fe	Mn	Sr	Zn	Ca	K	Mg			
Контроль	0.47 ± 0.88	1.33 ± 1.48	480 ± 55	3.89 ± 7.11	214 ± 20	3.26 ± 2.29	1480 ± 0.3	113 ± 5	224 ± 1			
Zn ₀ Cd ₄₅	27.1 ± 5.7	1.24 ± 1.43	366 ± 40	3.93 ± 5.20	157 ± 12	2.46 ± 2.00	1570 ± 0.3	70.3 ± 5.9	120 ± 0.8			
Zn ₅₀ Cd ₄₅	31.3 ± 6.0	40.0 ± 1.3	456 ± 52	4.83 ± 6.72	179 ± 15	28.4 ± 5.8	1830 ± 0.8	72.8 ± 5.7	88.4 ± 0.7			
Zn ₁₀₀ Cd ₄₅	23.3 ± 5.5	1.19 ± 1.40	357 ± 39	3.75 ± 5.06	154 ± 12	38.7 ± 6.3	1730 ± 0.8	144 ± 10	102 ± 1			
Zn ₁₅₀ Cd ₄₅	30.7 ± 6.0	3.83 ± 2.48	514 ± 60	5.59 ± 7.68	218 ± 21	70.5 ± 5.9	2020 ± 0.8	83.1 ± 4.8	93.1 ± 0.6			
Cu ₅₀ Cd ₂₅	18.7 ± 5.0	38.3 ± 6.3	464 ± 53	5.56 ± 6.84	202 ± 19	3.91 ± 2.50	1360 ± 0.3	221 ± 21	50.0 ± 2.7			
Cu ₁₀₀ Cd ₂₅	20.6 ± 5.2	83.1 ± 4.8	510 ± 59	4.66 ± 7.62	208 ± 19	5.94 ± 3.05	1720 ± 0.4	90.3 ± 3.8	101 ± 0.5			
Cu ₂₀₀ Cd ₂₅	18.8 ± 5.0	117 ± 5.7	382 ± 42	4.53 ± 5.47	172 ± 14	6.02 ± 3.07	1730 ± 0.4	53.1 ± 6.4	67.2 ± 0.8			
Cu ₅₀ Cd ₄₅	41.5 ± 6.4	49.0 ± 6.5	619 ± 73	6.75 ± 9.44	286 ± 30	4.04 ± 2.54	1670 ± 0.3	70.0 ± 5.9	66.3 ± 0.8			
Cu ₁₀₀ Cd ₄₅	33.6 ± 6.1	78.5 ± 5.3	545 ± 64	6.00 ± 8.20	261 ± 26	4.18 ± 2.58	1390 ± 0.3	129 ± 8	37.2 ± 1.0			
Cu ₂₀₀ Cd ₄₅	36.9 ± 6.2	144 ± 10	503 ± 58	6.16 ± 7.50	245 ± 24	7.86 ± 3.47	1660 ± 0.5	53.1 ± 6.4	55.3 ± 0.8			

Таблица 3. Окончание

Ацетатно-аммонийный буфер с ЭДТА										
Вариант	Cd	Cu	Fe	Mn	Sr	Zn	Ca	K	Mg	Na
1M HCl										
Контроль	1.23 ± 0.84	1.87 ± 1.75	1590 ± 199	295 ± 31	60.1 ± 6.3	6.31 ± 3.14	2270 ± 290	540 ± 63	342 ± 37	3270 ± 420
Zn ₀ Cd ₄₅	35.9 ± 6.2	3.00 ± 2.20	1490 ± 190	256 ± 26	40.3 ± 6.3	5.86 ± 3.03	2490 ± 310	578 ± 68	325 ± 35	3340 ± 420
Zn ₅₀ Cd ₄₅	35.4 ± 6.2	2.51 ± 2.02	1480 ± 180	228 ± 22	53.3 ± 6.4	37.3 ± 6.2	2490 ± 320	543 ± 63	312 ± 33	3220 ± 410
Zn ₁₀₀ Cd ₄₅	33.7 ± 6.1	1.72 ± 1.68	1400 ± 170	229 ± 22	56.0 ± 6.4	64.9 ± 6.2	2800 ± 360	541 ± 63	342 ± 37	3240 ± 410
Zn ₁₅₀ Cd ₄₅	38.5 ± 6.3	1.93 ± 1.77	1440 ± 180	241 ± 24	64.4 ± 6.2	121 ± 6.6	2720 ± 340	488 ± 56	326 ± 35	3240 ± 410
Cu ₅₀ Cd ₂₅	25.6 ± 5.6	33.9 ± 6.1	1210 ± 150	203 ± 19	71.5 ± 5.8	5.89 ± 3.04	2240 ± 280	465 ± 53	292 ± 31	3110 ± 390
Cu ₁₀₀ Cd ₂₅	23.6 ± 5.5	91.6 ± 3.6	1610 ± 200	288 ± 30	43.9 ± 6.4	7.31 ± 3.36	2450 ± 310	542 ± 63	327 ± 35	3150 ± 400
Cu ₂₀₀ Cd ₂₅	25.0 ± 5.6	155 ± 12	1330 ± 170	242 ± 24	43.5 ± 6.4	6.07 ± 3.08	2800±360	503 ± 58	314 ± 33	2890 ± 370
Cu ₅₀ Cd ₄₅	41.9 ± 6.4	47.2 ± 6.5	1580 ± 200	321 ± 34	42.3 ± 6.4	10.1 ± 3.9	2700 ± 340	469 ± 54	356 ± 39	2990 ± 380
Cu ₁₀₀ Cd ₄₅	42.7 ± 6.4	86.6 ± 4.4	1700 ± 210	345 ± 37	75.8 ± 5.5	6.98 ± 3.29	2680 ± 340	494 ± 57	339 ± 37	3090 ± 390
Cu ₂₀₀ Cd ₄₅	41.6 ± 6.4	164 ± 13	1470 ± 180	296 ± 31	50.5 ± 6.5	10.9 ± 4.0	2780 ± 350	494 ± 57	326 ± 35	3040 ± 390
HNO ₃ 1: 1										
Контроль	0.70 ± 1.07	3.62 ± 2.41	4930 ± 630	365 ± 40	59.0 ± 6.4	17.0 ± 4.9	2380 ± 300	761 ± 92	1040 ± 130	2910 ± 370
Zn ₀ Cd ₄₅	33.0 ± 6.1	4.14 ± 2.57	6060 ± 780	409 ± 463	82.6 ± 4.9	20.4 ± 5.2	2600 ± 330	866 ± 105	1240 ± 150	2710 ± 340
Zn ₅₀ Cd ₄₅	31.7 ± 6.0	4.00 ± 2.53	5390 ± 690	317 ± 34	91.8 ± 3.5	51.5 ± 6.5	2540 ± 320	796 ± 96	1110 ± 140	2650 ± 340
Zn ₁₀₀ Cd ₄₅	27.1 ± 5.7	3.66 ± 2.42	4750 ± 610	289 ± 30	70.0 ± 5.9	72.0 ± 5.8	2490 ± 310	769 ± 93	1000 ± 120	2680 ± 340
Zn ₁₅₀ Cd ₄₅	28.4 ± 5.8	4.47 ± 2.67	5370 ± 690	399 ± 45	75.6 ± 5.5	80.1 ± 5.2	2470 ± 310	685 ± 82	991 ± 121	2570 ± 330
Cu ₅₀ Cd ₂₅	18.8 ± 5.0	45.2 ± 6.4	5490 ± 700	347 ± 38	36.0 ± 6.2	20.4 ± 5.2	2520 ± 320	699 ± 84	1040 ± 130	2720 ± 340
Cu ₁₀₀ Cd ₂₅	23.0 ± 5.4	101 ± 1	6270 ± 800	424 ± 48	62.2 ± 6.3	21.4 ± 5.3	2540 ± 320	770 ± 93	1160 ± 140	2800 ± 360
Cu ₂₀₀ Cd ₂₅	23.5 ± 5.5	173 ± 15	5640 ± 720	426 ± 48	80.3 ± 5.1	19.3 ± 5.1	2830 ± 360	798 ± 96	1050 ± 130	2840 ± 360
Cu ₅₀ Cd ₄₅	39.4 ± 6.3	53.5 ± 6.4	6130 ± 780	553 ± 65	70.6 ± 5.9	20.9 ± 5.2	2660 ± 340	809 ± 98	1160 ± 140	2860 ± 360
Cu ₁₀₀ Cd ₄₅	36.7 ± 6.2	96.0 ± 2.5	6390 ± 820	441 ± 50	75.8 ± 5.5	25.7 ± 5.6	2780 ± 350	841 ± 102	1220 ± 150	2880 ± 360
Cu ₂₀₀ Cd ₄₅	25.5 ± 5.6	110 ± 4	4110 ± 520	284 ± 30	97.1 ± 2.2	14.0 ± 4.5	2350 ± 300	659 ± 78	869 ± 105	2810 ± 360

нарушению функционирования ферментативных систем, индуцируют образование перекисных и свободнорадикальных соединений. Когда эти соединения реагируют со структурными и ферментативными системами клеток, то возникают обширные повреждения в клеточных структурах, нарушается работа ферментативных циклов метаболизма. Все эти процессы вместе понимаются под общим термином окислительный стресс [4, 5, 18].

Одним из маркеров интенсивности окислительного стресса является малоновый диальдегид, образующийся при окислении липидов плазмалеммы свободными радикалами, образование которых может индуцироваться катионами ТМ. Это обстоятельство делает данный метаболит важным индикатором состояния растительного организма. Чем больше его содержание, тем о более остром стрессе можно говорить, который потом проявляется в визуальном различии угнетении процесса роста и развития растений.

Результаты количественной оценки содержания МДА в тканях растений ячменя представлены на рис. 3.

Можно отметить, что при внесении в почву одного кадмия в дозе 45 мг/кг содержание МДА практически не отличалось от контроля, и даже было несколько меньше такового. Это свидетельствовало о том, что растения еще не испытывали серьезного окислительного стресса. Вероятно, механизмы селективной адсорбции и транспорта ионов при такой дозе поллютанта достаточно эффективно справлялись с задачей ограничения проникновения нежелательных ионов в клетки.

Иное явление наблюдали при добавлении в почву различных доз микроэлементов. Внесение цинка изменяло окислительный статус растений ячменя незначительно. При минимальной дозе цинка уровень МДА несколько возрастал, но в пределах ошибки, и в целом он не отличался от контроля. При дозе

цинка 100 мг/кг содержание МДА еще более возрастало, достигая уровня 116% от контрольного, но при 150 мг/кг снова снижалось. Таким образом, цинк не оказывал заметного воздействия на уровень перекисного окисления липидов.

По мере добавления в почву, уже содержащую кадмий в дозе 25 мг/кг, все возрастающих доз меди содержание МДА становилось больше, чем в контроле и при внесении цинка, но не существенно. В целом наблюдали случайные изменения этого показателя, не связанные с дозой меди.

Наиболее показательными были результаты, полученные в вариантах с внесением кадмия 45 мг/кг. При дозах меди 100 и 150 мг/кг наблюдаемая закономерность практически не отличалась от таковой для половинной дозы кадмия (25 мг/кг). Однако при дозе меди 200 мг/кг отмечали резкий рост содержания МДА (225% от контроля). Вероятно, при совместном воздействии кадмия и меди в такой концентрации барьеры, препятствующие поступлению ТМ в клетки, уже не справлялись со своей задачей, и происходил окислительный взрыв. Это, вместе с другими аспектами развития токсического стресса, и приводило к подавлению роста и развития растительного организма.

На основе анализа данных содержания МДА можно сделать выводы, что внесение ТМ в большинстве выбранных доз не оказывало существенного воздействия на уровень перекисного окисления липидов плазмалеммы вне зависимости от состава внесенной в почву смеси металлов. Вероятно, барьерные механизмы, контролирующие поступление и транспорт ионов в растительном организме, достаточно эффективно препятствовали поступлению ионов ТМ в клетки, и потому окислительный стресс не развивался. Или, как вариант, окислительный стресс удавалось ослабить благодаря синтезу антиоксидантов. Лишь при наибольших дозах меди и кадмия антиокислительные системы

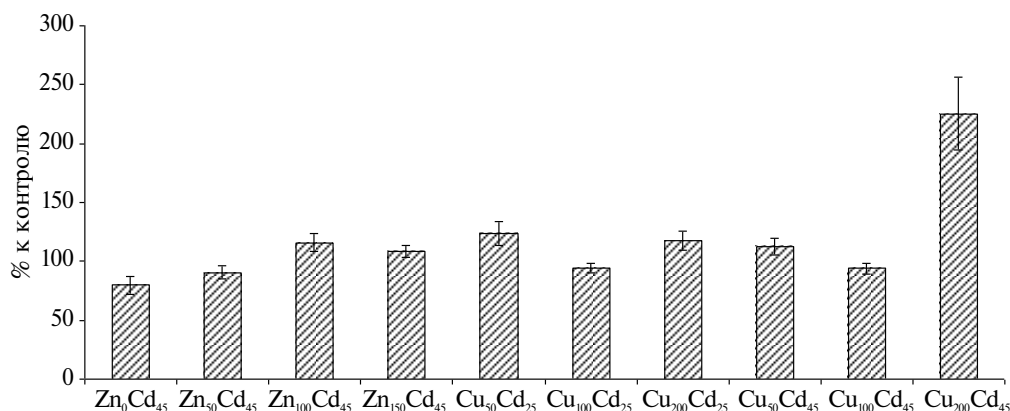


Рис. 3. Содержание МДА в тканях 30-суточных растений ячменя сорта Зазерский 85.

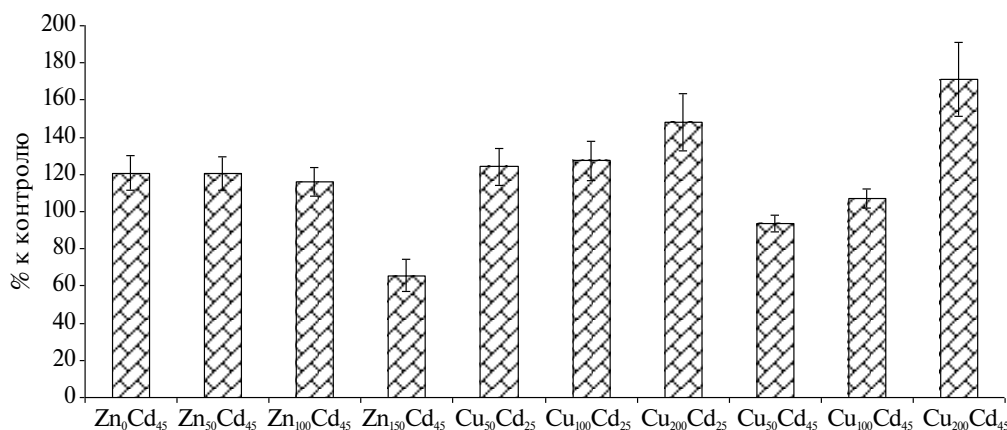


Рис. 4. Общее содержание низкомолекулярных антиоксидантов в тканях растений ячменя сорта Зазерский 85.

растительного организма не справлялись со стрессовой нагрузкой, что и приводило к резкому возрастанию содержания МДА, и как итог, к глубокому угнетению растений.

Учитывая полученные результаты, было логично проанализировать общее содержание низкомолекулярных антиоксидантов (таких как аскорбиновая кислота, полифенолы, флавоноиды и др.) в тканях растений ячменя (рис. 4).

Полученные результаты отличались в зависимости от состава и концентрации внесенных в почву металлов. При внесении одного кадмия в дозе 45 мг/кг содержание антиоксидантов возрастало в среднем до 120% от контроля. Это говорит о том, что в тканях растений все же наблюдался повышенный выход свободных радикалов (хотя это и не приводило к значимому росту содержания МДА (рис. 3)), на что организм отвечал повышенным синтезом антиоксидантов. Добавление в почву цинка практически не меняло величины этого показателя, только при дозе цинка 150 мг/кг он снижался до 65% от контроля. Такие результаты свидетельствовали о том, что цинк, обладая низкой токсичностью, не вызывал развития окислительного стресса в диапазоне доз 50–150 мг/кг. Поэтому при внесении цинка не наблюдали ни угнетения роста и развития растений, ни повышенного образования МДА. Снижение количества антиоксидантов при максимальной дозе цинка можно увязать с развитием стимулирующего эффекта при действии данного ТМ в изученной концентрации (рис. 1, 2). Вероятно, окислительный стресс купировался какими-то иными механизмами, активно работающими в условиях возросшей интенсивности метаболизма.

Добавление в почву меди влияло на выработку антиоксидантов иначе. В случае внесения кадмия в дозе 25 мг/кг при дозах меди 50 и 100 мг/кг наблюдали закономерность, аналогичную воздействию цинка: содержание

антиоксидантов возрастало до 124% от контроля. При внесении дозы меди 200 мг/кг содержание антиоксидантов возрастало относительно контроля в среднем на 148%. Судя по всему, это было связано с постепенным развитием окислительного стресса, хотя и в не слишком большой степени, поскольку морфометрические показатели растений при этой дозе уменьшались незначительно (рис. 2) и содержание МДА практически не менялось (рис. 3).

При внесении кадмия в дозе 45 мг/кг описанные тенденции становились более отчетливыми. При дозе меди 50 мг/кг содержание антиоксидантов практически не отличалось от контроля (93%). Однако эта величина была заметно меньше, чем при той же дозе меди, но половинной — кадмия (25 мг/кг). Такую ситуацию можно увязать с наличием стимуляции роста и развития растений в этом варианте (рис. 1), в то же время при половинной дозе кадмия стимуляция не развивалась. Как и в случае с максимальной дозой цинка, вероятно, стимуляция была связана с активизацией метаболических процессов. В подобной ситуации окислительный стресс или не развивался, или ослаблялся благодаря иным механизмам (например, работе антиокислительных ферментов). При дозе меди 100 мг/кг содержание антиоксидантов несколько возрастало (106% от контроля), но не существенно, снова оставаясь меньше варианта с половинной дозой кадмия и такой же — меди (127%). В этом варианте стимулирующий эффект исчезал, но и угнетения еще не развивалось (рис. 1, 2). Активность метаболических процессов уже не способствовала устранению воздействия стресса, потому большую роль начинали играть антиоксиданты. Наконец, при максимальной дозе меди (200 мг/кг), когда развивалось глубокое угнетение растений, наблюдали максимальное накопление антиоксидантов (171% от контроля). Высокие уровни МДА в таком варианте (рис. 3) свидетельствовали о развитии состояния окислительного взрыва, для преодоления которого защитные

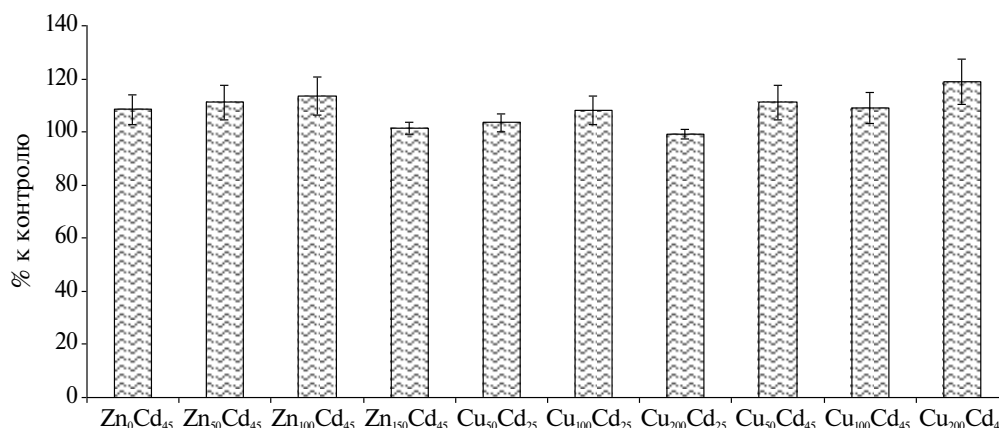


Рис. 5. Общее содержание сырого протеина в тканях растений ячменя сорта Зазерский 85.

системы организма стремились к усилению синтеза антиоксидантов.

Вместе с показателями, прямо связанными с ответом растительного организма на средового стресс, было интересно оценить и другие параметры, которые отражают общее состояние организма, его обмена и накопления различных биологически значимых веществ, например, белков. Известно, что ТМ способны нарушать азотистый обмен растений [3], поэтому оценка содержания белков может приоткрыть эту сторону ответа организма на стресс. Можно предположить, что в тех случаях, где наблюдали стимуляцию роста и развития растений, будет отмечаться повышенный синтез белков, а в пробах с угнетенными растениями, наоборот — пониженный. Добавление микроэлементов способно также в разной степени изменить полученную картину.

Диаграмма, отражающая содержание общего сырого протеина в исследованных вариантах, представлена на рис. 5.

Показано, что внесение в почву как одного кадмия, так и его смеси с цинком или медью не оказывало существенного влияния на синтез белков в растительном организме. При добавлении одного кадмия содержание сырого протеина несколько возрастало по сравнению с контролем, но не существенно (108% от контроля). Добавление цинка практически не оказывало влияния на этот процесс, а при максимальной его дозе (150 мг/кг) содержание белка несколько снижалось, но было не меньше контроля (101%). Как уже говорилось ранее, цинк в такой дозе вызывал развитие стимуляции жизненных процессов растений ячменя, что и привело к увеличению синтеза белков.

В вариантах, где вносили вместе с кадмием медь, содержание белков практически не отличалось от такового в вариантах, где в почву был добавлен цинк. При дозе кадмия 25 мг/кг наблюдали некоторые

изменения содержания протеина, но в пределах контроля (99–107% от контроля). При дозе кадмия 45 мг/кг общее содержание протеина оказалось даже больше, чем при использовании половинной дозы кадмия (до 119% от контроля при дозе меди 200 мг/кг), однако во всех вариантах отличалось не существенно (109–119%).

Таким образом, можно утверждать, что содержание белков нельзя рассматривать как надежный показатель оценки уровней средового стресса, развивающегося в растительном организме при воздействии ТМ. Даже у растений, демонстрирующих глубокое угнетение, содержание протеина было больше контроля. Полученные данные значимо не различались в зависимости от состава внесенных в почву смесей солей ТМ и их концентрации. В то же время отмечено, что внесение в почву ТМ способствовало некоторому увеличению синтеза протеина во всех рассмотренных вариантах.

Структура урожая. Особый интерес представляют результаты, полученные в конце вегетации растений ячменя. На их основе можно сделать вывод о том, сохраняется ли устойчивость или чувствительность каждого сорта на протяжении всей жизни растений, и как эти особенности сказываются на хозяйственно ценных качествах ячменя.

В целом анализ структуры урожая позволил получить достаточно интересные данные, отражающие особенности совместного действия ТМ на растения ячменя. Отмечено, что внесение в почву кадмия в дозе 45 мг/кг приводило к снижению продуктивности растений. Например, масса соломы сокращалась примерно до 68% от контроля, а масса зерна уменьшалась весьма значительно — до 20%. Такой важный показатель, характеризующий хозяйственную ценность полученного зерна — масса 1000 зерен — сокращался не столь существенно, до 81% от контроля. Влияние одного ТМ — кадмия — вело

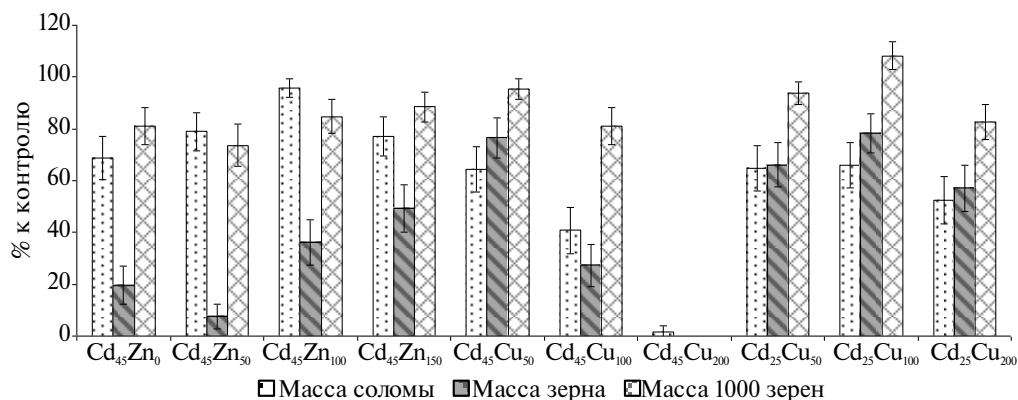


Рис. 6. Оценка структуры урожая ячменя при совместном воздействии ТМ.

к существенному уменьшению продуктивности (рис. 6).

Внесение совместно с кадмием других ТМ заметно изменяло наблюдавшуюся картину, причем в зависимости от того, какой именно ТМ и в какой дозе использовали (цинк или медь). Внесение цинка в минимальной дозе (50 мг/кг) приводило к увеличению массы соломы (до 79% от контроля), но масса зерна сокращалась еще больше, чем в случае с одним кадмием (до 7%), масса 1000 зерен уменьшалась, но не существенно (73%). При дальнейшем увеличении дозы цинка до 100 мг/кг удавалось до определенной степени ослабить токсическое воздействие кадмия. Масса соломы возвращалась к близким к контролю величинам (96%), возрастала и масса 1000 зерен (85%), но масса зерна хотя и увеличивалась, но не столь существенно (до 36%). Наблюдаемый эффект продолжал развиваться и при максимальной дозе цинка (150 мг/кг). При такой концентрации цинка масса соломы, однако, до некоторой степени сокращалась (до 77%), но оставалась на уровне несколько более высоком, чем при внесении одного кадмия. Масса 1000 зерен изменялась незначительно (88%), а масса зерна возрастала, достигая 49% от контроля. Таким образом, можно утверждать, что цинк, как ценный микроэлемент, позволяет растительному организму преодолеть последствия стресса, вызванные внесением в почву токсического катиона Cd^{2+} , при этом использованные дозы цинка не столь велики, чтобы сами по себе спровоцировать стресс. Главным образом воздействие цинка касается развития вегетативной биомассы, в то время как возможности растения к формированию семенного потомства оставались ограниченными. Наблюдали формирование большого количества пустых колосьев, чего не отмечали в контроле.

Иную тенденцию наблюдали при внесении в почву меди совместно с кадмием. В случае, если использовали дозу кадмия 25 мг/кг, то при минимальной

концентрации меди (50 мг/кг) масса соломы оказалась близкой к той, что была получена в варианте с внесением только одного кадмия в дозе 45 мг/кг (65% от контроля). Похожая величина была отмечена для массы зерна (66%), а масса 1000 зерен находилась на близком к контролю уровню (93%). Увеличение дозы меди до 100 мг/кг практически не отражалось на массе соломы (66%), но позволяло в большей степени сократить токсическое воздействие кадмия на массу зерна (78% от контроля), при этом масса 1000 зерен демонстрировала явную стимуляцию развития растений — до 108% от контроля. При дальнейшем увеличении дозы меди (200 мг/кг) стимулирующий эффект на растения исчезал, и медь начинала оказывать токсическое воздействие. Масса соломы уменьшалась до 52% от контроля, масса зерна — до 57%, масса 1000 зерен — до 82%. Таким образом, величины изученных показателей оказывались меньше, чем при минимальной дозе меди, но в пределах ошибки. Следует отметить, что при максимальной дозе меди удалось получить большее количество зерна, чем при максимальной дозе цинка, хотя вегетативная масса была меньше. При действии меди на растения почти не развивалось пустых колосьев, хотя качество семян и ухудшалось (они становились мельче, приобретали деформации, медленнее созревали) по мере роста концентрации меди.

При рассмотрении варианта с внесением в почву дозы кадмия 45 мг/кг сначала стимулирующее, а потом и токсическое воздействие меди проявилось более ярко. При минимальной дозе меди (50 мг/кг) масса соломы мало отличалась от таковой, полученной при внесении одного кадмия (64% от контроля). В то же время отмечено явно положительное воздействие меди на формирование зерна: масса его возрастала по сравнению с вариантом без внесения меди до 76% от контроля (т.е. почти в 4 раза). Масса 1000 зерен оказывалась близкой к контрольной величине (95%). При увеличении дозы меди до 100 мг/кг

стимулирующий эффект данного ТМ исчезал, сменяясь токсическим. Масса соломы уменьшалась до 41% от контроля, масса зерна — до 27%, масса 1000 зерен — до 81%. При максимальной дозе меди 200 мг/кг отмечено полное угнетение процессов роста и развития растений ячменя. Урожая в этом варианте получить практически не удалось, в целом растения были малорослыми и слабыми, некоторые из них погибли.

Таким образом, проанализировав совместное с кадмием воздействие меди и цинка на структуру урожая растений ячменя, можно сделать следующие выводы. И медь, и цинк, будучи необходимыми для растительного организма микроэлементами, способны уменьшать вызываемые кадмием эффекты токсического стресса. Однако их воздействие неодинаково. Цинк способствовал развитию вегетативной биомассы, но на формирование урожая семян оказывал меньшее влияние. Масса зерна по мере роста концентрации цинка увеличивалась, но все равно оставалась значительно меньше контроля. Наблюдалось появление большого количества пустых колосьев, ухудшалось созревание семян.

Внесение меди оказывало стимулирующее действие и на развитие вегетативной биомассы, и урожай семян, но при этом сама медь оказывалась более опасным ТМ, чем цинк. Потому наиболее отчетливо ее стимулирующее действие проявлялось при меньшей (25 мг/кг) дозе кадмия, а при большей (45 мг/кг) быстро развивалось глубокое угнетение растений. Хотя можно отметить, что при внесении меди удавалось в целом получить больший урожай, чем в случае с цинком, и пустых колосьев встречалось немного. Тем не менее, учитывая наблюдаемые закономерности, логично предположить, что в настоящем исследовании еще не был полностью раскрыт стимулирующий потенциал цинка, при дальнейшем увеличении его дозы удалось бы в большей степени сократить воздействие вызванного кадмием стресса, еще не достигнув того предела, за которым оба ТМ проявляли себя исключительно как токсиканты.

Содержание ТМ в тканях растений. Поскольку ячмень является одной из основных сельскохозяйственных культур, то крайне важно исследовать не только воздействие токсикантов на морфофизиологические особенности растительного организма, но и оценить их накопление в товарных частях растения. Конечная цель такого рода исследований — обеспечение продовольственной безопасности в условиях земледелия в регионах с техногенно-загрязненными почвами. Хотя изучение самого по себе феномена устойчивости к ТМ имеет важное фундаментальное значение, также не стоит упускать из виду практические задачи получения качественной и безопасной сельскохозяйственной продукции. Данные содержания ТМ в надземной биомассе растений ячменя приведены на рис. 7.

Для того чтобы более наглядно показать различия в содержании ТМ по сравнению с контрольным вариантом, измеренные показатели даны в виде соотношения показателя в каждом из вариантов к контрольной величине (в долях единицы). То есть, если на диаграмме высота столбца равна 2, то это означает, что в этом случае ткани растения накопили ТМ в 2 раза больше, чем в контроле.

На рис. 7а отражены уровни накопления кадмия во всех вариантах опыта. Хорошо видно, что при внесении одного кадмия отмечено высокое накопление данного ТМ в тканях растений ячменя и в первую очередь — в соломе. Например, в соломе кадмия содержалось в 45 раз, в зерне — в 25 раз больше, чем в контроле. Внесение ТМ-микроэлементов позволило уменьшить накопление кадмия. В случае, если кадмий вносили в почву в дозе 45 мг/кг, то уже минимальная доза меди (50 мг/кг) позволяла заметно ограничить поступление кадмия (в 27 раз больше, чем в контроле для соломы, в 10 раз — для зерна). Увеличение концентрации меди до 100 мг/кг мало изменяло наблюдаемую в случае с соломой картину (в 25 раз больше, чем в контроле), но приводило к некоторому росту накопления кадмия в зерне (в 14 раз больше, чем в контроле). Таким образом, можно утверждать, что по мере роста дозы меди постепенно развивалось совместное токсическое действие 2-х ТМ. Оно было еще не слишком заметно при дозе меди 100 мг/кг, но вероятно, отчетливо проявилось бы при дозе 200 мг/кг. Однако накопление кадмия (и других ТМ) при этой дозе оценить не удалось, т.к. растения погибли на раннем этапе развития.

В данном эксперименте не оценивали накопление кадмия при дозе этого ТМ 25 мг/кг (по результатам наших предшествующих исследований эта доза была признана недостаточной для развития отчетливо обнаруживаемого стресса [16, 17]). Впрочем, было важно оценить, как по сравнению с контролем изменяется накопление кадмия в случае, если его в дозе 25 мг/кг вносили в почву совместно с медью. Отмечено, что в соломе кадмий накапливался в меньшем количестве, чем в варианте с Cd_{45} , при этом по мере роста дозы меди этот показатель сначала снижался (в 21 раз больше, чем в контроле при дозе меди 50 мг/кг и в 12 раз больше при дозе меди 100 мг/кг). Впрочем, при дозе меди 200 мг/кг содержание кадмия в соломе возрастало до примерно такого же уровня, каковой отмечен в варианте $Cd_{45}Cu_{50}$, но был все же меньше, чем в варианте Cd_{45} (в 28 раз больше контроля). Содержание кадмия в зерне было в вариантах $Cd_{25}Cu_{50}$ и $Cd_{25}Cu_{100}$ примерно таким же, как в варианте Cd_{45} (в 14 раз больше контроля в обоих случаях), однако при максимальной дозе меди происходило неожиданное снижение накопления кадмия в зерне (в 7 раз больше контроля).

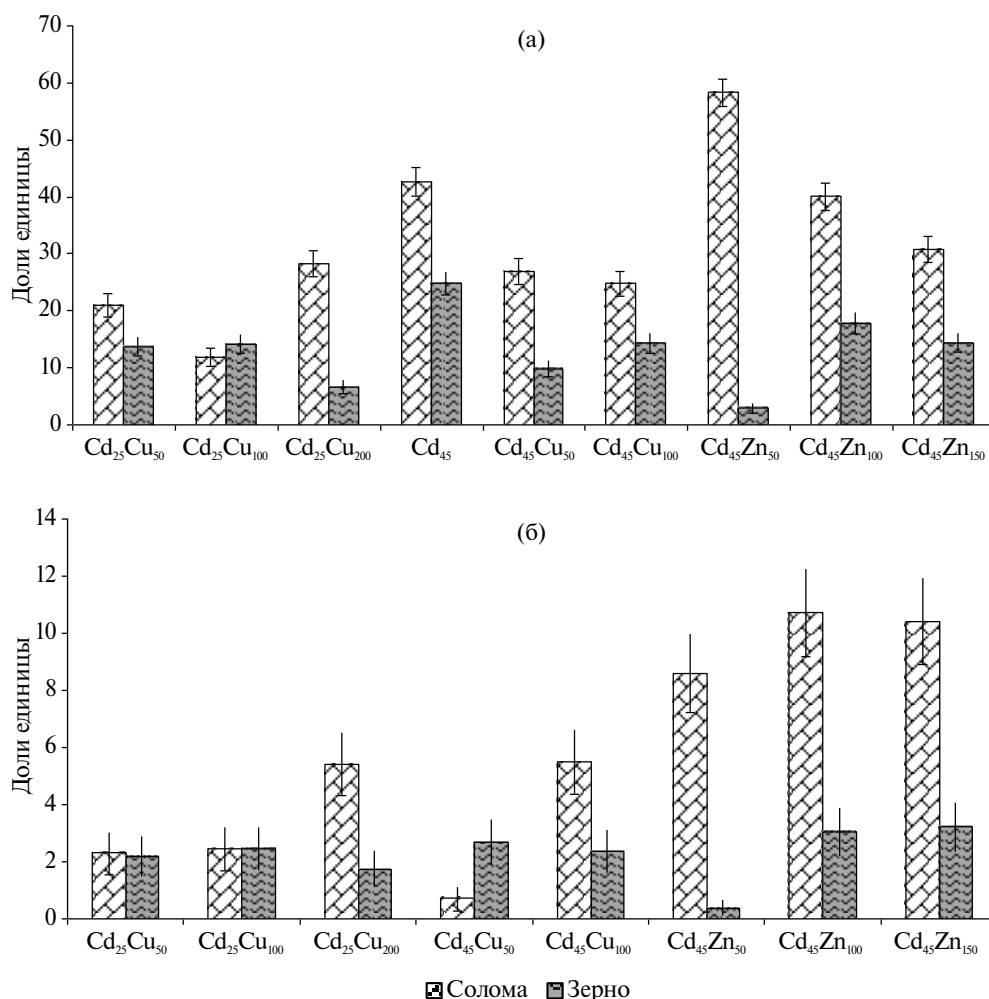


Рис. 7. Содержание ТМ в надземной биомассе растений ячменя: (а) — кадмий, (б) — медь (для вариантов с внесением меди) и цинк (для вариантов с цинком).

Внесение совместно с кадмием цинка изменило накопление Cd^{2+} следующим образом. В варианте с минимальной дозой цинка $\text{Cd}_{45}\text{Zn}_{50}$ содержание кадмия в соломе резко возрастало, становясь гораздо больше, чем при внесении одного кадмия (в 58 раз больше контроля), при этом накопление в зерне, напротив, значительно уменьшалось (в 3 раза больше, чем в контроле). По мере роста дозы цинка содержание кадмия в соломе неуклонно снижалось, становясь в итоге меньше, чем при внесении одного кадмия (в 40 раз больше контроля в варианте $\text{Cd}_{45}\text{Zn}_{100}$ и в 31 раз больше контроля в варианте $\text{Cd}_{45}\text{Zn}_{150}$). Накопление кадмия в зерне увеличивалось, но было меньше, чем при внесении одного кадмия (18 и 14 раз соответственно). Таким образом, медь способствовала снижению накопления кадмия и в соломе, и в зерне, а цинк, снижая накопление Cd^{2+} в зерне, стимулировал его переход в солому.

Кроме накопления кадмия, было оценено содержание меди и цинка в тех вариантах, где их вносили.

В тех вариантах, где указанные металлы не вносили, их содержание оставалось на уровне контроля.

В целом медь накапливалась в надземной биомассе в количествах существенно меньших, чем кадмий (рис. 7а). В вариантах $\text{Cd}_{25}\text{Cu}_{50}$ и $\text{Cd}_{25}\text{Cu}_{100}$ содержание меди по сравнению с контролем возрастало незначительно как в соломе, так и в зерне ($\approx$ в 2 раза). В варианте $\text{Cd}_{25}\text{Cu}_{200}$ накопление меди в соломе заметно увеличивалось (более чем в 5 раз от контроля), но в зерне даже уменьшалось (в 1.7 раза от контроля). Иной результат был получен в случаях, когда в почву вносили кадмий в дозе 45 мг/кг. В варианте $\text{Cd}_{45}\text{Cu}_{50}$ в соломе меди накапливалось даже меньше, чем при внесении дозы кадмия 25 мг/кг (в 0.7 раза больше контроля), а в зерне она содержалась примерно в таком же количестве, как и в варианте Cd_{25} (в 3 раза больше контроля). В варианте $\text{Cd}_{45}\text{Cu}_{100}$ накопление меди в соломе усиливалось (в 5 раз больше контроля), но в зерне значимо не менялось (более чем в 2 раза больше контроля).

Иная тенденция отмечена для накопления цинка. В соломе цинк накапливался в значимо большем количестве, чем медь во всех вариантах с ней. Например, в варианте $Cd_{45}Zn_{50}$ в соломе содержание цинка было более чем в 8 раз больше контроля. По мере увеличения концентрации цинка его накопление в соломе тоже росло, но не существенно (в 10 раз больше по сравнению с контролем в обоих вариантах $Cd_{45}Zn_{100}$ и $Cd_{45}Zn_{150}$). В зерне при минимальной дозе цинк накапливался в очень низкой концентрации (в 0.38 раза больше контроля), по мере роста дозы цинка его накапливалось больше (примерно в 3 раза больше контроля как в варианте $Cd_{45}Zn_{100}$, так и в варианте $Cd_{45}Zn_{150}$). Следовательно, цинк демонстрировал тенденцию к накоплению в соломе, но не в зерне. Аналогично его внесение сказывалось и на накоплении кадмия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, удалось выяснить, что внесение в почву токсического тяжелого металла (ТМ) без четко выявленной физиологической функции (кадмия) приводило к развитию стресса и заметному угнетению процессов роста и развития растений ярового ячменя. При совместном внесении с кадмием другого ТМ, обладающего также свойствами питательного микроэлемента (медь или цинк), наблюдаемые эффекты в существенной мере изменялись. Конкретные особенности влияния смеси ионов металлов на растительный организм зависели также от дозы поллютанта (кадмий) и микроэлемента (медь или цинк).

Установлено, что в целом добавление микроэлемента способствовало ослаблению токсических эффектов. При малых дозах микроэлемента стимулирующий эффект был выражен незначительно, а при высоких постепенно исчезал, тогда на первый план выходило совместное токсическое действие обоих ТМ. При этом цинк, обладая относительно невысокой токсичностью, проявлял себя в основном как стимулятор, почти не обнаруживая токсического воздействия, в то время как медь при высокой дозе действовала как поллютант, и растения оказывались подавленными в большей степени, чем при внесении одного кадмия. При этом наиболее ярко такие изменения воздействия меди проявлялись при более высокой (45 мг/кг) дозе кадмия, чем при относительно низкой (25 мг/кг).

На основе всех рассмотренных данных можно утверждать, что высказанное в начале исследования предположение, что внесение в почву совместно с ТМ, обладающим главным образом токсическим действием, еще одного ТМ — микроэлемента, существенно модифицировало наблюдаемый ответ растительного организма. Цинк, как менее токсичный элемент, в целом оказывал стимулирующее действие

и позволял ослабить воздействие стресса. Медь, будучи более токсичной, проявляла стимулирующее действие лишь при небольших дозах (или когда поллютант (в данном случае кадмий) был внесен в умеренной концентрации), а при более высоких дозах меди она становится синергистом кадмия, приводя к стойкому угнетению растений.

Основным итогом работы явилось подтверждение гипотезы о том, что внесение вместе с ТМ, обладающим токсическим действием еще и ТМ, которые в низких дозах обладают функциями микроэлементов, способствовало ослаблению токсического стресса и восстановлению жизненных показателей и продуктивности растений ячменя.

Достигнутые результаты имеют важное практическое значение для задач восстановления плодородия почв, подвергшихся загрязнению ТМ в результате хозяйственной деятельности человека. Несомненно, фундаментальное значение работы, как углубляющей понимание механизмов действия ТМ на растительные организмы, а также механизмов взаимодействия различных ТМ, обладающих и не обладающих физиологической ролью. В соответствии с этим, полученные данные могут сыграть существенную роль в повышении продовольственной безопасности страны, способствуя преодолению последствий техногенного загрязнения агроценоза и обеспечения населения качественной и безопасной сельскохозяйственной продукцией. Собранные данные имеют определенный потенциал в рамках задач по импортозамещению семенных материалов, обладающих повышенной устойчивостью к действию содержащихся в почве токсикантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Гераськин С.А.* Методика оценки экологических последствий техногенного загрязнения агроэкосистем. М.: Изд-во МГУ, 2004. 206 с.
2. *Dandan L., Dongmei Z., Peng W., Nanyan W., Xiangdong Z.* Subcellular Cd distribution and its correlation with antioxidant enzymatic activities in wheat (*Triticum aestivum*) roots // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2011. V. 74. P. 874–881.
3. *Clemens S.* Molecular mechanisms of plants metal tolerance and homeostasis // *Planta*. 2001. V. 212. P. 475–486.
4. *Физиология растений* / Под ред. Ермакова И.П. М.: Academia, 2005. 640 с.
5. *Якушкина Н.И., Бахтенко Е.Ю.* Физиология растений. М.: Владос, 2004. 464 с.
6. *Qin R., Wang C., Chen D., Bjorn L.O., Li S.* Copper-induced root growth inhibition of *Allium cepa* var. *Agrogarum* L. involves disturbances in cell division and

- DNA damage // *Environ. Toxicol. Chem.* 2015. V. 34. № 5. P. 1045–1055.
7. Позняк С.С. Содержание тяжелых металлов Pb, Ni, Zn, Cu, Mn, Zr, Cr, Co и Sn в почвах центральной зоны республики Беларусь // *Эконом. и эколог. менеджмент.* 2011. № 1. С. 23–35.
 8. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 260 с.
 9. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
 10. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / Под ред. Санжаровой Н.И., Цыгвинцева П.Н. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2019. 398 с.
 11. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // *Arch. Biochem. Biophys.* 1968. V. 125. № 1. P. 189–198.
 12. Vijayalakshmi M., Ruckmani K. Ferric reducing antioxidant power assay in plant extract // *Bangladesh J. Pharmacol.* 2016. V. 11. P. 570–572.
 13. Lowry D.H., Rosebrough H.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folinphenol reagent // *J. Biol. Chem.* 1951. V. 193. № 1. P. 265–275.
 14. Плешков Б.П. Практикум по биохимии растений. М.: Колос, 1976. 256 с.
 15. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / Под ред. Артюшина А.М. М.: ЦИНАО, 1992. 56 с.
 16. Гераськин С.А., Дикарев А.В., Лыченкова М.А. Дифференциация сортов ячменя по устойчивости к кадмию сохраняется на протяжении всего жизненного цикла растений // *Агрохимия.* 2021. № 2. С. 78–85.
 17. Гераськин С.А., Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Анализ внутривидового полиморфизма ячменя по устойчивости к действию кадмия // *Агрохимия.* 2021. № 8. С. 57–64.
 18. Полесская О.Г. Растительная клетка и активные формы кислорода. М.: Университет, 2007. 139 с.

Assessment of the Modifying Effect of Zinc and Copper on Toxic Stress of Barley Plants Caused by Cadmium

A. V. Dikarev^{a, #}, D. V. Dikarev^a, D. V. Krylenkin^a

^a*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”
Kiev highway 1, corp. 1, Kaluga region, Obninsk 249035, Russia*

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

In a vegetation experiment on sod-podzolic sandy loam soil with Cd²⁺ addition at doses of 25 and 45 mg/kg, we studied how the response of barley plants to the toxic effects of cadmium changes if various amounts of heavy metals (HM) with the functions of trace elements were introduced together with it, using the example of zinc and copper. In addition, several variants were laid, in which copper and zinc were also introduced along with cadmium. Thus, doses and combinations of metals were used in the experiment: Cd₄₅, Cd₂₅Cu₅₀, Cd₂₅Cu₁₀₀, Cd₂₅Cu₁₀₀, Cd₂₅Cu₂₀₀, Cd₄₅Cu₅₀, Cd₄₅Cu₁₀₀, Cd₄₅Cu₂₀₀, Cd₄₅Zn₅₀, Cd₄₅Zn₁₀₀, Cd₄₅Zn₁₅₀. Morphometric parameters (appearance, height of plants, their biomass and leaf area), biochemical parameters (accumulation of MDA, total antioxidants and crude protein), crop structure (straw weight, grain weight, 1000 grain weight) were evaluated in experimental plants. In addition, the gross content of HM and other elements in the soil and their transition to the soil solution were analyzed. It is shown that the introduction of cadmium alone led to a significant inhibition of the growth and development of barley plants. At the same time, the combined addition of HM trace elements with cadmium significantly modified the effect of cadmium. Zinc contributed to a decrease in the toxic effects of cadmium, and the intensity of this effect increased as the concentration of zinc increased, and the toxic effects of this HM at the doses considered had not yet manifested themselves. Copper, as a more toxic element, showed its stimulating effect at lower doses than zinc, and at higher doses, the development of acute stress caused by the combined toxic effects of 2 HM was observed. This is true for a dose of cadmium of 45 mg/kg, with a lower dose of cadmium (25 mg/kg), copper had a greater stimulating effect. The considered effects were primarily noted when evaluating morphometric indicators and productivity. Based on the biochemical parameters, it was not possible to draw clear conclusions about how the addition of zinc and copper changed the effects of cadmium. Apparently, it was more appropriate to use other biochemical parameters to assess stress effects. It was noted that the introduction of trace elements generally contributed to a reduction in the accumulation of cadmium in the aboveground biomass of barley plants, however, the addition of zinc led to an increased transition of cadmium into straw, but not into grain.

Keywords: spring barley, toxic stress, vegetative experience, cadmium, zinc, copper, morphometric and biochemical parameters, productivity.

УДК 632.122.1:632.118.3:631.445.25

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОФИЛЕ СВЕТЛО-СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ И РАСТЕНИЯХ АГРОЦЕНОЗОВ

© 2024 г. А. А. Уткин^{1,*}, И. Б. Нода²¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия²Станция агрохимической службы “Ивановская”
153506 с. Богородское, Ивановская обл., ул. Центральная, 8, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Представлены результаты многолетнего радиационного мониторинга светло-серой лесной почвы и культурных растений реперного участка. Корреляционным анализом определены взаимосвязи между распределением искусственных и естественных радионуклидов в профиле почвы с ее агрохимическими свойствами. Распределение радионуклидов в профиле почвы обусловлено интенсивностью подзолистого процесса. В профиле отмечена элювиально-иллювиальная дифференциация радионуклидов, когда в иллювиальном горизонте происходило увеличение их аккумуляции. По плотности загрязнения пахотного слоя почвы цезием-137 и стронцием-90 был определен удовлетворительный уровень экологической обстановки, по которому почва участка относится к незагрязненной. Построены ряды культурных растений с возрастающей способностью к накоплению цезия-137 и стронция-90 из почвы. Зерно всех зерновых культур меньше накапливало цезия-137 и стронция-90 по сравнению с соломой. Вся выращенная растительная продукция всех видов культур полностью удовлетворяла ветеринарным и гигиеническим нормативам по содержанию цезия-137 и стронция-90 в кормах (зеленая масса, солома и фуражное зерно) и продовольственном зерне. Рассчитаны коэффициенты накопления и перехода цезия-137 и стронция-90 из почвы в растения.

Ключевые слова: светло-серая лесная почва, искусственные (техногенные) радионуклиды, естественные (природные) радионуклиды, культурные растения, радиационный мониторинг.

DOI: 10.31857/S0002188124070094, EDN: CFJKZO

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и в мире проблема загрязнения почв и культурных растений агроценозов радионуклидами (**РН**) продолжает оставаться весьма острой и актуальной.

В результате проведения испытаний ядерного оружия, аварий на атомных объектах (ПО “Маяк”, проект “Глобус-1”, Чернобыльская АЭС, АЭС “Фукусима-1” и др.) и интенсивного развития ядерной энергетики в биосферу поступили значительные количества обладающих высокой биодоступностью, преимущественно долгоживущих искусственных (техногенных) радионуклидов (**ИРН**), таких как цезий-137 (¹³⁷Cs) ($T_{1/2} = 30.17$ лет) и стронций-90 (⁹⁰Sr) ($T_{1/2} = 28.79$ лет) [1, 2].

Поступающие в почву ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr способны накапливаться в растительной продукции, ухудшая ее качество, организме сельскохозяйственных

животных и человека, вызывая мутации и онкологические заболевания [3].

Кроме **ИРН** в почвах содержатся естественные (природные) радионуклиды (**ЕРН**), во многом определяющие природный радиационный фон почв [4]. К основным **ЕРН** относятся: калий-40 (⁴⁰K) ($T_{1/2} = 1.28 \times 10^9$ лет), радий-226 (²²⁶Ra) ($T_{1/2} = 1.62 \times 10^3$ лет) и торий-232 (²³²Th) ($T_{1/2} = 1.40 \times 10^{10}$ лет) [5].

В результате неконтролируемого применения минеральных удобрений и агроメリорантов (природных калийных солей, фосфоритной муки, гипса, фосфогипса, аммофоса, отходов промышленности и др.), содержащих **ЕРН**, может происходить радиоактивное загрязнение почв [6].

В Ивановской обл., как в развивающемся аграрном регионе России, в пахотном фонде почв региона в основном преобладают дерново-подзолистые почвы (92%), однако не малый

интерес в этой связи представляют и более плодородные светло-серые лесные почвы, доля которых составляет 7.6% или 24 тыс. га [7]. Контроль за содержанием и поведением в почвах и растениях *РН* является важной агроэкологической задачей современного земледелия.

Цель работы заключалась в проведении локального радиационного мониторинга светло-серых лесных почв Ивановской обл. по установлению уровней содержания и особенностей распределения по профилю светло-серой лесной почвы радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th , определении влияния отдельных агрохимических свойств почвы на поведение изученных *РН* в системе почва—культурное растение, особенностях накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr различными сельскохозяйственными культурами, возможности получения безопасной растительной продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим и ветеринарным нормативам.

Оценку радиационной ситуации по содержанию и распределению ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в светло-серых лесных почвах и культурных растениях агроценозов Ивановской обл., проводили впервые. Полученные данные, в научной литературе ранее не публиковались, что повышает ценность проведенного исследования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование агрохимических показателей и содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в профиле светло-серой лесной почвы реперного участка проводили в 2008, 2013 и 2018 гг. Почвенные образцы отбирали из слоев 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см почвы. Масса индивидуального почвенного образца составляла ≈ 0.5 кг из каждого горизонта.

Определение удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в пахотном горизонте (0–20 см) исследованной почвы и их накопление культурами проводили ежегодно в период 2009–2022 гг.

Исследование осуществляли в соответствии с ежегодным локальным мониторингом почв земель сельскохозяйственного назначения на реперном участке, расположенном в Гаврилово-Посадском р-не. Почва реперного участка в течение проведения мониторинга находилась в обработке. Площадь участка составляла 25 га.

С реперного участка с 2009 по 2022 г. с помощью тростевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы из пахотного слоя. Один смешанный образец, массой ≈ 0.5 кг составляли из 30–35 точечных проб и в среднем с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Смешанную пробу растений массой ≈ 0.5 кг натуральной влажности составляли из 8–10 точечных проб. Пробы почв и растений отбирали с одних и тех же локаций участка.

Определяли следующие показатели почвы: обменную кислотность ($\text{pH}_{\text{КСЛ}}$) — по ГОСТ Р 58594–2019, содержание органического вещества ($\text{C}_{\text{орг}}$) — по методу Тюрина в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26213–91, подвижных фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) — по ГОСТ Р 54650–2011 (по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО), обменных оснований кальция и магния (Ca и Mg) — по ГОСТ 26487–85, фракций физической глины (<0.01 мм) и ила (<0.001 мм) — по Качинскому [8].

Определение содержания изученных *РН* производили на приборе УСК “Гамма Плюс” (Россия) в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-, бета-спектрометре с использованием программного обеспечения “Прогресс”.

Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве и растительных образцах определяли согласно методическим рекомендациям [9], ^{137}Cs в растительной продукции — по ГОСТ Р 54040–2010. Гамма-спектрометрию проб почвы проводили в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л. Растительные образцы на определение ^{137}Cs и ^{90}Sr предварительно озоляли при температуре 450°C (концентрировали более чем в 10 раз), после чего золу помещали в чашки Петри (^{137}Cs) и измерительные кюветы (^{90}Sr).

Для получения данных удельной активности ^{137}Cs в растительных образцах значительно увеличивали время экспозиции до 2–5 ч и более.

Для оценки перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения рассчитывали коэффициент накопления ($K_{\text{Н}}$), равный отношению удельной активности *ИРН* в растениях (Бк/кг сухой массы) к его активности в почве (Бк/кг сухой почвы).

Коэффициент перехода ($K_{\text{П}}$) определяли как отношение удельной активности *ИРН* в растениях (Бк/кг) к плотности загрязнения ими пахотного слоя почвы на единицу площади (кБк/м²).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения признака с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном — коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием программы “Statistica” (10 версия). Оценку уровня корреляции проводили по шкале Чеддока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Агрохимическая характеристика профиля светло-серой лесной почвы представлена в табл. 1.

Обследование почвы реперного участка в 2008, 2013 и 2018 гг. с последующим усреднением показателей выявило, что вниз по профилю отмечено увеличение кислотности на 1.1 ед. pH_{KCl} , снижение содержания $C_{орг}$ на 1.8%, содержания подвижных P_2O_5 и K_2O на 146 и 223 мг/кг почвы соответственно, обменного Mg — на 1.1 смоль(экв)/100 г и глинистой фракции частиц (<0.01 мм) на 0.7%, при этом содержание обменного Ca и илистой фракции частиц (<0.001 мм) с глубиной увеличилось на 4.8 смоль (экв)/100 г и 13.7% соответственно.

Варьирование всех исследованных агрохимических показателей почвы подчинялось закону нормального распределения. Величина критерия Шапиро–Уилка удовлетворяла следующему условию: $p > 0.05$.

Об участии компонентов твердой фазы почв в процессах закрепления $РН$ можно судить по их присутствию в профиле [10].

Результаты определения удельной активности изученных $РН$ в профиле почвы позволили дать

детальную характеристику радиационной обстановки на исследованной территории, установить влияние отдельных компонентов и свойств почвы на механизмы закрепления или миграции $РН$ в почвах.

Зная влияние свойств почвы на поведение $РН$, можно управлять механизмами поступления их в растения, принимать меры по снижению их накопления в растительной продукции и поступлению с кормом и пищей в организмы животных и человека.

Сорбция $РН$ отдельными компонентами и соединениями почвы препятствует их передвижению по профилю, проникновению в грунтовые воды и их загрязнению. $РН$ в основном содержатся в верхнем, наиболее богатом органическим веществом и тонкодисперсными минералами слое почвы [8, 10]. Чем полнее и сильнее $РН$ поглощаются почвенно-поглощающим комплексом (ППК), тем меньше они будут вымываться осадками, передвигаться по профилю почвы и в меньших количествах будут аккумулироваться в растениях.

Удельные активности и особенности распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K по профилю светло-серой лесной почвы участка отражены в табл. 2.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика профиля светло-серой лесной почвы

Горизонт	Глубина отбора, см	Фракция, %		$C_{орг}$, %	pH_{KCl}	P_2O_5	K_2O	Ca^{2+}	Mg^{2+}
		< 0.01 мм	< 0.001 мм			мг/кг почвы		смоль (экв)/100 г почвы	
Апах	0–20	17.2	14.5	2,3	5.8	255	303	8.1	2.7
Апах/А2В	20–40	18.9	9.4	1,4	5.8	172	146	7.4	2.0
А2В/В	40–60	18.3	17.1	0.8	5.4	163	80	10.9	2.9
В	60–80	16.5	28.2	0,6	5.5	197	109	9.1	3.0
В	80–100	16.5	28.2	0,5	4.7	109	80	12.9	1.6
$M \pm m^*$		17.5 ± 0.5	19.5 ± 3.8	1.1 ± 0.3	5.4 ± 0.2	179 ± 24	144 ± 42	9.7 ± 1.0	2.4 ± 0.3
V^{**}		6.2	43.3	66.6	8.3	30	65	23.0	25.0
Lim ***		16.5–18.9	9.4–28.2	0.5–2.3	4.7–5.8	109–255	80–303	7.4–12.9	1.6–3.0

* $M \pm m$ — среднее арифметическое и его ошибка (то же в табл. 2); ** V — коэффициент вариации (то же в табл. 2); *** Lim — пределы величин (то же в табл. 2).

Таблица 2. Удельная активность $РН$ в профиле светло-серой лесной почвы, Бк/кг

Глубина отбора, см	^{137}Cs	^{90}Sr	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
0–20	5.8	6.6	14.1	28.7	472
20–40	5.4	7.0	14.7	31.4	457
40–60	4.1	7.7	15.9	25.6	417
60–80	8.5	5.7	6.4	32.5	476
80–100	4.2	5.2	16.3	25.6	399
* $M \pm m$	5.6 ± 0.8	6.4 ± 0.4	13.5 ± 1.8	28.8 ± 1.4	444 ± 15
** V	31.8	15.6	30.1	11.1	8
***Lim	4.1–8.5	5.2–7.7	6.4–16.3	25.6–32.5	399–476

Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в верхнем пахотном (0–20 см) слое профиля почвы реперного участка не превышали предельных показателей фона глобальных выпадений: 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [11].

Удельные активности EPH в почвах Мира варьируют в широких диапазонах. Например, по данным Тихомирова, удельные активности ^{232}Th и ^{40}K в серых лесных почвах России в среднем составляют 32 и 450 Бк/кг почвы, что вполне согласуется с удельными активностями данных EPH в верхнем слое исследованной почвы.

В качестве среднемировой принята величина удельной активности для ^{226}Ra равная 30 Бк/кг. Удельные активности ^{226}Ra , отмеченные в верхнем слое светло-серой лесной почвы Ивановской обл., были в 2.1 раза меньше среднемирового показателя [12].

Варьирование показателей удельных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{232}Th и ^{40}K в почвенном профиле (0–100 см), за исключением ^{226}Ra , подчинялось закону нормального распределения.

Установлено, что изменения показателей удельных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K с увеличением глубины отбора проб по профилю характеризовались снижающимися трендами. Принимая во внимание угол наклона тренда и значение коэффициента регрессии в уравнении линейной регрессии, наиболее сильное снижение удельной активности вниз по профилю отмечали для ^{40}K , наименее сильное – для ^{137}Cs .

Для определения характера и степени влияния отдельных агрохимических свойств почвы на содержание и распределение PH в профиле изученной почвы, а также установления взаимосвязей между самими PH проводили расчет коэффициентов корреляции, величины которых приведены в табл. 3.

Кислотность почвенного раствора, содержание органического вещества, состав поглощенных катионов и величина емкости катионного обмена, гранулометрический и минералогический составы почвы в значительной степени влияют на поведение PH в почве [10, 13–15].

Наиболее тесная корреляционная взаимосвязь между изменением содержания органического вещества по профилю светло-серой лесной почвы и удельной активностью изученных PH отмечена по отношению к ^{40}K , наименее тесная – к ^{137}Cs и ^{226}Ra (табл. 3).

Выявленные взаимосвязи показали, что органическое вещество в недостаточной степени способствовало удержанию всех изученных PH в профиле светло-серой лесной почвы. Таким образом, создаются условия и опасность миграции изученных PH вниз по профилю почвы.

Судя по величинам коэффициентов корреляции снижение обменной кислотности заметно влияло на закрепление ^{90}Sr , ^{232}Th и, особенно, ^{40}K по профилю почвы, по отношению к ^{226}Ra отмечена обратная зависимость.

С повышением содержания в почве илстых (тонкодисперсных) частиц увеличивается в почве содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr [14, 16]. В нашем исследовании, судя по рассчитанным коэффициентам линейной корреляции, заметное влияние на адсорбцию оказывала только фракция физической глины (<0.01 мм) по отношению к ^{90}Sr , при этом более тонкодисперсные илстые частицы не принимали участия в поглощении этого PH . В целом гранулометрический состав почвенных коллоидов не оказывал существенного влияния на сорбцию и распределение ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в профиле светло-серой лесной почвы. Предположительно, это могло быть связано с тем, что исследованная почва участка содержала недостаточное

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между свойствами светло-серой лесной почвы и удельными активностями PH

Свойства почвы	Фракция, %		C _{орг} , %	pH _{KCl} , ед.	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
	<0.01 мм	<0.001 мм			мг/кг почвы		смоль(экв)/ 100 г почвы						
PH													
¹³⁷ Cs	−0.39	0.29	0.01	0.40	0.50	0.17	−0.50	0.52	−	−0.33	− 0.90	0.85	0.81
⁹⁰ Sr	0.86	−0.79	0.37	0.60	0.29	0.14	−0.40	0.41	−0.33	−	0.00	−0.11	0.07
²²⁶ Ra	0.10	0.10	−0.40	−0.67	− 0.90	−0.67	0.60	−0.70	− 0.90	0.00	−	−0.87	−1.00
²³² Th	0.04	−0.13	0.18	0.63	0.46	0.23	−0.78	0.27	0.85	−0.11	−0.87	−	0.86
⁴⁰ K	0.01	−0.28	0.55	0.82	0.85	0.62	− 0.88	0.53	0.81	0.07	−1.00	0.86	−

Примечание. Обычным начертанием выделены коэффициенты линейной корреляции Пирсона, курсивом – ранговой корреляции Спирмена (то же в табл. 4). Полужирным выделены значимые коэффициенты корреляции при $p < 0.05$ (то же в табл. 4).

количество тонкодисперсных частиц и имела супесчаный состав.

Влияние содержания обменных Са и Mg неоднозначно сказывалось на распределении изученных *РН*. Кальций проявлял высокую конкуренцию за места сорбции на поверхности ППК ко всем *РН*, за исключением ^{226}Ra , особенно к ^{40}K , о чем свидетельствовала существенная ($p < 0.05$) высокая корреляция (табл. 3). Распределение обменного Mg по профилю было связано с распределением *РН*, за исключением ^{226}Ra , с которым Mg, вероятно, вступал в конкуренцию.

Установлено, что подвижный P_2O_5 почвы способен принимать участие в закреплении микроколичеств ^{90}Sr путем соосаждения на поверхности фосфатов [14]. В проведенном исследовании отмечено, что между концентрацией подвижного P_2O_5 и удельными активностями изученных *РН*, за исключением ^{226}Ra , установлены положительные корреляционные взаимосвязи (табл. 3).

Калий и ^{137}Cs являются химическими элементами-аналогами, проявляющими взаимные антагонистические свойства. Проведенный нами корреляционный анализ не показал, что между этими элементами имеется какая-либо конкуренция за места сорбции на поверхности ППК. Кроме того, подвижный K_2O не оказывал заметного влияния на распределение по почвенному профилю ^{90}Sr и ^{232}Th . Между содержанием подвижного K_2O и удельной активностью ^{40}K по профилю отмечена заметной силы положительная корреляция: $r = 0.62$.

Установленные положительные корреляции между удельными активностями отдельных *РН* (табл. 3) позволили предположить у них схожие механизмы поглощения различными центрами сорбции светло-серой лесной почвы. Подтверждение полученным нами величинам коэффициентов корреляции между удельными активностями ^{40}K и ^{232}Th можно найти в работе [17].

Распределение ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K в профиле светло-серой лесной почвы во многом связано с интенсивностью подзолистого процесса, при этом в почвенном профиле проявляется элювиально-иллювиальная дифференциация *РН*. Иллювиальная толща (60–100 см) горизонта В характеризуется значительной уплотненностью и более тяжелым гранулометрическим составом, за счет увеличения в 2 раза содержания илестых частиц по сравнению с их содержанием в Апах и, таким образом, является геохимическим барьером, в котором происходит аккумуляция всех изученных *РН*.

Плотность загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr пахотного слоя светло-серой лесной почвы за период 2009–2022 гг. проведения мониторинга составляла

$M \pm m = 0.045 \pm 0.002 \text{ Ки/км}^2$ (lim = 0.034–0.054) и $M \pm m = 0.025 \pm 0.003 \text{ Ки/км}^2$ (lim = 0.015–0.051) соответственно, что существенно меньше уровней, соответствующих относительно удовлетворительной экологической обстановке — 1.0 и 0.1 Ки/км² соответственно, и позволяет отнести исследованную почву участка к незагрязненной территории.

Данные удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в культурных растениях и $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$ и $K_{\text{П}}^{90}\text{Sr}$ из почвы в растения представлены в табл. 4.

Многочисленными исследованиями, в т.ч. проведенными на серых лесных почвах, установлено, что в генеративных органах (зерно) культурных растений ^{137}Cs и ^{90}Sr накапливаются значительно меньше, чем в надземных вегетативных органах (соломе, листьях) [18–23].

Настоящим исследованием установлено, что для всех зерновых культур была отмечена общая закономерность, когда в их основной продукции (зерне) содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr было меньше, чем в побочной (соломе), что может указывать на наличие у культур защитных механизмов, которые препятствуют излишнему проникновению *ИРН* в зерно.

Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в основной продукции зерновых культур возрастали в ряду: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес, ^{137}Cs в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес, ^{90}Sr в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница.

Удельная активность ^{137}Cs в зеленой массе одностебельных трав (вике, овсе) была больше в 4.8 раза, чем ^{90}Sr .

Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr во всех видах культур полностью удовлетворяли санитарно-гигиеническим требованиям к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в кормовых сеяных травах (зеленой массе) на уровне ≤ 100 и 50 Бк/кг, грубых кормах (солома) — ≤ 400 и 180 Бк/кг, фуражном и продовольственном зерне — ≤ 200 и 140 и 70 и 40 Бк/кг соответственно [24–25].

Расчет $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры из почвы показал, что средние величины $K_{\text{П}}^{90}\text{Sr}$ были больше средних показателей $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$, т.е. процесс перехода ^{90}Sr из обоих типов почв в растения всех видов был интенсивным, чем переход ^{137}Cs .

При сравнении величин $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr для одних и тех же видов культур выяснили, что ^{137}Cs в основном хуже переходил в основную и побочную продукцию по сравнению со ^{90}Sr , что подтверждено данными других исследований, проведенных на серых лесных почвах [20, 21].

Таблица 4. Коэффициенты перехода и удельная активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в растительной продукции культур, Бк/кг

Культура (вид продукции)	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	<i>K</i> _П ¹³⁷ Cs	<i>K</i> _П ⁹⁰ Sr
Яровая пшеница (зерно/ солома)	1.9 ± 0.5/2.9 ± 0.6	1.4 ± 0.4/3.6 ± 0.7	1.0 ± 0.1/1.5 ± 0.2	0.7 ± 0.1/1.9 ± 0.2
Ячмень (зерно/солома)	1.5 ± 0.7/3.0 ± 0.7	1.1 ± 0.4/2.0 ± 0.6	0.9 ± 0.4/1.6 ± 0.4	1.7 ± 0.6/3.0 ± 1.0
Овес (зерно/солома)	3.1 ± 0.5/3.6 ± 0.7	2.0 ± 0.4/3.2 ± 0.8	2.0 ± 0.3/2.3 ± 0.3	1.9 ± 0.2/3.0 ± 0.6
Озимая пшеница (зерно/ солома)	1.4 ± 0.3/2.3 ± 0.3	0.9 ± 0.2/1.8 ± 0.3	0.8 ± 0.2/1.4 ± 0.2	1.0 ± 0.1/2.0 ± 0.3
Кукуруза (зерно/стебли)	1.2 ± 0.3/1.4 ± 0.4	0.6 ± 0.2/0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.1/0.9 ± 0.2	1.1 ± 0.1/1.3 ± 0.2
Однолетние травы (зеленая масса)	2.9 ± 0.4	0.6 ± 0.1	2.0 ± 0.3	0.6 ± 0.1
Г _{ИРН} почва/ИРН растение				
Яровая пшеница (зерно/ солома)	−0.42/−0.21	−0.47/−0.33		
Ячмень (зерно/солома)	− 1.00 /−0.99	−0.95/−0.71		
Овес (зерно/солома)	−0.34/0.08	−0.38/−0.42		
Озимая пшеница (зерно/ солома)	−0.63/−0.64	0.80/0.45		
Кукуруза (зерно/стебли)	−0.41/−0.25	−0.52/−0.16		
Однолетние травы (зеленая масса)	−0.46	−0.55		
Г _{ИРН} основная продукция/ИРН побочная продукция				
Яровая пшеница	0.79	0.75		
Ячмень	0.99	0.90		
Овес	0.65	0.49		
Озимая пшеница	0.99	0.10		
Кукуруза	0.53	0.76		

Интенсивность перехода ¹³⁷Cs из почв, как в основную, так и побочную продукцию культур совпадала с рядом увеличения удельной активности. Интенсивность перехода ⁹⁰Sr в продукцию культур не совпадала с рядом содержания ⁹⁰Sr в продукции культур. Величины *K*_П⁹⁰Sr для основной продукции возрастали в ряду: яровая пшеница > озимая пшеница > кукуруза > ячмень > овес; *K*_П⁹⁰Sr для побочной продукции: кукуруза > яровая пшеница > озимая пшеница > ячмень > овес.

Сила корреляционной взаимосвязи между величинами удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почве и растениях изменялась в зависимости от видовой принадлежности культур (табл. 4). Преимущественно между рассмотренными показателями отмечена связь обратной зависимости и умеренной силы сопряженности. Отметим, что содержание ⁹⁰Sr в зерне и соломе озимой пшеницы возрастало с увеличением удельной активности ⁹⁰Sr в пахотном слое почвы.

Озимые зерновые культуры, как правило, накапливают в 2.0–2.5 раза меньше ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, чем яровые зерновые [14]. Частичное подтверждение этому факту получено в нашем исследовании,

когда зерно озимой пшеницы в среднем меньше накапливало ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в 1.4 и 1.5 раза, чем зерно яровых зерновых (ячменя, овса и пшеницы), а солома — в 1.3 и 1.45 раза меньше соответственно (табл. 4).

Установленные для сельскохозяйственных культур на обследованном реперном участке величины *K*_Н¹³⁷Cs и *K*_Н⁹⁰Sr укладывались в пределы 0.18–0.55 и 0.14–0.7 соответственно, что аналогично показателям *K*_Н¹³⁷Cs 0.02–1.1 и *K*_Н⁹⁰Sr 0.02–12 для незагрязненных почв, приведенным в работе [26].

Накопление ⁹⁰Sr основной и побочной продукцией большинства зерновых культур происходило в 1.35–2.09 и 1.27–1.75 раза более интенсивно соответственно, чем ¹³⁷Cs, о чем свидетельствовали полученные показатели *K*_Н и, наоборот, для зеленой массы однолетних трав величина *K*_Н¹³⁷Cs была в 3.43 раза больше, чем *K*_Н⁹⁰Sr (рис. 1).

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона показал, что между удельной активностью ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в зерне и соломе зерновых культур отмечена линейная положительная корреляция в основном высокой и очень высокой силы сопряженности.

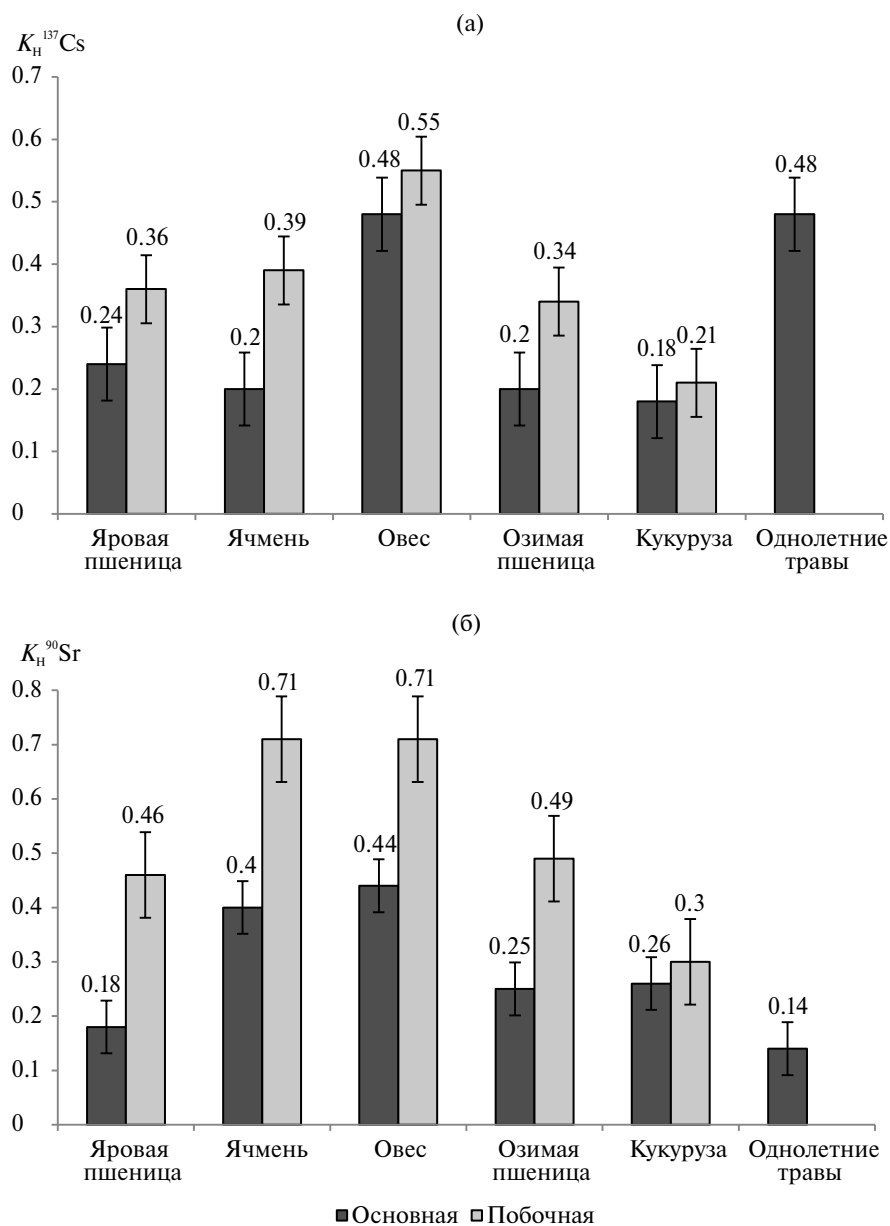


Рис. 1. Коэффициенты накопления ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) продукцией культур.

ВЫВОДЫ

1. Величины удельных активностей ^{137}Cs и ^{90}Sr в пахотном слое почвы реперного участка не превышали предельных показателей фона глобальных выпадений. Удельные активности ^{232}Th и ^{40}K соответствовали типичным показателям, характерным для типа исследованной почвы. Удельная активность ^{226}Ra была в 2.1 раза меньше среднемировой.

2. Изменения величин удельных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в профиле почвы характеризовались снижающимися трендами. Наиболее сильное

снижение содержания отмечено для ^{40}K , наименее сильное – для ^{137}Cs .

3. Корреляционный анализ не выявил сопряженности между содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ и удельными активностями радионуклидов (PH) в профиле почвы, за исключением ^{40}K . Снижение обменной кислотности заметно влияло на закрепление ^{90}Sr , ^{232}Th и особенно ^{40}K по всей глубине исследованного профиля почвы. Тонкодисперсные илестые и глинистые частицы почвы не оказывали существенного влияния на сорбцию ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Между содержанием глинистых частиц и удельной активностью ^{90}Sr отмечена достоверная положительная корреляция.

Обменный Са проявлял высокую конкуренцию за места сорбции на поверхности ППК ко всем $PН$, за исключением ^{226}Ra , особенно к ^{40}K . Распределение обменного Mg по профилю было связано с распределением $PН$, кроме ^{226}Ra , с которым Mg мог вступать в конкуренцию на границе раздела твердой и жидкой фаз почвы.

Между подвижными P_2O_5 и K_2O и удельными активностями ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{232}Th и особенно ^{40}K установлены положительные корреляции различной силы взаимосвязи.

4. Высокие положительные корреляционные сопряженности между удельными активностями и распределением по профилю ^{137}Cs и ^{232}Th , ^{137}Cs и ^{40}K , ^{232}Th и ^{40}K позволили предположить у них схожие механизмы поглощения различными центрами сорбции почвы.

5. Распределение всех изученных $PН$ в профиле почвы обусловлено интенсивностью подзолистого процесса. В профиле проявлялась элювиально-иллювиальная дифференциация $PН$, когда в иллювиальном горизонте происходило увеличение аккумуляции изученных $PН$ за счет повышения содержания в 2 раза илестых частиц по сравнению с их содержанием в верхнем слое профиля.

6. Плотности загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr пахотного слоя почвы участка были значительно меньше допустимых уровней удовлетворительной экологической обстановки, что позволило отнести почву участка к незагрязненной территории.

7. Зерно всех зерновых культур меньше накапливало ^{137}Cs и ^{90}Sr по сравнению с соломой.

8. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне возрасла в ряду: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес, ^{137}Cs в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес, ^{90}Sr в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница.

9. Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr во всех видах культур и выращенной продукции полностью удовлетворяли ветеринарным нормам и гигиеническим требованиям к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительной продукции, предназначенной на корм животным и в пищу человеку.

10. K_H ^{137}Cs и ^{90}Sr всеми растениями укладывались в нормативные пределы, характерные для растений, выращенных на незагрязненных почвах.

11. Накопление ^{90}Sr основной и побочной продукцией большинства зерновых культур происходило в 1.35–2.09 и 1.27–1.75 раза более интенсивно, чем ^{137}Cs . Зерно озимой пшеницы в среднем меньше накапливало ^{137}Cs и ^{90}Sr в 1.4 и 1.5 раза, чем зерно

яровых зерновых, солома — в 1.3 и 1.45 раза меньше соответственно.

12. В основном между величинами удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве и растениях отмечена связь обратной зависимости и умеренной силы сопряженности. Между удельной активностью ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне и соломе зерновых культур выявлена линейная положительная корреляция в основном высокой и очень высокой силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 752 с.
2. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Н.И. Санжаровой и С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с.
3. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.
4. Saleh M.S., Ramli A.T., Alajerami Y. Assessment of environmental ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K concentrations in the region of elevated radiation background in Segamat District, Johr, Malaysia // J. Environ. Radioact. 2013. V. 124. P. 130–140.
5. Физические величины: Спр-ник / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
6. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1487–1498.
7. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищ-во научн. изданий КМК, 2006. 509 с.
8. Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
9. Радиохимическое определение удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах: Метод. рекоменд. МР 2.6.1.0094–14. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 43 с.
10. Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М., Василенко И.Я., Дричко В.Ф., Иванов Ю.А., Маслов В.И., Маслова К.И., Никифоров В.С., Поликарпов Г.Г., Попова О.Н., Сироткин А.Н., Таскаев А.И., Тестов Б.В., Титаева Н.А., Февралева Л.Т. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с.
11. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. К.П. Махонько. Обнинск: НПО "Тайфун", 1991.

12. Почвоведение. Учеб.-к для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование. М.: Высш. шк., 1988. 400 с.
13. Тимофеев-Ресовский Н.В., Титлянова А.А., Тимофеева Н.А., Махонина Г.И., Молчанова И.В., Чеботина М.Я. Поведение радиоактивных изотопов в системе почва—раствор // Радиоактивность и методы ее определения. М.: Наука, 1966. С. 41—81.
14. Юдинцева Е.В. Снижение содержания радиоактивных веществ в продукции растениеводства (рекомендации). М.: Агропромиздат, 1989. 40 с.
15. Рачкова Н.Г., Шуктомова И.И., Таскаев А.И. Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор) // Почвоведение. 2010. № 6. С. 698—705.
16. Баранов В.И., Морозова Н.Г. Поведение естественных радионуклидов в почвах // Современные проблемы радиобиологии. М.: Атомиздат, 1971. С. 13—40.
17. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Шуктомова И.И. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно- и среднетаежных подзон Республики Коми // Почвоведение. 2017. № 7. С. 824—829.
18. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. Учеб. пособ. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.
19. Санжарова Н.И., Гешель И.В., Крыленкин Д.В., Гордиенко Е.В. Современное состояние исследований поведения ^{90}Sr в системе почва—сельскохозяйственные растения (обзор) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59. № 6. С. 643—665.
20. Уткин А.А. Оценка радиационной обстановки на реперных участках сельскохозяйственных угодий Владимирской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т. 62. № 6. С. 660—672.
<https://doi.org/10.31857/S0869803122060133>
21. Уткин А.А. Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в серых лесных почвах и растениях реперных участков Владимирской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2023. Т. 63. № 2. С. 199—210.
<https://doi.org/10.31857/S0869803123020121>
22. Уткин А.А., Аканова Н.И., Нода И.Б. Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в дерново-подзолистых почвах и растениях реперных участков Ивановской области // Агрохимия. 2023. № 7. С. 75—85.
<https://doi.org/10.31857/S0002188123070116>
23. Utkin A.A. Assessment of the radiation situation in reference areas of agricultural lands of the Vladimir oblast // Biol. Bul. 2023. V. 50. № 11. P. 261—272.
<https://doi.org/10.1134/S1062359023110225>
24. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs . Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06—01 (утв. Минсельхозом РФ 19.12.2000).
25. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.1078—01. М., 2002. 144 с.
26. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. Учеб. пособ. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.

Content and Distribution of Radionuclides in the Profile of Light Gray Forest Soil and Agroecosystem Plants

A. A. Utkin^{a,*}, I. B. Noda^b

^aPeoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russia

^bAgrochemical service station "Ivanovskaya",
Tsentralnaya ul. 8, Ivanovo region, p. Bogorodskoye 153506, Russia

^{*}E-mail: aleut@inbox.ru

The results of long-term radiation monitoring of light gray forest soil and cultivated plants of the reference area are presented. Correlation analysis has determined the relationship between the distribution of artificial and natural radionuclides in the soil profile with its agrochemical properties. The distribution of radionuclides in the soil profile is determined by the intensity of the podzolic process. The profile shows the eluvial-illuvial differentiation of radionuclides, when an increase in their accumulation occurred in the illuvial horizon. According to the density of contamination of the surface soil layer with cesium-137 and strontium-90, a satisfactory level of the environmental situation was determined, according to which the soil of the site is classified as uncontaminated. Rows of cultivated plants with an increasing ability to accumulate caesium-137 and strontium-90 from the soil have been constructed. The grain of all grain crops accumulated less cesium-137 and strontium-90 compared to straw. All grown plant products of all types of crops fully met veterinary and hygienic standards for the content of caesium-137 and strontium-90 in feed (green mass, straw and feed grain) and food grains. The coefficients of accumulation and transfer of caesium-137 and strontium-90 from soil to plants were calculated.

Keywords: light gray forest soil, artificial (man-made) radionuclides, natural (natural) radionuclides, cultivated plants, radiation monitoring.

УДК 632.122.1:546.57:631.445.41

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОТОКСИЧНОСТИ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ЕГО ЗАГРЯЗНЕНИИ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА[§]

© 2024 г. Н. И. Цепина¹, С. И. Колесников¹, Т. В. Минникова^{1,*}, А. С. Русева¹¹Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Иванковского
просп. Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону 344090, Россия

*E-mail: loko261008@yandex.ru

Изучили динамику показателей фитотоксичности (всхожести и длины корней редиса) чернозема обыкновенного при загрязнении наночастицами серебра. В лабораторных условиях чернозем обыкновенный загрязняли наночастицами серебра (1, 10 и 100 мг/кг) в течение 3, 10, 30, 90 и 180 сут. Установлено, что чем больше было внесено наночастиц серебра в почву, тем сильнее было снижение всхожести и длины корней редиса. Восстановления всхожести и длины корней редиса с увеличением срока от момента загрязнения не происходило. В настоящем исследовании максимальный токсичный срок от момента загрязнения для каждого показателя был выявлен по его чувствительности к наночастицам серебра и информативности. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к длине корней и всхожести редиса отмечена на 10-е и 30-е сут соответственно. Результаты можно использовать при оценке фитотоксичности почв, загрязненных наночастицами серебра.

Ключевые слова: почвы, загрязнение, наночастицы серебра, биотестирование, всхожесть, длина корней, редис.

DOI: 10.31857/S0002188124070107, **EDN:** CFIYVS

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность развития нанотехнологий способствует увеличению потребления наночастиц серебра (AgNPs) в различных сферах жизни человека и в последующем поступлении с отходами в окружающую среду [1]. Наночастицы серебра содержатся в таких потребительских товарах, как одежда, обувь, средства личной гигиены, косметика и др. [2]. Наночастицы серебра часто применяют в сельском хозяйстве поскольку входят в состав удобрений и нанопестицидов [3–5]. Прямой контакт AgNPs с корнями растений может привести к их поглощению и транспортировке к наземным органам растения: побегам, стеблям и листьям [6]. Растения, растущие на почвах, содержащих от 8 до 126 мг серебра/кг [7, 8], способны накапливать данный элемент в корневой системе и побегах [9].

Во многих исследованиях показано, что экотоксичность серебра проявляется в ингибировании почвенных бактерий [11–13] и снижении численности животных [13], а также уменьшении длины

корней и побегов растений [14–17], ингибировании активности почвенных ферментов [12, 18–20]. В большинстве исследований дана оценка экотоксичности AgNPs в зависимости от их концентрации. Публикации, посвященные изменению фитотоксических показателей почв в зависимости от срока загрязнения, в литературе не встречаются.

Было актуальным установить закономерности изменения состояния показателей фитотоксичности почвы в зависимости от времени от момента загрязнения AgNPs почвы (3, 10, 30, 90 и 180 сут). Цель работы — исследование динамики показателей фитотоксичности чернозема обыкновенного при его загрязнении наночастицами серебра.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования были выбраны черноземы обыкновенные — Naplic Chernozems Calcic [21]. Черноземы обыкновенные играют огромную роль в производстве сельскохозяйственной продукции, и снижение их плодородия в результате загрязнения крайне нежелательно. Образцы почвы для модельных лабораторных исследований были отобраны из поверхностного слоя (Апах — слой 0–20 см) почвы на пашне опытного

[§]Исследование выполнено при государственной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-74-00054 в Южном федеральном университете.

участка Ботанического сада Южного федерального университета, (г. Ростов-на-Дону, Россия), координаты 47°14'17.54" с.ш., 39°38'33.22" в.д. Почва имеет тяжелосуглинистый гранулометрический состав, содержание гумуса, равное 4.4%, и нейтральную реакцию среды (рН 7.8 ед.). В данном исследовании рН определяли в водной вытяжке (почва : вода = 1 : 2.5). В инкубационные сосуды закладывали почву после просеивания через сито с диаметром отверстий от 3 до 5 мм. Наночастицы Ag вносили в виде сухого порошка. Порошок наночастиц серебра добавляли к небольшому количеству почвы и тщательно растирали, а потом соединяли с базовой массой образца. В пластиковые контейнеры объемом 500 мл в 3-кратной повторности вносили по 300 г почвы с наночастицами Ag.

В исследовании были использованы наночастицы серебра (AgNPs) (CAS7440-22-4) производства Alfa Aesar by Thermo Fisher Scientific (Германия) размером 10 нм в виде порошка, форма частиц — сферическая. Химическая чистота AgNPs составляла ≈99.99%. Данные характеристики AgNPs заявлены производителем.

Моделирование загрязнения AgNPs чернозема обыкновенного происходило в лабораторных условиях. Согласно литературным данным, серебро достаточно часто поступает в окружающую среду именно в форме наночастиц [22], а его содержание в почвах составляет от 0.01 до 126 мг/кг [8]. Размер частиц AgNPs, поступающих в окружающую среду, чаще всего составляет 10–20 нм [23]. В настоящем исследовании использовали поверхностный слой почвы (0–20 см) для оценки влияния наночастиц серебра на фитотоксические показатели чернозема обыкновенного. Серебро аккумулируется именно в этом слое. На основе фоновых концентраций серебра были рассчитаны дозы AgNPs, которыми загрязняли почву (1, 10 и 100 мг/кг).

Фоновое содержание серебра в черноземе обыкновенном составляет 0.1 мг/кг, его диагностировали методом масс-спектрометрии индуктивно связанной плазмы (ИСП-МС), на приборах ELAN-DRC-е или Agilent 7700-ФГУП во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского.

Почву инкубировали в вегетационных сосудах в 3-кратной повторности в климатической камере KBW Binder в течение 30 сут. Ранее, для серебра именно на этом сроке показана самая высокая токсичность [24]. Масса почвы в каждом сосуде составляла 300 г. В климатической камере были созданы благоприятные условия для роста и развития растений: влажность 25–30%, температура 24–25 °С, смена освещения (день/ночь). В качестве тест-объекта для оценки фитотоксичности был выбран редис (*Raphanus sativus* L. var. *radicula*), сорт

“18 дней”, поскольку семена этого растения имеют небольшой запас питательных веществ и чувствительны к внешним воздействиям, в частности, к загрязнению тяжелыми металлами и нефтепродуктами, применению ремедиантов для повышения скорости биологических процессов и пр. [25–27]. Из каждого сосуда с черноземом обыкновенным, загрязненным различным количеством AgNPs отбирали по 40 г почвы в трехкратной повторности. Далее полученную навеску почвы помещали в чашки Петри, увлажняли до 60% ПВ и тщательно перемешивали до однородной консистенции. После этого высаживали в каждую чашку Петри по 20 семян редиса. Чашки Петри помещали в климатическую камеру KBW 240 (Binder) на 7 сут. В климатической камере были созданы оптимальные условия при контроле освещенности, влажности и температуры. Фитотестирование основывалось на сравнении показателей всхожести (шт.) и длины корней (мм) в опытных вариантах по сравнению с контролем [28]. Всхожесть и длина корней — это наиболее информативные показатели из широкого спектра показателей прорастания семян и интенсивности начального роста растений [29].

Чувствительность определяли по тому, как происходило снижение всхожести и длины корней редиса в почве с наночастицами серебра относительно незагрязненной почвы (контроля). Снижение показателя более чем на 50% относительно контроля определяет высокую чувствительность, от 50 до 75% — среднюю, от 75 до 100% — низкую. Информативность оценивали по величине коэффициента корреляции (r) между показателем и концентраций серебра в почве. Если r варьировал от -0.70 до -1.0 , то информативность была высокой, от -0.70 до -0.40 — средней, <-0.40 — низкой.

Для проверки полученных данных на достоверность был проведен дисперсионный анализ с последующим определением наименьшей существенной разницы (HCP_{05}).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На 90-е сут после внесения наночастиц серебра 1 мг/кг в чернозем обыкновенный наблюдали снижение всхожести редиса до 75% по сравнению со всхожестью в незагрязненной почве (табл. 1).

Доза наночастиц 10 мг/кг вызвала снижение всхожести на 3-, 10-, 30-, 90- и 180-е сут до 81, 87, 70, 64 и 73% относительно контроля соответственно. Доза наночастиц серебра 100 мг/кг вызвала уменьшение всхожести редиса до 53, 71, 42, 55 и 71% соответственно по сравнению с незагрязненной почвой.

Увеличение дозы наночастиц серебра в почве уменьшало всхожесть и длину корней редиса.

Таблица 1. Динамика фитотоксических свойств чернозема обыкновенного при загрязнении наночастицами серебра на примере тесе-культуры редиса, % от контроля

Срок экспозиции, сут	Содержание Ag в почве, мг/кг				
	контроль без загрязнения	1.0	10	100	<i>HCP</i> ₀₅
Всхожесть редиса					
3	100	92	81	53	9
10	100	92	87	71	9
30	100	93	70	42	10
90	100	75	64	55	8
180	100	92	73	71	9
<i>HCP</i> ₀₅		12	11	13	
Длина корней редиса					
3	100	75	63	31	10
10	100	97	95	48	9
30	100	91	85	81	9
90	100	81	78	63	11
180	100	99	87	75	9
<i>HCP</i> ₀₅		10	12	13	

Это согласовалась с увеличением показателей фитотоксичности при росте количества внесенных в почву наночастиц серебра, которое было показано в работе [30]. Ранее был отмечен дозозависимый ингибирующий эффект наночастиц серебра на прорастание семян риса и последующий рост и развитие проростков [19], на морфометрические показатели пшеницы [31], на всхожесть и длину корней редиса [14]. Очевидного восстановления всхожести и длины корней редиса с увеличением срока от момента загрязнения не происходило. Как было установлено ранее, на 90-е сут после внесения в почву нитрата серебра наблюдали восстановление показателей проросших семян и интенсивности начального роста редиса [24].

Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к длине корней редиса отмечена на 10-е сут. Этот факт подтверждается высокой чувствительностью к загрязнению наночастицами серебра (снижение показателя до 80% от контроля) и высоким коэффициентом корреляции ($r = -1.00$) на данном сроке. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к всхожести редиса отмечена на 30-е сут, что подтверждено снижением показателя до 69% от контроля и высоким коэффициентом корреляции ($r = -0.92$).

Ранее были получены схожие результаты наибольшей экотоксичности наносеребра на 10- и 30-е сут после загрязнения [24]. Наночастицы многих металлов (Ag, Au, CeO₂, CuO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, TiO₂, ZnO и др.) негативно влияют на фотосинтетический аппарат растений, что влечет изменение морфометрических показателей [32, 33]. В исследовании [34] было установлено, что наночастицы Ag

влияли на заболеваемость хлорозом листьев ряски (*Lemna minor*) и активность ферментов. На течение хлороза влиял период загрязнения наночастицами: именно через 14 сут установлено увеличение хлороза у растений, подвергшихся воздействию наночастицами Ag, и количества пораженных растений по сравнению с 7-ми сут. Наночастицы Ag индуцировали окислительный стресс в клетках, что приводило к ингибированию ферментативной активности как механизма самозащиты. Оценена фотохимическая эффективность фотосистемы листьев фасоли бобовой (*Vicia faba*) при воздействии наночастиц серебра (AgNP) диаметром 20, 51 и 73 нм [35]. Наночастицы Ag влияли на устьичную проводимость и ассимиляцию CO₂. Кроме того, AgNP индуцировали перепроизводство активных форм кислорода (АФК) в листьях фасоли.

AgNP могут отрицательно влиять на процесс фотосинтеза при накоплении в листьях, поскольку было обнаружено незначительное высвобождение Ag⁺ из наночастиц. Влияние наночастиц Ag размером 18 нм на фотосинтетический аппарат водоросли (*Chlorella vulgaris* Beijer) и растений овса (*Avena sativa* L.) также было установлено [36]. Величина EC₅₀ для овса по морфометрическим показателям (энергии прорастания, массы корней и проростков) варьировала от 7 до 20 мг Ag⁺/л соответственно. При этом наиболее чувствительным показателем к действию наночастиц Ag и его ионов (Ag⁺) была оптическая плотность суспензии водоросли, а самым чувствительным органом овса к воздействию наночастиц Ag — корневая система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что чем больше была концентрация наночастиц серебра в почве, тем сильнее уменьшались всхожесть семян и длина корней тест-культуры редиса. Выявлено, что восстановления всхожести и длины корней редиса с увеличением срока от момента загрязнения не происходило. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к длине корней редиса отмечена на 10-е сут после загрязнения. Этот факт подтверждался высокой чувствительностью к загрязнению наночастицами серебра (снижение показателя до 80% от контроля) и высоким коэффициентом корреляции ($r = -1.00$) на данном сроке. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к всхожести редиса отмечена на 30-е сут, что подтверждалось высокой чувствительностью к загрязнению наночастицами серебра (снижение показателя до 69% от контроля) и высоким коэффициентом корреляции ($r = -0.92$). Результаты исследования возможно использовать при оценке фитотоксичности почв, загрязненных наночастицами серебра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khanna V.K.* Nanomaterials and their properties // Integrated Nanoelectronics. New Delhi: Springer, 2016. P. 25–41.
2. *Oliveira C.R.S., Silva Júnior A.H., Immich A.P.S., Fiates J.* Use of advanced materials in smart textile manufacturing mater // Lett. 2022. V. 316. 132047.
3. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132047>
4. *Bhattacharyya A., Duraisamy P., Govindarajan M., Buhroo A.A., Prasad R.* Nano-biofungicides: emerging trend in insect pest control // Adv. Applicat. Fungal Nanobiotechnol. 2016. P. 307–319.
5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42990-8_15
6. *Júniora J.A.H.S., Oliveira M.P.V., Oliveira C.R.S., Júnior F.W.* Reichert impacts of metallic nanoparticles application on the agricultural soils microbiota // J. Hazard. Mater. Adv. 2022. V. 7. 100103. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100103>
7. *Kaningini A.G., Nelwamondo A.M., Azizi S., Maaza M., Mohale K.C.* Metal nanoparticles in agriculture: A Review of possible use // Coatings. 2022. V. 12. 1586. <https://doi.org/10.3390/coatings12101586>
8. *Ahmadov I.S., Ramazanov M.A., Gasimov E.K., Rzayev F.H., Veliyeva S.B.* The migration study of nanoparticles from soil to the leaves of plants // Bio-interface Res. Appl. Chem. 2020. V. 10. P. 6101–6111. <https://doi.org/10.33263/BRIAC105.6101611>
9. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. 4th Ed. Boca Raton, FL: Crc Presspp, 2010. 548 p.
10. *Huang Y.N., Qian T.T., Dang F., Yin Y.G., Li M., Zhou D.M.* Significant contribution of metastable particulate organic matter to natural formation of silver nanoparticles in soils // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 4–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11643-6>
11. *Yildirim D., Sasmaz A.* Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey) // J. Geochem. Explor. 2017. V. 182. P. 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.005>
12. *Forstner C., Orton T.G., Wang P., Kopittke P.M., Dennis P.G.* Soil chloride content influences the response of bacterial but not fungal diversity to silver nanoparticles entering soil via wastewater treatment processing // Environ. Pollut. 2019. V. 255. 113274. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113274>
13. *Grün A., Straskraba S., Schulz S., Schlöter M., Emerling C.* Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on microbial biomass, enzyme activity, and functional genes involved in the nitrogen cycle of loamysoil // J. Environ. Sci. 2018. V. 69. P. 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.04.013>
14. *Tsepina N., Kolesnikov S., Minnikova T., Timoshenko A., Kazeev K.* Soil contamination by silver and assessment of its ecotoxicity // Rev. Agricult. Sci. 2022. V. 10. P. 186–205. https://doi.org/10.7831/ras.10.0_186
15. *Makama S., Piella J., Undas A., Dimmers W.J., Peters R., Puentes V.F., van den Brink N.W.* Properties of silver nanoparticles influencing their uptake in and toxicity to the earthworm *Lumbricus rubellus* following exposure in soil // Environ. Pollut. 2016. V. 218. P. 870–878. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.016>
16. *Kolesnikov S., Tsepina N., Minnikova T., Kazeev K., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Mazarji M., Singh R.K., Rajput V.D.* Influence of silver nanoparticles on the biological indicators of Haplic Chernozem // Plants. 2021. V. 10. 1022. <https://doi.org/10.3390/plants10051022>
17. *Cyjetko P., Milošić A., Domijan A.-M., Vinković Vrček I., Tolić S., Peharec Štefanić P., Letofsky-Papst I., Tkalec M., Balen B.* Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2017. V. 137. P. 8–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.009>
18. *Thuesombat P., Hannongbua S., Akasit S., Chadchawan S.* Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2014. V. 104. P. 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.022>
19. *Vannini C., Domingo G., Onelli E., De Mattia F., Bruni I., Marsoni M., Bracale M.* Phytotoxic and genotoxic effects of silver nanoparticles exposure on

- germinating wheat seedlings // J. Plant Physiol. 2014. V. 171. P. 1142–1148.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.05.002>
20. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil // Environ. Sci. Pollut. Res. 2020. V. 27. P. 8058–8070.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-07347-5>
 21. Ottoni C.A., Lima Neto M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms // Chemosphere. 2020. V. 239. 124698.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124698>
 22. Eivazi F., Afrasiabi Z., Jose E. Pedosphere effects of silver nanoparticles on the activities of soil enzymes involved in carbon and nutrient cycling // Pedosphere. 2018. V. 28. P. 209–214.
<https://doi.org/10.1016/S1002-7>
 23. World Reference Base for Soil Resources 2022. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, ISBN 979-8-9862451-1-9
 24. Michels C., Perazzoli S., Soares M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite // Commun. Environ. Sci. 2017. V. 586. P. 995–1002.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.080>
 25. Aznar R., Barahona F., Geiss O., Ponti J., Luis T.J., Barrero-Moreno J. Quantification and size characterisation of silver nanoparticles in environmental aqueous samples and consumer products by single particle-ICPMS // Talanta. 2017. V. 175. P. 200–208.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.07.048>
 26. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L.V., Minnikova T.V., Kazeev K. Sh., Akimenko Yu.V. Silver ecotoxicity estimation by the soils state biological indicators // Appl. Environ. Soil Sci. 2020. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1155/2020/1207210>
 27. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Исследование фитотоксичности свинца для растений редиса и салата при выращивании на разных типах почв // Агрохимия. 2019. № 6. С. 72–80.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119030050>
 28. Минникова Т.В., Русева А.С., Колесников С.И., Ревина С.Ю., Гайворонский В.Г. Влияние биочара на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом // Агрохимия. 2022. № 9. С. 84–93.
<https://doi.org/10.31857/S0002188122090095>
 29. Минникова Т.В., Минин Н.С., Колесников С.И., Горюцов А.В., Чистяков В.А. Оценка фитотоксичности чернозема обыкновенного при применении *Bacillus* sp. и биочара для стимуляции разложения пожнивных остатков озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Агрохимия. 2023. № 5. С. 60–69.
<https://doi.org/10.31857/S0002188123050058>
 30. Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 248 с.
 31. Kolesnikov S.I., Yaroslavlsev M.V., Spivakova N.A., Kazeev K.Sh. Comparative assessment of the biological tolerance of chernozems in the South of Russia towards contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a model experiment // Euras. Soil Sci. 2013. V. 46. № 2. P. 176–181.
 32. Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С. Сравнительная оценка фитотоксичности наночастиц серебра разного размера // Агрохим. вестн. 2023. № 3. С. 80–85.
<https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-3-017>
 33. Lahuta L.B., Szablinska-Piernik J., Stałanowska K., Głowacka K., Horbowicz M. The Size-Dependent effects of silver nanoparticles on germination, early seedling development and polar metabolite profile of wheat (*Triticum aestivum* L.) // Inter. J. Mol. Sci. 2022. V. 23. P. 13255.
<https://doi.org/10.3390/ijms232113255>
 34. Венжик Ю.В., Мошков И.Е., Дыкман Л.А. Влияние наночастиц металлов и их оксидов на фотосинтетический аппарат растений // Изв. РАН. Сер. биол. 2021. № 2. С. 137–152.
<https://doi.org/10.31857/S0002332921020144>
 35. Дыкман Л.А., Богатырёв В.А., Соколов О.И., Плотников В.К., Репко Н.В., Салфетников А.А. Взаимодействие наночастиц золота, серебра и магния с растительными объектами // Политемат. сетев. электр. научн. журн. Кубан. ГАУ. 2016. Т. 120. С. 675–705.
 36. Pereira S.P.P., Jesus F., Aguiar S., de Oliveira R., Fernandes M., Ranville J., Nogueira A.J.A. Phytotoxicity of silver nanoparticles to *Lemna minor*: Surface coating and exposure period-related effects // Sci. Total Environ. 2018. V. 618. P. 1389–1399.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.275>
 37. Falco W.F., Scherer M.D., Oliveira S.L., Wender H., Colbeck I., Lawson T., Caires A.R.L. Phytotoxicity of silver nanoparticles on *Vicia faba*: Evaluation of particle size effects on photosynthetic performance and leaf gas exchange // Sci. Total Environ. 2020. V. 701. P. 134816.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134816>
 38. Асанова А.А., Полонский В.И. Воздействие наночастиц серебра на фотосинтезирующие организмы // Достиж. науки и техн. АПК. 2017. Т. 31. № 8. С. 12–15.

Dynamics of Phytotoxicity Indicators of Ordinary Chernozem when it is Contaminated with Silver Nanoparticles

N. I. Tsepina^a, S. I. Kolesnikov^a, T. V. Minnikova^{a,#}, A. S. Ruseva^a

^a *Southern Federal University, Academy of Biology and Biotechnology,
prodp. Stachki 194/1, Rostov-on-Don 344090, Russia*

[#] *E-mail: loko261008@yandex.ru*

The dynamics of phytotoxicity indicators (germination and length of radish roots) of ordinary chernozem when contaminated with silver nanoparticles was studied. In laboratory conditions, ordinary chernozem was contaminated with silver nanoparticles (1, 10 and 100 mg/kg) for 3, 10, 30, 90 and 180 days. It was found that the more silver nanoparticles were introduced into the soil, the greater the decrease in germination and length of radish roots. There was no restoration of germination and length of radish roots with an increase in the period from the moment of contamination. In this study, the maximum toxic period from the moment of contamination for each indicator was identified by its sensitivity to silver nanoparticles and informativeness. The maximum toxicity of silver nanoparticles in relation to the root length and germination of radishes was noted on the 10th and 30th days, respectively. The results can be used to assess the phytotoxicity of soils contaminated with silver nanoparticles.

Keywords: soils, pollution, silver nanoparticles, biotesting, germination, root length, radish.

УДК 631.42

Памяти Вячеслава Александровича Рожкова
и Виктора Оганесовича Таргульяна

ОПЫТ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ИЗУЧЕНИЯ РАЗНООБРАЗИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОЧВЕННЫХ ТЕЛ (ПЕДОМАТРИЦ)

© 2024 г. А. С. Фрид*

Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
ул. Институт, влад. 5, Московская обл., п/о Большие Вяземы 143050, Россия

*E-mail: asfrid@mail.ru

Вопрос об изучении почвенных тел (педоматриц) независимо от почвенных систем, хотя и был поставлен ранее, но не нашел пока конкретного отражения в почвенной литературе. В данной работе сделана попытка рассмотреть этот вопрос. Две группы количественных показателей педоматриц (гранулометрический состав и валовой химический состав) были преобразованы таким образом, чтобы отразить количественно не только содержание, но и характер распределения их в почвенном профиле. Всего получено 16 показателей для каждой педоматрицы. Выборка исследованных почв охватила довольно широкий район европейской, западно-сибирской и среднеазиатской частей бывшего СССР. Чтобы оценить макроструктуру выборки, проведена группировка педоматриц по указанным 16-ти показателям. Найдено всего несколько групп с объемом более 3-х объектов в каждой и множество более мелких групп, в том числе по одному объекту в каждой. С одной стороны, это как бы подтверждало независимость друг от друга почвенных разностей, но с другой стороны, полученные группы довольно разнородны как в географическом, так и в почвенно-классификационном плане (по классификациям почв СССР 1977 г. и почв России 2004 г.). Это подтвердило мысль В.О. Таргульяна о необходимости самостоятельного изучения географии и классификации почвенных тел.

Ключевые слова: почвенные тела (педоматрицы), количественные характеристики, география, классификация.

DOI: 10.31857/S0002188124070119, **EDN:** CEUTEY

ВВЕДЕНИЕ

Современный взгляд на почвенные тела (педоматрицы) как составляющую часть теории педогенеза изложен в монографии В.О. Таргульяна [1]. В качестве введения позволим себе привести некоторые высказывания из этой книги.

Для определения места и специфики почвенных систем в ряду экзогенных биокосных систем целесообразно принимать во внимание характер вмещающего материала в каждой из этих систем и поведение в них твердофазных продуктов функционирования, которые могут быть представлены минеральными, органическими и органоминеральными соединениями [1, с. 54].

В тесной связи с фундаментальными особенностями почвы как биокосной системы можно определить основные направления и задачи фундаментальных исследований в области почвоведения. В том числе, почва как память — твердофазная

профильно-покровная структура многофазной почвенной системы — педоматрица — результат длительного функционирования. А в ней, в том числе вещественный состав и организация педоматрицы (почвенного профиля) и география почв как твердофазных педоматриц [1, с. 71–72].

Классификация и картография почвенных тел и почвенных систем должны, вероятно, базироваться на разных критериях и диагностических признаках [1, с. 76].

Почва-память — это совокупность устойчивых и консервативных свойств почвенного профиля, являющихся интегральным результатом действия факторов и процессов почвообразования в течение всего периода почвообразования (до момента наблюдения). В эту совокупность входят свойства, имеющие большие характерные времена своего образования и/или свойства, обладающие значительной устойчивостью [1, с. 149].

Отдельные почвенные тела (профили, педоны) записывают главные черты природной среды и ее эволюции в каждой данной “точке” своего формирования, например, зональные особенности климата и биоты и/или основные типы материнских пород и рельефа. Горизонты, морфоны, их общий состав, мощности, границы записывают более конкретные детали факторов почвообразования. Проблема множественности слоев памяти в педосфере очень сложна, очень слабо исследована [1, с. 175].

Целью работы — исследование совокупности некоторых количественных характеристик вещественного состава и организации почвенных тел различных географических регионов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были взяты в основном описания почвенных разрезов минеральных

почв, представленные в путеводителях почвенных экскурсий международного конгресса в Москве и отечественных съездов почвоведов, в которых имели место одновременно гранулометрический состав и валовой химический состав прокаленной навески по профилю почвы в традиционном для почвоведов представлении. Дополнительно были взяты 4 почвы, которые В.М. Фридланд считал характерными для изучения сущности оподзоливания [2]. Слои с подстилающими породами не использовали в данной работе. Гумусовый профиль слишком очевидно зависит от биоклиматических условий, поэтому его пока не учитывали. Список почв с авторскими названиями дан в табл. 1.

Указанные почвенные характеристики каждого профиля были оцифрованы следующим образом.

1. Изменения по глубине профиля гранулометрического и валового химического состава в целом (то есть по совокупности всех фракций

Таблица 1. Список почв с авторскими названиями

№	Название почвы (место отбора проб)	Ссылка
1	Дерново-подзолистая глеевая глинистая. Разрез ба	[12, с. 41–47]
2	Серая лесная почва, пашня. Разрез 1 (около Пушино)	[13, с. 8–14]
3	Чернозем типичный, целина, степь. Разрез 2 (Курская обл.)	[13, с. 14–31]
4	Чернозем типичный, лес. Разрез 3 (Курская обл.)	[13, с. 14–31]
5	Темно-серая лесная, лес. Разрез 5 (Полтавская равнина)	[13, с. 32–39]
6	Чернозем обыкновенный, степь, пашня. (Украина, Левобережье Днепра)	[13, с. 40–48]
7	Чернозем южный, пашня. Разрез 7 (г. Мелитополь)	[13, с. 48–55]
8	Солонец степной осолоделый. Разрез 9 (г. Мелитополь)	[13, с. 62–69]
9	Солодь глеевая. Разрез 11 (г. Мелитополь, Чапельский под)	[13, с. 74–78]
10	Бурая горно-лесная. Разрез 12 (Крым, Ангарский перевал, около шоссе)	[13, с. 80–87]
11	Коричневая почва. Разрез 13 (Крым, крутой южный склон к морю)	[13, с. 83–90]
12	Коричневая (красноватая) почва (близко к terra rossa) на делювии известняков Разрез 14 (Крым, заповедная роща Никитского ботанического сада)	[13, с. 90–94]
13	Серозем типичный, целина. Разрез 2 (Ташкентская обл.)	[14, с. 12–21]
14	Орошаемая луговая почва на аллювии, 2-я аллювиальная терраса р. Чирчик. Разрез 3 (Ташкентская обл.)	[14, с. 22–29]
15	Орошаемый светлый серозем, орошение с 1961 г. Разрез 4 (Ташкентская обл.)	[14, с. 29–37]
16	Орошаемый типичный серозем с мощным агроирригационным горизонтом, древний оазис. Разрез 5 (Самаркандская обл.)	[14, с. 37–48]
17	Коричневая почва, 1550–1600 м над уровнем моря, северный склон. Разрез 6 (Самаркандская обл.)	[14, с. 48–55]
18	Такыр. Разрез 7 (Бухарская обл.)	[14, с. 55–64]
19	Серо-буря пустынная на пролювии. Разрез 8 (Бухарская обл.)	[14, с. 65–73]
20	Орошаемая луговая почва с мощным агроиригационным горизонтом, оазис. Разрез 9 (Бухарская обл.)	[14, с. 74–82]
21	Soddy-podsolic soil, forest strip. Разрез 18 (Татарстан, Высокая Гора)	[15, с. 12–23]
22	Gray forest soil, пашня. Разрез 19 (Татарстан, Высокая Гора)	[15, с. 24–27]
23	Чернозем типичный Приволжской возвышенности, пашня. Разрез 14 (Ульяновская обл.)	[15, с. 29–38]
24	Чернозем выщелоченный палеогидроморфный. Разрез 9 (Самарская (Куйбышевская) обл., водораздельное плато Самарской Луки, между лощинами)	[15, с. 54–66]

Таблица 1. Продолжение

№	Название почвы (место отбора проб)	Ссылка
25	Серозем темный слабовыщелоченный, целина, Разрез 3 (Ташкентская обл.)	[16, с. 22–29]
26	Горная коричневая типичная на лессовидном делювии гранитов. Разрез 4 (Ташкентская обл.)	[16, с. 29–39]
27	Бурая горно-лесная глубоковыщелоченная. Разрез 5 (Ташкентская обл.)	[16, с. 39–47]
28	Горная коричневая выщелоченная. Разрез 6 (Ташкентская обл.)	[16, с. 47–57]
29	Староорошаемый серозем типичный. Разрез 7 (Ташкентская обл.)	[16, с. 58–65]
30	Староорошаемая аллювиальная луговая, пашня. Разрез 10 (Самаркандская обл.)	[16, с. 81–89]
31	Чернозем выщелоченный, пашня. Разрез 4–4 (Новосибирская обл., Приобское плато)	[17, с. 27–37]
32	Дерново-подзолистая на песках (Алтайский край, Мамонтовский р-н)	[17, с. 47–53]
33	Горно-лесная дерново-глубокоподзолистая (псевдоподзолистая) поверхностно-глееватая, лес. Разрез 1–73 (Горно-Алтайск, Бие-Катунское междуречье)	[17, с. 78–87]
34	Горно-лесная бурая, лес. Разрез 2–73 (Горный Алтай)	[17, с. 87–93]
35	Горно-лесная глубокооподзоленная (псевдоподзолистая). Разрез 85–3 (Горная Шория)	[17, с. 101–109]
36	Чернозем выщелоченный среднемощный тучный, старопашка. Разрез 301 (Кемеровская обл., г. Белово)	[17, с. 110–116]
37	Текстурно-дифференцированная с осветленным горизонтом на глинистых отложениях. Разрез 6–88 (Красноярский край, Шушенское, склон Западного Саяна, стационар “Ермаковское” Института леса и древесины им. Сукачева СО АН СССР)	[17, с. 142–149]
38	Чернозем обыкновенный среднемощный легкоглинистый. Разрез 1 (Барабинская лесостепь, Кожурла)	[18, с. 70–74]
39	Лугово-черноземная солонцеватая маломощная легкоглинистая. Разрез 2 (Бараба)	[18, с. 74–77]
40	Солонец черноземно-луговой глубокий глинистый. Разрез 3 (Бараба)	[18, с. 77–81]
41	Луговая карбонатная среднемощная тучная среднесуглинистая. Разрез 4 (Бараба)	[18, с. 81–85]
42	Дерново-подзолистая с ВГГ, лес. (Томская обл.)	[18, с. 97–106]
43	Рышковская (микулинская) палеопочва (дерново-палево-подзолистая). Разрез 15 (Курская обл., Александровский карьер)	[19, с. 96–99]
44	Дерновая заболоченная временно избыточно увлажняемая на древнеаллювиальных песках. Разрез 45М (Брестская обл. Белоруссии)	[20]
45	Дерновая заболоченная (дерново-глееватая) на древнеаллювиальных песках. Разрез 44М ((Брестская обл. Белоруссии)	[20]
46	Серая лесная освоенная с ВГГ. Разрез 50 (Владимирское Ополье, г. Юрьев-Польский)	[21, с. 16–25]
47	Серая лесная освоенная остаточной-карбонатная. Разрез 51 (Владимирское Ополье, г. Юрьев-Польский)	[21, с. 16–25]
48	Серая лесная с ВГГ, лес. Разрез 36 (Владимирское ополье, г. Юрьев-Польский)	[21, с. 16–25]
49	Дерново-подзолистая глубокоглеевая старопашотная. Разрез 13–72 (Ярославская обл., Переславский р-н, северный склон Клиско-Дмитровской гряды)	[21, с. 70–74]
50	Дерново-подзолисто-глеевая старопашотная. Разрез 14–72 (ниже по склону разреза 13–72)	[21, с. 74–77]
51	Дерново-глеевая старопашотная, заболоченный луг. Разрез 12–72 (Ярославская обл., Переславский р-н)	[21, с. 77–80]
52	Светло-бурая слабооподзоленная псевдофибровая песчаная, сосновый бор. Разрез 1 (Окско-Мещерское Полесье, Спас-Клепики)	[21, с. 87–95]
53	Подзолистая глееватая псевдофибровая песчаная, сосновый бор. Разрез 2 (Окско-Мещерское Полесье, Спас-Клепики)	[21, с. 87–95]
54	Дерново-подзолистая гумус-железисто-иллювиальная глеевая песчаная, смешанный лес. Разрез 3 (Окско-Мещерское Полесье, Спас-Клепики)	[21, с. 87–95]
55	Пойменная дерновая зернистая глубокооглеенная глинистая (1960 г.). Разрез 9 (Раменское расширение поймы р. Москвы)	[21, с. 107–118]
56	Пойменная дерновая зернистая глубокооглеенная глинистая, 26 лет дренажа. Разрез 9 (Раменское расширение поймы р. Москвы)	[21, с. 107–118]

Таблица 1. Окончание

№	Название почвы (место отбора проб)	Ссылка
57	Пойменная дерновая зернистая глееватая глинистая (1960 г.). Разрез 10 (Раменское расширение поймы р. Москвы)	[21, с. 107–118]
58	Пойменная дерновая зернистая глееватая глинистая, 26 лет дренажа. Разрез 10 (Раменское расширение поймы р. Москвы)	[21, с. 107–118]
59	Пойменная дерновая зернистая глеевая глинистая (1960 г.). Разрез 12 (Раменское расширение поймы р. Москвы)	[21, с. 107–118]
60	Пойменная дерновая зернистая глеевая глинистая, 26 лет дренажа. Разрез 12 (Раменское расширение поймы р. Москвы)	[21, с. 107–118]
61	Серогумусовая (дерновая) постагрогенная. Разрез Р-6–19 (Республика Коми, Карготский)	[22, с. 10–18]
62	Гумусово-квазиглеевая на юрских глинах, луг. Разрез Р-14–19 (Республика Коми, Карготский)	[22, с. 19–28]
63	Подзол иллювиально-железистый (фоновая). (Республика Коми, г. Сыктывкар, около песчаных карьеров “Язель”)	[22, с. 32–43]
64	Псаммозем гумусовый оподзоленный глееватый, днище песчаного карьера, сосняк с лишайником, 45 лет сукцессии. (Республика Коми, г. Сыктывкар, карьер “Язель”)	[22, с. 32–43]
65	Подзол иллювиально-железистый, лес (фоновая). (Республика Коми, г. Сыктывкар, около песчаных карьеров “Даса”)	[22, с. 44–59]
66	Псаммозе гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый, ме- дурядье лесных посадок в карьере, 18 лет сукцессии. (Республика Коми, г. Сыктыв- кар, карьер “Даса”)	[22, с. 44–59]
67	Подзолистая грубогумусовая потечно-гумусовая (фоновая). (Республика Коми, г. Сы- ктывкар, около карьера “Важалью”)	[22, с. 66–68]
68	Подзолистая с микропрофилем подзола. Разрез Р-2 (Республика Коми, г. Сыктывкар, Максимовский стационар)	[22, с. 155–165]
69	Агродерново-подзолистая, осушена, 40 лет освоения. Разрез 1-Р-Б (Республика Коми, г. Сыктывкар)	[22, с. 165–170]
70	Дерново-подзолистая. Разрез Р-1 (Республика Коми, юг, Летка)	[22, с. 181–191]
71	Дерново-глубокоподзолистая остаточно-карбонатная среднесуглинистая с ВГГ на по- кровном карбонатном суглинке, хвойный лес. Разрез Я-1 (Кировская обл., Вятское Прикамье)	[22, с. 199–233]
72	Дерново-неглубокоподзолистая остаточно-карбонатная среднесуглинистая с ВГГ на покровном карбонатном суглинке, вторичный березняк. Разрез П-4 (Кировская обл., Вятское Прикамье)	[22, с. 199–233]
73	Дерново-мелкоподзолистая с ВГГ на покровном бескарбонатном суглинке, целинный ельник. Разрез С-8 (Кировская обл., Вятское Прикамье)	[22, с. 199–233]
74	Агродерново-мелкоподзолистая среднесуглинистая с ВГГ на покровном бескарбонат- ном суглинке, пашня. Разрез С-9 (Кировская обл., Вятское Прикамье)	[22, с. 199–233]
75	Гумус-иллювиальный подзол на элювии песчаников, лес. Разрез 20 (Румыния, Карпаты)	[2]
76	Глубокооподзоленная оглеенная на иловато-пылеватой глине, лес. Разрез 1 (Хабаров- ский край)	[2]
77	Коричневая оподзоленная на пылевато-глинистом лессе, лес. Разрез 62 (Румыния, Бухарест)	[2]
78	Буряя лесная оподзоленная на пылевато-среднесуглинистом лессе. Разрез 11 (Герма- ния (ГДР), Йена)	[2]

Примечание. Нумерация почв та же в табл. 2.

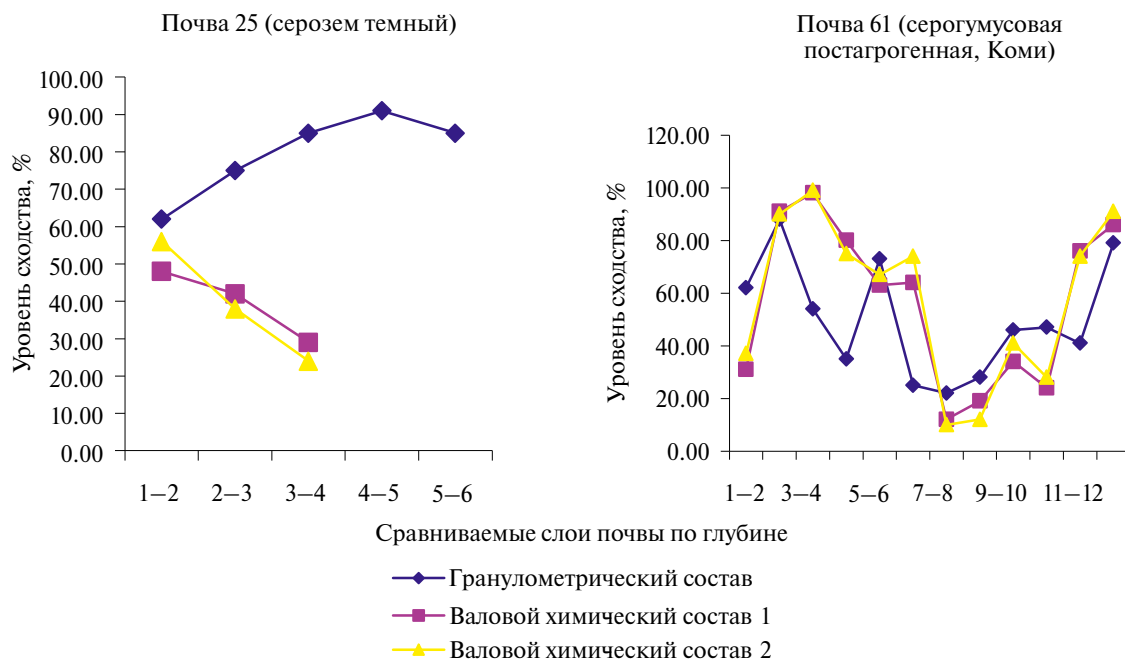


Рис. 1. Примеры схождения соседних слоев (горизонтов) почв по глубине при малом и большом числе границ между слоями. Объяснение 2-х вариантов кривых схождения для валового химического состава смотри в тексте.

и по совокупности химических элементов) оценивали в виде схождения соседних слоев (горизонтов) сверху вниз (рис. 1).

Интерпретация полученной при этом закономерности была предложена ранее [3, 4]. Она состоит в том, что вероятность наличия границы между соседними слоями (горизонтами) почвы велика, если схождение между ними уменьшается (не менее чем на 3–5%) или составляет <40% от полного (100%-ного) схождения. Сам уровень схождения оценивается, например, через евклидово расстояние, если признаки (показатели) объектов не составляют 100%-ную смесь (как для валового химического анализа), или через меры расстояния для 100%-ных смесей (гранулометрический состав), например, как в работе [5]. Таким образом, оценивали количество возможных границ в конкретном профиле для гранулометрического и валового химического составов отдельно. В этом случае важно отметить, что для 31-й почвы из 78-ми было определено содержание карбонатов. В этих случаях этот показатель был добавлен при оценке количества границ непосредственно в зависимости от валового химического состава.

2. Степень дифференциации (СД) отдельных почвенных показателей по профилю в целом оценивали по 3-й (информационной по Шеннону для функции распределения) модели из работы [6]. Эта модель оценивает степень дифференциации в интервале показателей от -1 до $+1$; положительные

величины соответствуют аккумулятивному типу распределения по профилю (уменьшение показателя сверху вниз), отрицательные — элювиальному типу (увеличение показателя сверху вниз). Практика показывает, что для удобства восприятия оценки степени дифференциации в первую очередь стоит перейти к интервалу показателей от -100 до $+100$ (т.е. к долям от максимума, %), во-вторых, использовать для выбранной модели логарифмическую шкалу из-за преобладания очень малых абсолютных величин. Нами предложен диапазон абсолютных величин от 100 до 10% считать сильной степенью дифференциации, от 10 до 1% — средней, от 1 до 0.1% — слабой, <0.1% — очень слабой. В то же время при группировках использовали исходные показатели СД, чтобы не смешивать в одном расчете разные шкалы измерений для разных показателей.

Используемая в этом случае модель дифференциации предусматривала и учет ошибок измерения показателя с тем или иным уровнем значимости — чем меньше ошибка и больше уровень значимости, тем выше расчетная степень дифференциации (абсолютная величина). В данной работе использован уровень значимости 0.05, обычный в почвоведении и агрохимии. Большие ошибки измерения уменьшали оценку степени дифференциации вплоть до нулевой, что показано в табл. 2.

Для валового химического анализа использовали межлабораторные ошибки [7, с. 104], для

Таблица 2. Количественные оценки профилей почвенных педоматриц

Почва, №	Гранулометрический состав				Валовой химический состав										
	ФГ		КРП		n гр.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		SiO ₂ /Fe ₂ O ₃		SiO ₂ /CaO		SiO ₂ /MgO		SiO ₂ /Na ₂ O	
	СД, %	среднее	СД, %	среднее		СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее
1	2	50.9	0.211	34.5	-0.540	1	5.15	0	14.45	-1.35	49.4	64.2	0.414	67.1	0.821
2	1	45.9	-0.947	51.7	0.611	3	6.59	0	19.4	4.19	95.4	72.8	11.2	172	4.37
3	2-3	47.8	-1.09	50.7	0.946	3	6.82	0	18.3	0	120	79.6	0.206	77.4	1.53
4	1	45.1	-0.113	46.3	-1.13	3	6.25	0	22.5	-0.315	113	79.4	-1.29	88.7	-0.202
5	1	57.8	-0.707	34.8	0.280	1	6.24	0	16.9	1.08	57.6	75.0	0.986	94.0	-0.228
6	1	58.4	0.170	39.1	-0.0317	3	6.64	0	16.7	0.220	44.0	52.4	0.0125	70.4	1.15
7	0	60.7	-0.208	37.3	0.141	2-3	6.00	0	12.2	0.0226	35.4	36.9	2.23	92.4	1.20
8	2	56.3	-2.02	36.6	2.51	3	7.88	0.405	13.1	1.72	107	62.5	5.57	80.1	1.30
9	1	67.4	-1.35	27.8	2.06	2	5.99	0.550	22.9	3.86	86.1	82.4	2.90	—	—
10	6	55.9	-1.04	18.6	0.0575	3-4	3.51	0	8.92	0.611	22.6	55.4	-0.785	120	1.78
11	1	48.5	-0.255	16.4	3.17	3-4	2.92	0	8.48	0.0098	38.4	57.1	1.17	125	-0.406
12															
13	1	45.3	-0.529	47.3	0.508	1-2	4.65	0	11.3	0	181	24.0	-1.15	38.1	0.140
14	2	38.2	1.42	33.2	0.136	2-3	4.66	0	13.1	0.239	106	20.85	0.173	39.9	-0.111
15	3	35.9	-1.02	41.6	-0.807	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	2	36.15	-1.65	37.6	-0.447	2	5.12	0	14.1	0.499	921	19.6	0.362	40.7	0.0395
17	2	39.2	-0.791	47.1	-0.0317	1-2	4.31	0	13.9	-0.0041	—	47.2	5.33	40.0	0.381
18	3	59.4	-1.30	26.6	-2.40	2	4.42	0	11.7	0.249	402	15.5	0.0452	32.3	1.38
19	4	17.8	0.367	22.9	-0.0857	2-3	6.54	0	18.5	-0.0855	159	21.1	1.18	40.6	0.442
20	2	54.4	-0.478	36.7	0.0118	1-3	4.61	0	12.0	0	737	14.2	0	40.7	-0.126
21	4	33.9	-3.16	40.3	-0.205	2	7.68	2.16	21.1	1.02	48.45	56.5	1.50	107	-0.495
22	3	41.8	-0.577	43.3	0.569	3	5.56	0	16.9	1.48	47.5	62.1	-0.404	92.2	0.0064
23	2	56.1	-0.251	34.7	0.132	2-3	4.68	0	13.3	0	7.96	35.25	-1.70	219	-15.3
24	2	60.3	-1.76	30.7	1.10	2	3.91	0	13.4	-0.133	24.3	46.2	-0.398	90.25	0.380
25	1	57.1	-0.605	32.8	1.03	2	4.49	0	11	0	75	27.3	0.0468	42.9	-0.643
26	2	50.5	-0.29	37.6	0.568	1-2	4.24	0	11.1	0	54.2	27.8	1.41	38.8	-0.0804
27	2-3	50.5	-0.745	43.4	0.262	2-3	4.57	0	11.3	0	113	34.2	-0.838	44.25	-2.03
28	3	50.4	-0.188	41.1	0.383	≥ 1	4.46	0	11.65	0.219	59.3	29.15	0.0882	42.05	-0.346
29	3	44.4	0.104	40.3	-0.434	≥ 2	4.64	0	12.4	0	173	22.1	0.0868	35.7	0.0991

Таблица 2. Продолжение

Почва, №	Гранулометрический состав				Валовой химический состав											
	n гр.	ФГ		КРП		n гр.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		SiO ₂ /Fe ₂ O ₃		SiO ₂ /CaO		SiO ₂ /MgO		SiO ₂ /Na ₂ O	
		среднее	СД, %	среднее	СД, %		среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %
30	1	49.5	0.882	28.4	0.317	2-3	5.46	0	12.9	0	48.4	0.586	10.9	-0.565	39.1	-0.668
31	3	33.4	0.617	48.7	0.308	2	5.19	0	12.0	0.0753	32.85	0	54.3	0.162	-	-
32	1	7.52	1.53	6.6	1.69	4	9.69	0.125	23.8	1.71	97.7	-0.647	141	-0.170	105	0.171
33	2	60.75	-1.16	28.1	1.63	2-3	3.82	0	10.9	0.719	56.9	0.0741	31.65	1.60	80.4	0.846
34	5	19.3	-4.93	Для >1												
34	2	43.1	1.265	30.3	1.06	2-3	4.37	0	11.4	0.236	77.8	-1.63	46.0	0.566	-	-
35	2	69.7	-2.58	Для >1												
35	3	57.2	-1.25	36.8	1.54	2	3.89	0	10.5	0.671	63.9	2.09	37.1	0.143	-	-
36	3	58.6	-0.213	33.5	0.281	2-4	4.57	0	12.3	0.0708	22.3	-0.0463	45.7	0.907	-	-
37	6	46.3	-1.31	22.9	1.57	3-4	4.49	0	12.2	0.434	36.6	-0.411	37.5	-0.381	-	-
38	3	59.5	0.582	18.3	1.60	3	4.05	0	11.9	-0.0161	19.0	2.33	48.1	-1.07	46.1	0.181
39	2	58.1	0.886	17.9	1.23	2-3	4.3	0	12.05	-0.0479	14.75	0.400	68.4	4.58	43.9	-0.0109
40	2	50.0	1.45	18.4	1.35	2	4.12	0	12.7	0.281	17.5	3.06	38.4	4.18	39.6	0.814
41	3	37.2	-0.166	19.6	1.90	3	4.30	0	12.7	0.0360	5.96	1.30	21.0	-1.95	45.5	0.824
42	4	57.5	-1.88	28.7	1.54	3-4	4.37	0	13.4	1.28	49.8	0.125	91.3	6.64	46.85	-0.0503
43	3	38.1	0.058	60	-0.043	3-6	8.92	0.130	29.6	1.08	129	-0.541	131.5	1.11	145	-0.459
44	2	4.47	-0.745	5.38	4.61	3-4	36.4	-1.45	99.8	-0.633	105	-7.99	219	-2.82	-	-
45	2	7.59	3.33	5.62	5.74	3	30.0	-1.11	48.6	-2.63	147	-8.52	171	-6.49	-	-
46	3	49.8	-2.07	45.0	1.19	2	6.66	0.061	17.7	0.892	55.7	-0.367	81.5	1.92	76.7	-0.0793
47	1	50.7	-0.456	46.7	0.566	3	5.79	0	14.3	0.514	34.2	3.63	43.95	3.75	69.9	0.344
48	2	45.7	-2.05	49.7	1.32	2	7.31	0.576	19.2	1.14	63.7	0.634	78.8	2.19	78.2	-0.713
49	5	44.6	-3.19	40.5	1.26	5-6	5.60	0.188	47.9	-0.492	49.9	0.0775	118	3.18	75.1	0.153
50	4	40.6	-4.16	39.1	0.29	3-4	5.58	0.0667	16	1.26	49.8	0.458	93.3	0.565	74.1	0.137
51	4	41.6	-1.67	40.6	0.138	5	4.82	0	24	1.80	38.8	-0.296	132	-0.305	78.1	0.238
52	3	6.17	2.87	4.43	-2.02	4	40.9	-0.213	479	0.727	817	-1.67	1190	-0.245	-	-
53	1	6.475	4.19	9.375	-1.47	2	38.2	-1.13	1320	-13.4	-	-	-	-	-	-
54	2	5.74	0.751	8.78	0.0809	2	38.6	-1.05	764	-7.11	-	-	-	-	-	-
55	2	59.2	-1.62	40	1.18	1-2	4.61	0	10.3	0.548	47.1	-2.37	49.7	1.15	-	-

Таблица 2. Окончание

Почва, №	Гранулометрический состав				Валовой химический состав										
	n гр.	ФГ		КРП	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		SiO ₂ /Fe ₂ O ₃		SiO ₂ /CaO		SiO ₂ /MgO		SiO ₂ /Na ₂ O		
		среднее	СД, %		среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	
56	1	58.85	-1.55	27.85	3.78	1-2	4.44	0	8.7	1.06	26.7	0.0579	27.1	0.571	—
57	1-2	63.7	-1.02	33.7	2.03	1-2	4.3	0	10.2	0	47.2	0.928	56.65	0.193	—
58	1	60.35	-0.376	30.7	1.63	1-2	4.44	0	9.565	0	28.4	-0.603	26.45	0.0368	—
59	1	68.0	-4.37	31.2	4.85	2	4.485	0	9.295	0.205	52.4	-0.828	50.4	1.19	—
60	1	65.8	-1.21	24.75	4.11	2	4.33	0	9.92	0.339	27.6	0.242	25.85	0.103	—
61	6	30.5	-0.182	29.1	-0.165	6-7	5.06	-0.0004	26.3	-5.09	54.9	-1.81	65	0.218	-0.104
62	3-4	79.2	-1.01	16.7	1.26	6-8	5.57	-2.61	10.75	0.562	22.8	-0.188	28.7	0.303	0.0007
63	4	6.25	-0.384	3.13	0.455	3-4	9.28	0.758	90.75	0.304	141	-0.693	128	4.19	-0.44
64	3	4.07	-1.07	1.27	-1.15	1	10.4	0.378	85.1	1.09	112	0.575	102	1.99	1.11
65	3	7.13	1.31	1.86	5.87	1-2	7.51	2.79	63.6	6.39	143	0.927	111	6.45	-0.809
66	2	12.4	0.792	7.42	0.640	1	5.74	0	30.9	-0.504	30.2	2.64	42.8	-0.242	0.113
67	2	30.1	-3.36	17.8	0.661	0-1	4.66	1.57	29.3	5.98	65.8	2.12	47.7	6.44	-2.47
68	3	30.75	-4.74	50.9	0.982	3	6.61	1.42	25.1	5.03	76.8	2.30	87.4	5.39	-0.532
69	≥ 5	41.4	-2.40	44.4	1.07	6	6.21	0.355	17.1	2.43	51.8	1.02	54.15	2.81	0.0558
70	2	42.8	-2.52	53.3	0.77	4-5	5.52	0.217	16.1	1.75	88.6	-0.0866	57.5	2.83	-0.733
71	6	47.3	-1.51	38.3	1.24	4	5.825	-0.0095	11.8	2.78	59.5	-5.09	50	0.815	-0.95
72	2	48.5	-1.69	36.5	0.685	2-3	6.05	0	14.4	0.952	67.4	-0.127	49.9	2.65	0.212
73	2	48.3	-2.06	39.5	0.66	2-3	6.18	0	16.4	1.7	60.5	-5.06	56.7	1.59	-0.838
74	1	48.2	-1.45	40.2	1.09	1-2	5.97	0.199	14.3	2.52	50.7	2.5	48.1	3.47	-0.132
75	3	21.0	1.48	16.4	0.079	2-3	7.53	0.814	28.8	2.87	711	-4.43	71.5	2.88	5.11
76	5	60.1	-0.651	29.2	1.32	5	—	—	12.1	0.098	63.5	-0.359	61.3	0.461	—
77	5	51.5	-0.637	42.3	0.596	2-3	—	—	11.6	0.465	82.15	-1.72	39.2	1.09	—
78	3	37.5	-1.98	48.7	0.191	3	6.55	0.052	17.2	3.03	115	-1.91	54.8	2.45	-0.269

Примечания. n гр. – количество выявленных границ в данной группе показателей, СД – степень дифференциации. То же в табл. 5, 7. ФГ – физическая глина, КРП – фракция крупной пыли. То же в табл. 3.

фракций гранулометрического анализа — 1%, рекомендованный Н.А. Качинским [8, с. 177].

Для гранулометрического анализа степень дифференциации оценивали для расчетной фракции физической глины (**ФГ**), которая используется при классификациях почв на уровне разновидностей, и для фракции крупной пыли (**КРП**), которая часто является одной из крупнейших.

Для валового химического анализа (на прокаленную навеску) границы между слоями (горизонтами) почвы выявляли для 2-х вариантов: по содержанию (%) SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O и карбонатов (если есть), а также по отношениям $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, SiO_2/CaO , SiO_2/MgO , $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, которые легко пересчитать в молекулярные отношения, часто используемые для интерпретации почвенных процессов. Для этого процентные отношения для $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ надо умножить на коэффициент 1.697, $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ — на 2.658, SiO_2/CaO — на 0.9333, SiO_2/MgO — на 0.6708, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ — на 1.0315. Содержание натрия включено в рассмотрение из-за засоленных и солонцеватых почв, а содержание калия не использовано для сокращения числа показателей.

Число границ между слоями при 2-х представлениях валового химического состава могло не совпадать, в этом случае для дальнейшего анализа брали среднюю величину. Степень дифференциации оценивали для каждого отношения оксидов (фактически для молекулярных отношений).

В результате этих расчетов была получена матрица из 16-ти показателей для всех почв, но имелись и пропуски, обусловленные отсутствием некоторых данных в источниках. Для каждого показателя по всей выборке были построены гистограммы, плотности и функции распределения [9, 10], посчитаны коэффициенты корреляции, проведены многомерные группировки почвенных тел (педоматриц).

Группировки проведены по 2-м алгоритмам: построением дендрограммы сходства и разбиением на группы по разности между средними внутри- и межклассовых сходств объектов (профилей почв) (парно-групповой критерий) [9, с. 77–81, 11, с. 63–64]. Для отдельных показателей внутри групп получены непараметрические статистики, т.к. в большинстве случаев выборки далеки от нормальных и даже унимодальных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Статистические характеристики для всей выборки почв по вышеназванным показателям представлены в табл. 3.

Показано, что для большинства показателей имеются либо 2 моды, либо длинные хвосты, т.е. выборку нельзя признать однородной, что не удивительно при довольно широкой ее географии (нельзя исключать также аналитических ошибок и опечаток в источниках). Такая структура выборки проявилась и при попытке визуализировать ее методом главных компонент (**МГК**): сами главные компоненты (**ГК**) слабо выражены (целых 5 компонент требуется для описания $\approx 70\%$ информации), а визуально получается одно большое сгущение объектов (почв) и рассеянное облако вокруг него. Это означает, что информация при выбранном нами способе оцифровки педоматриц сильно размазана по многим показателям. В то же время наличие 2-х мод нескольких показателей дает надежду на возможную группировку почвенных тел, что частично и оправдалось в дальнейшем.

Рассмотрим подробнее оценки степени дифференциации использованных показателей педоматриц (табл. 3). Для **ФГ** и мода, и нижний квартиль соответствуют средней степени дифференциации; для **КРП** средней степени соответствуют мода и верхний квартиль. Для отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и мода, и оба квартиля соответствуют слабой степени дифференциации, для $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ — соответствуют средней степени, для SiO_2/CaO — средней степени (а хвост даже сильной), для SiO_2/MgO — средней степени, для $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ — слабой степени (но одна почва хвоста — сильной степени). Таким образом, для большинства показателей отмечена средняя степень дифференциации по профилю, а самую слабую дифференциацию имеет отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Для педоматриц отдельных почв, конечно, имеют место и отклонения от указанных общих тенденций. Укажем почвы с наибольшей степенью дифференциации по отдельным показателям: **ФГ** — почва 68 подзолистая с микропрофилем подзола, почва 50 дерново-подзолисто-глеевая старопашотная, почва 53 подзолистая глееватая песчаная, почва 59 пойменная дерновая глеевая глинистая (все они элювиального типа); **КРП** — почва 65 подзол иллювиально-железистый, почва 59 пойменная дерновая глеевая глинистая, почва 45 дерновая заболоченная на древнеаллювиальных песках, почва 44 аналогичная (все они аккумулятивного типа); $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ — почва 21 soddy-podsolic, почва 62 гумусово-квазиглеевая на юрских глинах, почва 65 подзол иллювиально-железистый (дифференциация разного типа); $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ — почва 67 подзолистая грубогумусовая, почва 65 подзол иллювиально-железистый, почва 54 дерново-подзолистая гумус-железисто-иллювиальная глеевая песчаная, почва 53 подзолистая глееватая песчаная (дифференциация разного типа); SiO_2/CaO — почва 13 серозем типичный целинный, почва 29 серозем типичный

Таблица 3. Статистические характеристики показателей для выборки в целом

Показатель	Медиана	Квартили	Моды
Число границ по гранулометрии	2.4	1.5–3.2	1.7–2.6 (главная) ≥ 5.2–6.1 (5 объектов)
Число границ по химсоставу	2.5	1.8–3.3	1.4–3.3
ФГ _{ср} , %	47.0	34.1–56.8	47.1–58.1 (главная) ≤ 3.3–14.3 (10 объектов)
КРП _{ср} , %	34.0	22.1–42.0	34.9–43.5 (главная) ≤ 0.68–9.24 (10 объектов)
СД (ФГ), %	–0.69	–1.7...+0.23	–2.23...+0.38
СД (КРП), %	+0.71	+0.031...+1.63	–0.073...+1.13
SiO ₂ /Al ₂ O _{3ср}	5.41	4.0–7.76	4.4–6.0 Хвост – >29 (5 объектов)
СД (SiO ₂ /Al ₂ O ₃), %	+0.072	–0.20...+0.34	–0.30...+0.48
SiO ₂ /Fe ₂ O _{3ср}	60	28–93	8.4–17.2 Хвост – >44 (9 объектов)
СД (SiO ₂ /Fe ₂ O ₃), %	+0.45	–0.33...+1.51	–0.21...+1.12 Хвост – <–5.0 (3 объекта)
SiO ₂ /CaO _{ср}	67.7	32.3–125	32–59 Хвост – >376 (5 объектов)
СД (SiO ₂ /CaO), %	+0.085	–3.2...+2.45	–0.72...+1.2 Хвост – <–16 (2 объекта)
SiO ₂ /MgO _{ср}	52.7	34.2–74.6	(1) 19.2–27.6 (2) 44.5–52.9 Хвост – >165 (3 объекта)
СД (SiO ₂ /MgO), %	+0.90	–0.29...+2.56	–0.11...+1.5
SiO ₂ /Na ₂ O _{ср}	70.2	46–95	(1) 39.5–47 (2) 70–77.4 Хвост – >214 (1 объект)
СД (SiO ₂ /Na ₂ O), %	–0.0029	–0.42...+0.61	–0.44...+0.27 Хвост – <–13.6 (1 объект)

Примечание. Индекс _{ср} – среднее по профилю почвы.

староорошаемый (дифференциация разного типа); SiO₂/MgO – почва 67 подзолистая грубогумусовая, почва 65 подзол иллювиально-железистый, почва 45 дерновая заболоченная на древнеаллювиальных песках, почва 42 дерново-подзолистая с ВГГ (вторым гумусовым горизонтом), почва 2 серая лесная пахотная (дифференциация разного типа); SiO₂/Na₂O – почва 23 чернозем типичный, почва 75 гумус-иллювиальный подзол на элювии песчаников (дифференциация разного типа).

Сгруппируем ту же информацию по почвам. Наиболее дифференцированная почва – почва 65 подзол иллювиально-железистый – 4 показателя аккумулятивного типа распределения; 4 почвы (45, 53, 59, 67) – сильно-средне дифференцированы по 2-м показателям; еще 11 почв заметно дифференцированы по одному показателю.

Интересно оценить, насколько различается число границ в профилях, найденное

по гранулометрическому и валовому химическому составам для выборки в целом. Медианы и квартили близки между собой, но есть различия в количестве мод (табл. 3). Коэффициент корреляции между числом границ не высок (0.55), но уровень значимости равен 0.001; однако доверие к этому результату невелико, т.к. распределения обоих показателей (особенно первого) далеки от нормальных. Проведено также сравнение этих показателей по *t*-критерию для сопряженных выборок: средняя разность между первым и вторым равна –0.18 при ее ошибке 0.15, разность незначима. Таким образом, значительные расхождения могут быть для отдельных почв, но не для выборки в целом.

Конечно, важен вопрос не только о количестве границ по разным подходам, но и о близости этих границ между собой по глубине. Но этот вопрос в данной работе не рассматривали.

Необходимо отметить, что несмотря на выявленные сложности эмпирических распределений отдельных показателей, имелось довольно много условно значимых парных корреляций для выборки в целом. В качестве наиболее существенных ($r > 0.7$) можно указать корреляции между средними по профилю величинами отношений валовых содержаний: $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и SiO_2/MgO , $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и SiO_2/MgO , $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$; это может представлять интерес для минералогии почв, как и обобщенные данные дифференциации из табл. 3. Наличие этих корреляций проявилось и при выявлении избыточности информации при группировках почв.

Обратимся к результатам группировки педоматриц (их возможной макроорганизации в выборке по географическому и/или почвенно-классификационному принципу). Так как обычные алгоритмы группировок не позволяют иметь пропуски в данных (табл. 2), то имели дело с 2-мя вариантами подвыборок: 56 почв со всеми 16-ю показателями (включавшими натрий) и 71 почва с 14-ю показателями (без натрия). Принципиальной разницы в группировках этих подвыборок не видели, и далее приводим результаты только первой из них.

Разделение на группы по дендрограмме сходства определяется выбором порогового уровня — чем он выше, тем больше выделяется групп, но меньшего объема. Разделение по парно-групповому критерию обычно показывает следующую закономерность: сначала с ростом числа групп качество разделения улучшается, а с некоторого порога оно начинает уменьшаться или сохраняется на одном уровне. Отталкиваясь от 2-го алгоритма, можно определить минимальное количество групп с желаемым качеством разделения и наполняемостью групп. А затем подобрать такой уровень сходства на дендрограмме, чтобы получилось сопоставимое количество групп.

Для подвыборки 56×16 получен такой вариант приблизительной согласованности (табл. 4): по парно-групповому критерию — 23 группы (в том числе, 13 групп по одной почве, 5 — по 2 почвы, 2 — по 3 почвы, 3 группы содержали более 3-х почв); по дендрограмме при уровне сходства 70–61% — 24 группы (в том числе, 14 групп по одной почве, 5 — по 2 почвы, 2 — по 3 почвы, 3 группы содержали более 3-х почв).

Почвенный состав групп по 2-м алгоритмам не совпадает, хотя и пересекается. Далее для сокращения объема статьи подробно покажем результаты, полученные при группировке с помощью дендрограммы.

В табл. 5 почвы охарактеризованы крупными разделами почвенно-географического районирования (пояс, зона/подзона, провинция), типами

почв по Классификации почв СССР 1977 г., отделами по Классификации почв России 2004 г., а также названием гранулометрического состава, наличием карбонатов (есть или нет) и разделением химико-минералогического состава по содержанию SiO_2 ($>60\%$ — сиаллитные кислые минералы, $<60\%$ — сиаллитные прочие минералы; использовано в Классификации 2004 г., с. 288–289).

Отметим, что отнесение по районированию проведено нами, по классификациям — частично нами, а остальные показатели оценены по фактическим данным.

Так как объем подвыборки ограничен и получен не случайным образом, то об однородности полученных групп (табл. 5) можно судить не столько по совпадениям показателей использованных характеристик в группе, сколько по их различиям (т.е. совпадения в этом случае более ожидаемы по алгоритму группировки, чем несовпадения). Более или менее разделяются легкие и тяжелые почвы, но в группе 11 и они смешались. По наличию карбонатов уже присутствуют 3 смешанные группы (1-я, 3-я и 4-я). Подавляющее число почв в выборке содержит кислые сиаллитные минералы, но и они смешаны с прочими в группе 4. По географическим и классификационным почвенным характеристикам группы практически всегда являются смешанными. Таким образом, предположение В.О. Таргульяна о необходимости других критериев географии и классификации педоматриц по сравнению с почвами (см. Введение) находит свое подтверждение.

Статистические характеристики полученных групп из табл. 5 в зависимости от использованных нами количественных показателей представлены в табл. 6.

Чтобы определить, за счет каких показателей различаются группы, был использован метод МГК для медиан показателей в группах. Но результат получился не лучше, чем для исходной выборки объектов — информация также сильно размазана по 5-ти главным компонентам, и ведущие показатели разделения не выделяются. Дендрограмма медиан групп показала на уровне сходства 70% объединение групп 1–4, на уровне 60% — объединение групп (5, 10) и (9, 13, 14). Однако и в этом случае явно не видны причины объединений.

Посмотрим, что можно сказать о группах с числом почв >2 . В группе 1 количество границ слоев по валовому химсоставу в 2 раза больше, чем по гранулометрическому. Следовательно, в почвах этой группы валовой химсостав быстрее или независимо дифференцируется, чем гранулометрический. Обратную закономерность наблюдали в группе 9.

Таблица 4. Характеристика групп подвыборки 56 × 16

Номер группы	Номер почвы	ПОГЕРА			Тип почвы (1977 г.)	Отдел классификации (2004 г.)	Гранулометрический состав	Карбонаты	Силкатные минералы
		пояс	зона (код)	провинция					
1 (5)	1	Бореальный	2-1-3	Среднерусская	Подзолистые	Текст-дифференц.	Легкоглинистый	Нет	Кислые
	5	Суббореальный	3-2-1	Североукраинская	Серые лесные	»	Тяжелосуглинистый	Нет	»
	6	»	3-2-2	Южноукраинская	Черноземы	Аккумулятивные	»	Есть	»
	7	»	3-2-2	Южноукраинская	Черноземы	»	Легкоглинистый	Есть	»
	47	Бореальный	2-1-3	Среднерусская	Серые лесные	Текст-дифференц.	Тяжелосуглинистый	Нет	»
	4	Суббореальный	3-2-1	Оско-Донская	черноземы	Аккумулятивные	тяжелосуглинистый	Есть	«
	3 (9)	Суббореальный	3-2-1	Оско-Донская	Черноземы	Аккумулятивные	Тяжелосуглинистый	Есть	Кислые
2 (1)	22	»	»	Нижекамская	Серые лесные	Текст-дифференц.	Среднесуглинистый	Нет	»
	46	»	»	Оско-Донская	»	»	Тяжелосуглинистый	»	»
	48	»	»	»	»	»	»	»	»
	70	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	»	»	»	»
	72	»	»	»	»	»	»	»	»
	73	»	»	»	»	»	»	»	»
	74	»	»	»	»	»	»	»	»
	78	Суббореальный	3-1-1	Не определена	Бурые лесные	Структурно-метаморфич.	среднесуглинистый	Есть	»
	14	Субтропический	Горная	Зап.	Аллюв-луг. карб.	Аллювиальные	Среднесуглинистые	Есть	Кислые
	24	Суббореальный	3-2-1	Притяньшанская	Черноземы	Аккумулятивные	Легкоглинистые	»	»
4 (12)	25	Субтропический	Горная	Оско-Донская	Сероземы	Не определена	Тяжелосуглинистые	»	»
	26	Суббореальный	- « -	Зап.	Коричневые	Структурно-метаморфич.	Тяжелосуглинистые	»	»
	27	Субтропический	»	Притяньшанская	Бурые лесные	»	Легкоглинистые	»	»
	28	»	»	Юж-Тяньш-Памирск.	Коричневые	»	Легкоглинистые	»	»
	30	»	4-3-2	Зап. Тяньшанская	Аллюв-лугов.	»	Тяжелосуглинистые	»	»
	33	Суббореальный	Горная	Юж-Тяньш-Памирск.	(горно-лесные)	Аллювиальные	Легкоглинистые	Нет	»
	38	»	3-2-2	Зап.	Подзолистые	Не определена	Тяжелосуглинистые	Есть	На
	39	»	»	Притяньшанская	Черноземы	Аккумулятивные	Тяжелосуглинистые	»	границы
	40	»	»	Алтайско-Саянская	Луг-чернозем.	»	Легкоглинистые	»	На
	41	»	»	Предалтайская	Солонец гидром.	Щелочно-глинисто-дифференци-рованные	Среднесуглинистые	»	границы
				»	Луговые	Гидро-метаморфич.	»	»	Прочие
5(2)	8	Суббореальный	3-2-2	Южноукраинская	Солонец автом.	Щелочно-глин-диффер	Среднеглинистые	Есть	Кислые
	42	Бореальный	2-1-3	Среднеобская	Подзолистые	Текстурно-диффер.	легкоглинистые	Есть	кислые
6(1)	11	Суббореальные	горные	Крымская	Коричневые	Структур-метаморф.	тяжелосуглинистые	Есть	Прочие

Таблица 4. Окончание

Номер группы	Номер почвы	ПОГЕРА			Тип почвы (1977 г.)	Отдел классификации (2004 г.)	Гранулометрический состав	Карбонаты	Сиаалитные минералы
		пояс	зона (код)	провинция					
7(2)	19	Субтропический	4-3-1	Южногуранская	Серо-бурая пуст.	Не определена	Супесчаные	Есть	Кислые
66	66	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Не определена	Псаммозем гумусовый	супесчаные	Есть	Кислые
8(1)	10	Суббореальный	Гор- ные/ (3-1-2)	Крымская	Не определена	Структур-метаморф.	тяжелосуглинистые	Нет	Прочие
9(3)	49	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	Тектурно-диффер.	Тяжелосуглинистые	Нет	Кислые
50	50	»	»	»	Подзолистые	Тектурно-диффер.	»»	»	»
51	51	»	»	»	Дерново-глеявые	Альфегумусовые	»	»	»
69	69	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	Тектурно-диффер.	Тяжелосуглинистые	Нет	Кислые
71	71	»	»	»	»	»	»	»	»
11(3)	16	Субтропический	4-3-2	Пригиссарская	Орош. серозем	Не определена	Среднесуглинистые	Есть	Кислые
18	18	»	4-3-1	Северотуранская	Такыр	Не определена	Среднеглинистые	»	»
20	20	»	»	»	Орош. луговая	Аллювиальные	Супесь	»	»
12(2)	13	Субтропический	4-3-2	Зап. Припятская	Серозем	Не определена	Тяжелосуглинистые	Есть	Кислые
29	29	»	»	»	»	Не определена	Среднесуглинистые	»	»
13(1)	21	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	Тектурно-диффер.	Среднесуглинистые	Нет	Кислые
14(1)	68	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегодский	Подзолистые	Тектурно-диффер.	Среднесуглинистые	Нет	Кислые
15(1)	67	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегодский	Подзолистые	Тектурно-диффер.	Среднесуглинистые	Нет	Кислые
16(1)	32	Суббореальный	3-2-2	Предлтайская	Подзолистые	Тектурно-диффер.	Пески связанные	Нет	Кислые
17(1)	43	Суббореальный	3-2-1	Окско-Донская	Не определена	Не определена	Среднесуглинистые	Нет	Кислые
18(1)	61	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегодский	Не определена	Органо-аккумулятив.	Среднесуглинистые	Нет	Кислые
19(1)	75	Суббореальный	3-1-2	Карпатская	Подзол	Альфегумусовые	Легкосуглинистые	Нет	Кислые
					гумус-иллювиальный				
20(1)	62	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегодский	Не определена	Не определена	Среднесуглинистые	Нет	Кислые
21(1)	2	Суббореальный	3-2-1	Окско-Донская	Серые лесные	Тектурно-диффер.	тяжелосуглинистые	Нет	Кислые
22(2)	63	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегодский	Подзол	Альфегумусовые	Пески связанные	Нет	Кислые
64	64	»	»	»	иллюв-железистый	Слаборазвитые	Пески рыхлые	»	»
					Не определена				
23(1)	23	Суббореальный	3-2-1	Нижекамская	Черноземы	Аккумулятивные	тяжелосуглинистые	Есть	Кислые
24(1)	65	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегодский	Подзолистые	Альфегумусовые	Пески связанные	Нет	Кислые

Примечание. ПОГЕРА – почвенно-географическое районирование (использован классификатор из “Методического руководства по описанию почв в системе информационной базы классификации”, М: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 1986, 126 с.), горные зоны/подзоны указаны для ясности текстом; для сиаалитных минералов “на грани” означает, что содержание кремнезема соответствует граничной величине между “кислыми” и “прочими”. То же в табл. 7.

* В скобках указано количество почв в группе. То же в табл. 6.

Таблица 5. Статистические характеристики (параметры) групп педоматриц из табл. 4

Параметр	Гранулометрический состав			Валовой химический состав									
	n гр.	ФГ		КРП	n гр.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		SiO ₂ /Fe ₂ O ₃		SiO ₂ /CaO		SiO ₂ /MgO	
		среднее	СД, %			среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %	среднее	СД, %
Группа 1 (5)													
Медиана	1.0	56.5	-0.20	+0.094	2.4	6.0	0	14.8	+0.17	44.0	+0.14	53.5	+1.2
Кварт. 1	0.7	53	-0.48	-0.17	1.4	5.6	-	13.7	-0.48	39	-0.475	44	+0.60
Кварт. 2	1.3	59	+0.03	+0.34	2.7	6.3		15.9	+0.65	51	+1.75	65.5	+2.6
Группа 2 (1)													
Медиана*	1	45.1	-0.11	-1.13	3	6.25	0	22.5	-0.315	113	-5.21	79.4	-1.29
Группа 3 (9)													
Медиана	2.15	46.6	-1.8	+0.81	2.7	6.2	+0.090	17	+1.4	67	-0.62	59.5	+2.1
Кварт. 1	1.9	42	-2.1	+0.58	2.1	5.9	+0.042	15.5	+0.88	56	-1.75	53.6	+1.2
Кварт. 2	2.7	48.5	-1.3	+1.1	3.1	6.8	+0.21	18	+2.1	97.5	+0.54	76.5	+2.7
Группа 4 (12)													
Медиана	2.1	52	-0.043	+0.98	2.4	4.3	0	12	+0.052	50	+0.60	31.4	+0.20
Кварт. 1	1.85	48	-0.745	+0.39	1.9	4.1	-	11.3	-0.050	20	-0.45	24	-0.705
Кварт. 2	2.6	58	+0.87	+1.5	2.6	4.6		12.8	+0.25	70	+1.8	43	+1.6
Группа 5 (2)													
Медиана**	3	57	-1.95	+2.0	3.3	6.1	+0.20	13.3	+1.5	78.4	+0.77	77	+6.1
Группа 6 (1)													
Медиана*	1	48.5	-0.255	+3.17	3.5	2.92	0	8.48	+0.010	38.4	+2.0	57.5	+1.17
Группа 7 (2)													
Медиана**	3	15.1	+0.58	+0.28	1.75	6.14	0	24.7	-0.295	94.6	+5.2	32	+0.47
Группа 8(1)													
Медиана**	6	55.9	-1.04	+0.058	3.5	3.5	0	8.9	+0.61	22.6	-4.94	55.4	-0.785
Группа 9 (3)													
Медиана	4.3	41.9	-3.05	+0.45	1.4	5.38	+0.079	26.2	+1.08	46.8	+0.080	116	+0.81
Кварт. 1	4.1	41.2	-3.7	+0.29	0.7	5.0	+0.034	21	+0.07	41.5	-0.11	103	+0.23
Кварт. 2	4.8	43.6	-2.3	+0.99	3.8	5.5	+0.14	40	+1.45	48.4	+0.27	125	+2.3
Группа 10 (2)													
Медиана**	5.75	44.4	-1.96	+1.16	5	6.0	+0.173	14.5	+2.6	55.65	-2.04	52.1	+1.81
Группа 11 (3)													
Медиана	2.3	52.4	-1.2	-0.70	2	4.65	0	12.4	+0.25	700	+0.24	15.9	+0.10
Кварт. 1	2.1	42	-1.45	-1.8	-	4.5	-	12.0	+0.12	530	-0.18	15.0	+0.05
Кварт. 2	2.8	56	-0.77	-0.33	36	5.0		13.5	+0.38	826	+1.63	18.3	+0.27
												39.6	+1.0

Таблица 5. Окончание

Параметр	Гранулометрический состав				Валовой химический состав											
	n гр.	ФГ		КРП		n гр.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		SiO ₂ /Fe ₂ O ₃		SiO ₂ /CaO		SiO ₂ /MgO			
		ср.днне	СД, %	ср.днне	СД, %		ср.днне	СД, %	ср.днне	СД, %	ср.днне	СД, %	ср.днне	СД, %		
Медиана**	2	44.9	-0.21	43.8	-0.037	2	4.65	0	11.9	0	177	-22.8	23	-0.53	36.9	+0.12
Группа 12 (2)																
Медиана*	4	33.9	-3.16	40.3	-0.205	2	7.68	+2.16	21.1	+1.02	48.45	+1.18	56.5	+1.5	107	-0.495
Группа 13 (1)																
Медиана*	3	30.75	-4.74	50.9	+0.98	3	6.61	+1.42	25.1	+5.0	76.8	+2.3	87.4	+5.4	58.15	-0.53
Группа 14 (1)																
Медиана*	2	30.1	-3.36	17.8	+0.66	0.5	4.66	+1.57	29.3	+6.0	65.8	+2.1	47.7	+6.44	100	-2.47
Группа 15 (1)																
Медиана*	1	7.52	+1.5	6.6	+1.7	4	9.7	+0.125	23.8	+1.7	97.7	-0.647	141	-0.17	105	+0.17
Группа 16 (1)																
Медиана*	3	38.1	+0.058	60	-0.043	4.5	8.9	+0.13	29.6	+1.08	129	-0.54	132	+1.1	145	-0.46
Группа 17 (1)																
Медиана*	6	30.5	-0.18	29.1	-0.165	6.5	5.1	-0.00004	26.3	-5.1	54.9	-1.8	65	+0.22	74.6	-0.104
Группа 18 (1)																
Медиана*	3	21	+1.48	16.4	+0.079	2.5	7.53	+0.81	28.8	+2.87	711	-4.43	71.5	+2.88	109	+5.1
Группа 19 (1)																
Медиана*	3.5	79.2	-1.0	16.7	+1.26	7	5.57	-2.6	10.75	+0.56	22.8	-0.19	28.7	+0.30	95.35	+0.0007
Группа 20 (1)																
Медиана*	1	45.9	-0.95	51.7	+0.61	3	6.6	0	19.4	+4.2	95.4	+8.85	72.8	+11.2	172	+4.37
Группа 21 (1)																
Медиана**	3.5	5.16	-0.73	2.2	-0.35	2.3	9.84	+0.57	87.9	+0.70	127	-0.059	115	+3.1	120	+0.335
Группа 22 (2)																
Медиана*	2	56.1	-0.25	34.7	+0.13	2.5	4.7	0	13.3	0	7.96	+2.5	35.25	-1.7	219	-15.3
Группа 23 (1)																
Медиана*	3	7.13	+1.3	1.86	+5.87	1.5	7.5	+2.8	63.6	+6.4	143	+0.93	111	+6.45	131	-0.81
Группа 24 (1)																

Примечание. Прочерк – в данной группе все величины соответствующего показателя одинаковы. *В группах, где одна почва, медиана соответствует единственной величине показателя. ** Медиана – в случае 2-х почв в группе медиана равна среднему арифметическому.

Таблица 6. Характеристика групп подвыборки 56 × 7

Номер группы *	Номер почвы	ПОГЕРА			Тип почвы (1977 г.)	Отдел классификации (2004 г.)	Гранулометрический состав	Карбонаты	Силкатные минералы
		пояс	зона (код)	провинция					
1(7)	1	Бореальный	2-1-3	Среднерусская	Подзолистые	Текстур-диффер.	Легкоглинистые	Нет	Кислые
	6	Суббореальный	3-2-2	Юж-Украинская	Черноземы	Аккумулятивные	Тяжелосуглинист.	Есть	»
	8	Суббореальный	3-2-2	Юж-Украинская	Солонец автом.	Щелочно-глин-дифф.	Среднеглинистые	Есть	»
	47	Бореальный	2-1-3	Среднерусская	Серая лесная.	Текстур-диффер.	Тяжелосуглинист.	Нет	»
	72	»	»	Вятско-Камская	Подзолистые	»	»	»	»
2(2)	73	»	»	»	»	»	»	»	»
	74	»	»	»	»	»	»	»	»
	24	Суббореальный	3-2-1	Окско-Донская	Черноземы	Аккумулятивные	Легкоглинистые	Есть	Кислые
	33	»	Горная	Алтайско-Саян.	Подзолистые (горно-лесные)	Не определена	«	Нет	— « -
	13	Субтропический	4-3-2	Зап. Припятский	Сероземы	Не определена	Тяжелосуглинист.	Есть	Кислые
3(6)	14	»	Горная	»	Аллюв.-лугов. карб.	Аллювиальные	Среднесуглинист.	»	»
	26	Суббореальный	»	Юж-Тяньшань	Коричневая	Структурно-метаморфическ	Тяжелосуглинист.	»	»
	27	Субтропический	»	Памирская	Бурая лесная	»	Легкоглинистая	»	»
	28	»	»	Зап. Припятский	Коричневая	»	»	»	»
	29	»	4-3-2	Юж-Тяньшань-Памирская	Сероземы	Не определена	Среднесуглинист.	»	»
4(2)	25	Субтропический	Горная	Зап. Припятский	Сероземы	Не определена	Тяжелосуглинист.	Есть	Кислые
	30	»	4-3-2	»	Аллюв.-луговые	Аллювиальные	»	»	»
	38	Суббореальный	3-2-2	Предалтайская	Черноземы	Аккумулятивные	Тяжелосуглинист.	Есть	На грани
5(3)	39	»	»	»	Луг-черноземные	»	»	»	На грани
	40	»	»	»	Солонец гидроморфный	Щелочно-глин-дифф.	Легко-среднеглинист.	»	Прочие
	41	Суббореальный	3-2-2	Предалтайская	Луговая	Гидрометаморфические	Среднесуглинист.	Есть	Прочие
7(7)	3	Суббореальный	3-2-1	Окско-Донская	Черноземы	Аккумулятивные	Тяжелосуглинист.	Есть	Кислые
	22	»	»	Нижне-Камская	Серые лесные	Текстур-диффер.	Среднесуглинист.	Нет	»
	46	»	»	Окско-Донская	»	»	Тяжелосуглинист.	»	»
	48	»	»	»	»	»	»	»	»
	68	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегод.	Подзолистые	»	Среднесуглинист.	»	»
	70	»	2-1-3	Вятско-Камская	»	»	Тяжелосуглинист.	»	»
	78	Суббореальный	3-1-1	Не определено	Бурые лесные	Структурно-метаморфическ.	Среднесуглинист.	Есть	»

Таблица 6. Окончание

* Номер группы	Номер почвы	ПОГЕРА			Тип почвы (1977 г.)	Отдел классификации (2004 г.)	Гранулометричес- кий состав	Карбонаты	Силитивные минералы
		пояс	зона (код)	провинция					
8(1)	21	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	Текстур-диффер.	Среднесуглинист.	Нет	Кислые
9(1)	42	Бореальный	2-1-3	Среднеобская	Подзолистые	Текстур-диффер.	Легкоглинистые	Есть	Кислые
10(2)	50	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	Текстур-диффер.	Тяжелосуглинист.	Нет	Кислые
11(1)	51	»	»	»	Дерново-глеевые	Альфегумусовые	»	»	»
	11	Суббореальный	Горные	Крымская	Коричневые	Структурно-метаморфическ.	Тяжелосуглинист.	Есть	Прочие
12(1)	19	Субтропический	4-3-1	Юж-Туранская	Серо-бурая пустынная	Не определена	Супесь	Есть	Кислые
13(2)	66	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Не определена	Слаборазвитые	Супесь	Есть	Кислые
	67	»	2-1-2	Онего-Вычегод.	Подзолистые	Текстур-диффер.	Среднесуглинист.	Нет	»
14(1)	62	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегод.	Не определена	Не определена	Среднеглинистая	Нет	Кислые
15(1)	10	Суббореальный	Гор- ные / (3-1-2)	Крымская	Не определена	Структурно-метаморфическ.	Тяжелосуглинист.	Нет	Прочие
16(1)	61	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегод.	Не определена	Органо-аккумуля.	Среднеглинистая	Нет	Кислые
17(2)	69	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	Текстур-диффер.	Тяжелосуглинист.	Нет	Кислые
	71	»	»	»	»	»	»	»	»
18(1)	43	Суббореальный	3-2-1	Окско-Донская	Не определена	Не определена	Среднеглинистая	Нет	Кислые
19(1)	49	Бореальный	2-1-3	Вятско-Камская	Подзолистые	Текстур-диффер.	Тяжелосуглинист.	Нет	Кислые
20(1)	2	Суббореальный	3-2-1	Окско-Донская	Серые лесные	Текстур-диффер.	Тяжелосуглинист.	Нет	Кислые
21(1)	23	Суббореальный	3-2-1	Нижекамская	Черноземы	Аккумулят.-гумус.	Тяжелосуглинист.	Есть	Кислые
22(2)	16	Субтропический	4-3-2	Пригиссарская	Орош. сероземы	Не определена	Среднесуглинист.	Есть	Кислые
	20	»	4-3-1	Сев.-Туранская	Орош. луговые	Аллювиальные	Супеси	»	»
23(1)	18	Субтропический	4-3-1	Сев.-Туранская	Такыр	Не определена	Среднеглинистые	Есть	Кислые
24(1)	75	Суббореальный	3-1-2	Карпатская	Подзол гумус-иллюв.	Альфегумусовые	Легкосуглинистые	Нет	Кислые
25(1)	32	Суббореальный	3-2-2	Предалтайская	Подзолистые	Текстур-диффер.	Песок связный	Нет	Кислые
26(3)	63	Бореальный	2-1-2	Онего-Вычегод.	Подзол иллюв-желез.	Альфегумусовые	Песок связный	Нет	Кислые
	64	»	»	»	Не определена	Слаборазвитые	Песок рыхлый	»	»
	65	»	»	»	Подзолистые	Альфегумусовые	Песок связный	»	»
27(2)	4	Суббореальный	3-2-1	Окско-Донская	Черноземы	Аккумулят.-гумусов.	Тяжелосуглинист.	Есть	Кислые
	5	»	»	Сев-Украинская	Серые лесные	Текстур-диффер.	»	Нет	»
28(1)	7	Суббореальный	3-2-2	Южно-Украинск.	Черноземы	Аккумулят.-гумусов.	Легкоглинистые	Есть	Кислые

Группы различаются и по набору показателей с преобладающим типом дифференциации химсостава (везде аккумулятивным): в группе 1 — для SiO_2/MgO и $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, в группе 3 — для $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и SiO_2/MgO , в группе 4 — таковых нет, в группе 9 — для $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, SiO_2/MgO и $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, в группе 11 — для $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, SiO_2/MgO и $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. Это — повод для рассмотрения проблемы почвенными минералогами.

Можно предположить, что трудность выделения ведущих группирующих показателей связана с избыточностью их общего числа при коррелированности многих из них (см. выше). В таких случаях рекомендуется сократить число показателей, убрав некоторые из закоррелированных. Чтобы уточнить ситуацию, была построена дендрограмма сходства самих показателей подвыборки 56×16 . Оказалось, что многие из показателей сходны на уровне

99–100%, если их все убрать, то в таком жестком случае остается только 7 показателей: число границ слоев (один из двух вариантов), ФГ, КПП и все показатели валового химсостава (кроме $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) без степеней дифференциации. В этом варианте была повторена группировка и статистическая оценка показателей (табл. 7). Согласованный с парогрупповым критерием уровень сходства для дендрограммы составил в этом случае 86–72%.

Было получено 28 групп (в том числе 16 групп, в составе которых была одна почва, 7–2 почвы, 2–3 почвы и 3 группы с содержанием более 3-х почв). Десять групп по одной почве были общими с группировкой по всему набору показателей: это были почвы 2, 10, 11, 21, 23, 32, 43, 61, 62 и 75. Это — самые разные почвы, расположенные от Коми до Крыма и от Карпат до Алтая, включая палеопочву в районе Курска (почва 43).

Таблица 7. Статистические характеристики (параметры) групп педоматриц из табл. 6

Параметр	Гранулометрический состав			Валовой химический состав			
	n границ	ФГ среднее	КПП среднее	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ср	SiO_2/CaO ср	SiO_2/MgO ср	$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ср
Группа 1 (7)							
Медиана	1.8	50.6	38.6	14.5	55.8	53.3	66.2
Квартиль 1	1.2	49.3	36.6	14.1	44	48.4	58
Квартиль 2	1.9	55.5	40.7	15.9	69	59.8	72
Группа 2 (2)							
Медиана*	2	60.5	29.4	12.2	40.6	39.9	85.3
Группа 3 (6)							
Медиана	2.3	47.0	40.7	11.6	108	26.2	39.5
Квартиль 1	1.7	43	37.2	11.3	78	22.9	37.9
Квартиль 2	2.7	49	43.6	12.4	160	30.0	42.1
Группа 4 (2)							
Медиана*	1	53.3	30.6	12.0	61.7	19.1	41.0
Группа 5 (3)							
Медиана	2.3	56.8	18.3	12.1	17.2	50.1	43.5
Квартиль 1	2.1	52.3	18.0	12.0	15.8	43.6	41.2
Квартиль 2	2.8	58.2	18.3	12.5	18.2	61	44.9
Группа 6 (1)							
Медиана**	3	37.2	19.6	12.7	5.96	21.0	45.5
Группа 7 (7)							
Медиана	2.8	42.9	49.3	18	77.4	73.8	75.5
Квартиль 1	2.2	37.8	45.7	17	60	60	62
Квартиль 2	2.9	46.6	51.1	20	104	82	81
Группа 8 (1)							
Медиана**	4	33.9	40.3	21.1	48.5	56.5	107
Группа 9 (1)							
Медиана**	4	57.5	28.7	13.4	49.8	91.3	46.9
Группа 10 (2)							
Медиана*	4	41.1	39.9	20	44.2	125	76.1
Группа 11 (1)							
Медиана**	1	48.5	16.4	8.48	38.4	57.1	125

Таблица 7. Окончание

Параметр	Гранулометрический состав			Валовой химический состав			
	<i>n</i> границ	ФГ среднее	КРП среднее	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃ _{ср}	SiO ₂ /CaO _{ср}	SiO ₂ /MgO _{ср}	SiO ₂ /Na ₂ O _{ср}
				Группа 12 (1)			
Медиана **	4	17.8	22.9	18.5	159	21.1	40.6
				Группа 13 (2)			
Медиана *	2	21.3	12.6	30.2	48	45.3	85.8
				Группа 14 (1)			
Медиана **	3.5	79.2	16.7	10.8	22.8	28.7	95.4
				Группа 15 (1)			
Медиана **	6	55.9	18.6	8.92	22.6	55.4	120
				Группа 16 (1)			
Медиана **	6	30.5	29.1	26.3	54.9	65	74.6
				Группа 17 (2)			
Медиана *	5.75	44.4	41.4	14.5	55.7	52.1	61.5
				Группа 18 (1)			
Медиана **	3	38.1	60	29.6	129	131.5	145
				Группа 19 (1)			
Медиана **	5	44.6	40.5	47.9	49.9	118	75.1
				Группа 20 (1)			
Медиана **	1	45.9	51.7	19.4	95.4	72.8	172
				Группа 21 (1)			
Медиана **	2	56.1	34.7	13.3	7.96	35.3	219
				Группа 22 (2)			
Медиана *	2	45.3	37.2	13.1	829	16.9	40.7
				Группа 23 (1)			
Медиана **	3	59.4	26.6	11.7	402	15.5	32.3
				Группа 24 (1)			
Медиана **	3	21.0	16.4	28.8	711	71.5	109
				Группа 25 (1)			
Медиана **	1	7.52	6.6	23.8	97.7	141	105
				Группа 26 (3)			
Медиана	3.3	6.1	2.0	82.6	134	113	123
Квартиль 1	3.1	4.8	1.6	70	120	107	120
Квартиль 2	3.8	6.6	2.7	87	139	122	128
				Группа 27 (2)			
Медиана *	1	51.5	40.6	19.7	85.3	77.2	91.4
				Группа 28 (1)			
Медиана **	0	60.7	37.3	12.2	35.4	36.9	92.4

Крупные группы (1, 3, 7) довольно разнородны географически, еще сильнее — почвенно-классификационно; но все они тяжелого гранулометрического состава и все из сиаалитно-кислых минералов. Не кислые минералы в этот раз нигде не смешаны в одних группах с кислыми и образуют группы 5, 6, 11, 15. Тем не менее, ни по данным табл. 6, ни по картине МГК не удалось связать эти группы с конкретными показателями.

Почвы 69 и 71 образовали самостоятельную группу и по полному, и по сокращенному набору показателей. Таким образом, 11 групп (более 1/3 от общего числа) не изменило свой состав после исключения “избыточных” показателей. Из этого следует, что и по 7-ми оставшимся показателям эти почвы сильно отличаются от других и друг от друга.

Для выявления ведущих показателей разделения групп вновь применили МГК к медианам групп

табл. 6. По сравнению с предыдущими случаями применения этого алгоритма ситуация несколько улучшилась — уже 3 (вместо 5) ГК охватывали почти 70% информации, и наметились ведущие разделяющие показатели. Только по первым двум ГК их оказалось 5 из 7-ми, что лишь ненамного облегчает объяснение полученной картины. Да и трудно было ожидать другого результата при столь незначительном числе существенных по объему групп. Самое малое число границ (гранулометрических) (0–1) имеют группы 4, 11, 20, 25, 27 и 28 (почвы самые разные), наибольшее число границ (5–6) — группы 15, 16, 17, 19 (почвы тоже разные). Размах варьирования между группами по другим показателям тоже широк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанная работа показала, что почвенные тела (педоматрицы), позволяя использование количественных подходов, образуют географические структуры, отличные от географических структур почв. Следовательно, имеется смысл их самостоятельного изучения.

Возникли и другие вопросы, представляющие интерес. Почему в некоторых почвенных телах различается число границ (слоев), найденных по гранулометрическому составу и по валовому химическому? Насколько совпадают глубины этих двух типов границ? Связаны ли тренды по профилю с минералогическим составом почв и с известными почвенными процессами? Имеются, наверное, и другие вопросы, на которые автор не обратил внимания.

Автор предоставляет свою выборку для дальнейших исследований и ее расширения за счет других почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таргульян В.О.* Теория педогенеза и эволюции почв. М.: Изд-во ГЕОС, 2019. 296 с.
2. *Фридланд В.М.* Об оподзоливании и иллимизации (обезыливания) // Проблемы географии, генезиса и классификации почв. М.: Наука, 1986. С. 173–184.
3. *Градусов Б.П., Фрид А.С., Градусова О.Б.* Способ определения границ горизонтов почвенных профилей по аналитическим показателям на основе методов кластерного анализа // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2002. Вып. 55. С. 3–14.
4. *Градусов Б.П., Фрид А.С., Градусова О.Б.* О двух фазах специфической стадии подзолистого макропроцесса // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2006. Вып. 58. С. 13–20.
5. *Фрид А.С., Надежкина Е.В., Караякова В.И.* Влияние газопылевых выбросов предприятий промышленности на различные компоненты биогеоценоза серой лесной почвы лесостепной зоны // Агрохимия. 2007. № 2. С. 32–42.
6. *Фрид А.С.* Об оценке степени дифференциации показателя в почвенном профиле // Почвоведение. 1992. № 5. С. 112–116.
7. *Прохорова З.А., Фрид А.С.* Изучение и моделирование плодородия почв на базе длительного полевого опыта. М.: Наука, 1993. 190 с.
8. *Качинский Н.А.* Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.
9. Алгоритмы и программы для ЭВМ МИР-2. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1979. 120 с.
10. Алгоритмы и программы для ЭВМ СМ-4. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1985. 108 с.
11. *Рожков В.А.* Почвенная информатика. М.: Изд-во МГУ, 1987. 112 с.
12. Конференция по диагностике и режиму подзолистых и болотно-подзолистых почв южной тайги (27–29 мая 1974 г.). Путеводитель экскурсии по почвам Рузского стационара. М., 1974. 81 с.
13. X Международный конгресс почвоведов. Путеводитель почвенной экскурсии. Восточно-Европейская равнина, лесостепная и степная зоны. Тур 1. М.: Наука, 1974. 95 с.
14. X Международный конгресс почвоведов. Путеводитель почвенной экскурсии. Средняя Азия, Узбекистан. Тур 7. М.: Наука, 1974. 83 с.
15. X Международный конгресс почвоведов (10th International Congress of Soil Science). Soils of Povolzh'ye. Pushchino-on-Oka, 1974. 67 p.
16. VII Всесоюзный съезд почвоведов. Путеводитель научной почвенной экскурсии. Ташкент: ФАН, 1985. 107 с.
17. VIII Всесоюзный съезд почвоведов. Путеводитель экскурсий. Новосибирск, 1989. 162 с.
18. IV съезд Докучаевского общества почвоведов. Путеводитель научных полевых экскурсий. (9–13 августа 2004 г., Новосибирск). Новосибирск, 2004. 116 с.
19. VII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с зарубежным участием научной конференции “Почвоведение — продовольственной и экологической безопасности страны” (Белгород, 15–22 августа 2016 г.). Путеводитель научных полевых экскурсий. Москва—Белгород, 2016. 121 с.
20. *Романова Т.А., Пироговская Г.В., Тихонов С.А.* Некоторые особенности дерновых заболоченных почв Белоруссии // Почвы БССР и пути повышения их плодородия (Докл. к V Всесоюз. съезду почвоведов, 11–15 июля 1977 г., Минск). Минск, 1977. С. 11–20.

21. III съезд Докучаевского общества почвоведов (11–18 июля 2000 г., Суздаль). Путеводитель научных почвенных экскурсий. М., 2000. 118 с.
22. VIII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школа молодых ученых по морфологии и классификации почв “Почвы — стратегический ресурс России” (Сыктывкар–Воркута–Киров, 10–17 августа 2022 г.). Путеводитель научных почвенных экскурсий. Москва–Сыктывкар, 2022. 240 с.

Experiment of Quantitative Study of Variety of Mineral Soil Bodies (Pedomatrix)

A. S. Frid*

*All-Russia Research Institute of Phytopathology,
ul. Institut, poss. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye Vyazemye 143050, Russia*

**E-mail: asfrid@mail.ru*

The question of the study of soil bodies (pedomatrids) independently of soil systems, although raised earlier, has not yet found a concrete reflection in the soil literature. Two groups of quantitative indicators of pedomatrids (granulometric and gross chemical compositions) have been converted to reflect not only their content but also their distribution in the soil profile. A total of 16 indicators were obtained for each pedomatrix. The soil data sample covered a fairly wide area of the European, West Siberian and Central Asian parts of the former USSR. To assess the macrostructure of the data sample, the pedomatrices were grouped according to these 16 indicators. Only a few groups with more than three objects each and many smaller groups with one object each have been found. On the one hand, this seems to confirm the independence of soil varieties from each other, but, on the other hand, the resulting groups are quite heterogeneous, both geographically and in terms of soil classification (according to the soil classifications of the USSR (1977) and Russia (2004)). This confirms the idea of V.O. Targulyan about the necessity of studying the geography and classification of soil bodies, regardless of soils.

Keywords: soil bodies (pedomatrix), quantitative characteristics, geography, classification.