

Номер 9

ISSN 0002-1881

Сентябрь 2024



АГРОХИМИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 9, 2024

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Продуктивность растений биоценозов и процессы гумусонакопления в эродированных лугово-черноземных почвах
В. М. Назарюк, Ф. Р. Калимуллина 3
- Азотный режим агросерой почвы вишневого сада и урожайность деревьев при применении удобрений
Т. А. Роева, Е. В. Леоничева, Л. И. Леонтьева 15

Удобрения

- Применение различных удобрений для повышения урожайности кукурузы в Ставропольском крае
В. Н. Багринцева, И. Н. Ивашенко, В. В. Дридигер, О. Д. Серова 28

Пестициды

- Биологическая эффективность баковых смесей пестицидов и микроудобрений при защите озимой пшеницы и их влияние на урожайность и качество зерна
Л. М. Власова, О. В. Попова 36

Агроэкология

- Влияние длительного последствия известкования дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой на микроэлементный состав растений ячменя
С. Е. Витковская 43
- Влияние ризосферных бактерий, способных к биосинтезу и/или деструкции фитогормонов, на ростовые характеристики и гормональный статус растений пшеницы в условиях дефицита воды
М. Д. Тимергалин, А. В. Феоктистова, Т. В. Рамеев, М. Д. Бакаева, С. Н. Стариков, З. Р. Султангазин, С. П. Четвериков 51
- Экологически безопасные методы и технологии биоконверсии органических отходов агропромышленного комплекса для производства новых видов органических удобрений
Т. Ю. Анисимова, С. И. Тарасов 58

Экотоксикология

- Повышение устойчивости растений яровой пшеницы к токсичности меди при применении ростстимулирующих ризосферных бактерий на загрязненной металлом почве
В. П. Шабаев, В. Е. Остроумов 70

ОБЗОРЫ

- Оценка баланса углерода в почвах на основе определения эмиссии CO₂
И. Н. Шарков, А. С. Чумбаев, В. А. Андроханов 78
- Влияние удобрений на урожайность и качество продукции масличного льна
А. В. Ивойлов 90

Contents

No. 9, 2024

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Productivity of Biocenosis Plants and Humus Accumulation Processes in Eroded Meadow-Chernozem Soils

V. M. Nazariuk, F. R. Kalimullina

3

Nitrogen Regime of the Agro-Grey Soil of a Cherry Orchard and the Yield of Trees when Applying Fertilizers

T. A. Roeva, E. V. Leonicheva, L. I. Leontieva

15

Fertilizers

Use of Various Fertilizers to Increase the Yield of Maze in the Stavropol Krai

V. N. Bagrintseva, I. N. Ivashenko, V. V. Dridiger, O. D. Serova

28

Pesticides

Biological Effectiveness of Tank Mixtures of Pesticides and Micronutrients in the Protection of Winter Wheat and Their Effect on Grain Yield and Quality

L. M. Vlasova, O. V. Popova

36

Agroecology

Long-Term Effects of Liming Sod-Podzolic Soil by Dolomite on the Microelement Composition of Plants *Hordeum* L.

S. E. Vitkovskaya

43

Effect of Rhizospheric Bacteria Capable of Biosynthesis and/or Destruction of Phytohormones on the Growth Characteristics and Hormonal Status of Wheat Plants in Conditions of Water Scarcity

M. D. Timergalin, A. V. Feoktistova, T. V. Rameev, M. D. Bakaeva, S. N. Starikov, Z. R. Sultangazin, S. P. Chetverikov

51

Environmentally Friendly Methods and Technologies of Bioconversion of Organic Wastes from Agro-Industrial Complex for Production of New Types of Organic Fertilizers

T. Yu. Anisimova, S. I. Tarasov

58

Ecotoxicology

Increasing of Spring Wheat Plant Resistance to Copper Toxicity by Application of Growth-Promoting Rhizobacteria on Metal-Contaminated Soil

V. P. Shabayev, V. E. Ostroumov

70

REVIEWS

Estimation of Soil Carbon Balance Based on CO₂ Emission Determination

I. N. Sharkov, A. S. Chumbaev, V. A. Androkhonov

78

Effect of Fertilizers on Productivity and the Quality of Oilseed Flax Products

A. V. Ivoilov

90

УДК 631.417.2:631.524.84:631.445.152

ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ БИОЦЕНОЗОВ И ПРОЦЕССЫ ГУМУСОНАКОПЛЕНИЯ В ЭРОДИРОВАННЫХ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ

© 2024 г. В. М. Назарюк¹, Ф. Р. Калимуллина^{1,*}¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 8/2, Россия

*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru

В многолетних опытах содержание гумуса в природных и агроэкосистемах на лугово-черноземных почвах зависело от видового разнообразия растений, состояния растительного покрова, обработки пахотного горизонта и его эродированности. За 10-летний период наблюдений содержание гумуса в пахотной почве относительно исходной снизилось на 4.5%, под луговыми травами, напротив, возросло на 22%. В дальнейшем за 20-летнее учетное время процессы гумусонакопления в обрабатываемой почве изменялись мало. Среди природных экосистем наиболее активно процессы аккумуляции гумуса происходили в гумусово-аккумулятивном (А) и переходном горизонтах (АВ) под осиновым лесом. В эродированных почвах резко снижались запасы гумуса и питательных элементов, вызывавших уменьшение продуктивности луговых трав. Установлено, что для существенного накопления гумуса (до 8%) в незэродированной почве 100-летнего периода функционирования экосистемы необходимо сочетать поступающий углерод в виде лесной подстилки и корней с биомассой многолетних луговых трав.

Ключевые слова: экосистема, гумусообразование, почвенный профиль, протеиногенные элементы, продуктивность растений.

DOI: 10.31857/S0002188124090015, **EDN:** CDCLEX

ВВЕДЕНИЕ

Гумусовое состояние эродированных почв как одного из важных критериев пригодности территории к интенсивному земледелию во многом зависит от устойчивости пахотного фонда к водной эрозии [1, 2]. Проблема сохранения гумуса в почве в интенсивном земледелии является актуальной во всех регионах России [3–6]. Особое внимание уделяется сохранению почвенного плодородия в растениеводстве при выращивании сельскохозяйственных культур на разнообразных типах черноземов [7] и серых лесных почвах [8]. Среди функционирующих экосистем в почвенном покрове наиболее изученными оказались незэродированные лугово-черноземные почвы. Обычно в таких почвах горизонт А чаще всего находится на глубине 0–30 см, а В – 50–75 см, и в них отмечено относительно высокое содержание гумуса. Обращает на себя внимание особенность гумусовых кислот, связанных с кальцием; обнаружено широкое соотношение $C_{ГК} : C_{ФК}$ [9]. Среди этих почв практически не исследованными оказались эродированные лугово-черноземные почвы, хотя они наиболее подвержены процессам водной эрозии и требуют проведения перманентного мониторинга почвенного

плодородия. В таких почвах до сих пор непонятна роль лесной подстилки, многолетних трав и минерального питания в процессе гумусообразования. Эродированные почвы с недостаточным содержанием гумуса больше всего распространены в районах интенсивной и длительной распашки земель на склоновых и орошаемых участках [10, 11].

Учитывая сложность формирования этих почв и важность их использования в земледелии, возникает необходимость в разработке системы минерального питания, обеспечивающей высокую продуктивность растений, повышение плодородия почв и сохранение окружающей среды. Установлено, что использование удобрений в экономически обоснованных дозах позволяет существенно повысить урожайность сельскохозяйственных культур, не вызывая серьезных экологических последствий [12, 13]. Однако есть работы, которые показали, что применение минеральных удобрений в агроценозах без достаточного экологического обоснования не обеспечивает требуемую устойчивость производства растительной продукции и их окупаемость [14, 15], наносит ощутимый вред окружающей среде [16, 17], что требует выяснения

причин слабого отклика растений на усиленное минеральное питание и разработки путей улучшения экологической ситуации в агроэкосистемах. Пока явно недостаточно проведено исследований на эродированных почвах, показывающих специфику регулирования их плодородия, выяснение последствий многолетнего антропогенного воздействия, трансформации минеральных удобрений и возможности усвоения питательных элементов растениями в агроценозах.

Цель работы – изучение гумусового состояния эродированных лугово-черноземных почв в условиях длительной антропогенной нагрузки и выяснение возможности интенсификации продукционного процесса путем оптимизации минерального питания растений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Многолетнее исследование проводили в течение 20 лет на территории Присалаирья (юго-восток Западно-Сибирской равнины) после вывода земельного участка из сельскохозяйственного севооборота. Объекты исследования, связанные с изучением минерального питания мелколистных деревьев в период зарастания участка, находились в пределах не более 1 га.

Микрополевые опыты с луговыми травами проводили на делянках, обернутых полиэтиленовой пленкой на глубину пахотного слоя, общей площадью 1 м² и учетной – 0.25 м². Минеральные удобрения вносили в виде N_м, P_{ст} и K_х. Биомассу травянистых растений измеряли во время укосной спелости с помощью специальной рамки 50 × 50 см, учет проводили во всех вариантах опыта в четырехкратной повторности. Возраст деревьев 10 и 20 лет включительно определяли непосредственно в природных экосистемах

на основе визуального наблюдения при проведении агрохимических исследований. Столетний возраст березовых деревьев выясняли при помощи измерений длины окружности наблюдаемых экземпляров на высоте 1 м и расчетных, связанных между собой определенной (линейной) математической зависимостью. Все фенологические измерения в отношении березовых деревьев проводили с точностью до 1 мм. Полагаем, что в результате соответствия параметров известных лесных экосистем рассчитанным с помощью определенной математической зависимости данным можно в одних и тех же почвенно-экологических условиях с приемлемой долей точности оценить возраст березовых деревьев.

Аналитическую работу выполняли следующими методами: содержание углерода, азота почвы и растений определяли на элементном CHN-анализаторе фирмы “PerkinElmer, Inc.”, США. Зольные питательные элементы в почве определяли на основе следующих методов: легкоподвижный фосфор – по Карпинскому–Замятиной, органический фосфор – по разности между его валовым и минеральным содержанием по Хейфиц, валовой фосфор – по Гинзбург и др., легкообменный калий – в 0.005 н. CaCl₂, обменный – в 1 н. CH₃COONH₄ (по Масловой), необменный – в 2 н. HCl (по Пчелкину), нитратный азот – потенциометрическим методом с использованием ион-селективного электрода, запасы питательных элементов в почве определяли с учетом ее плотности сложения [18]. В лесных экосистемах доминантным видом были береза повислая и пушистая (*Beta verrucosa*, *B. pubescens* L.), осина (*Populus tremula* L.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ива ломкая (*Salix fragilis* L.).

Таблица 1. Изменение содержания гумуса в эродированных лугово-черноземных почвах, сформированных в природных и агроэкосистемах, в течение 10 лет

Вариант	Почва			
	неэродированная		эродированная	
	1	2	1	2
Исходное содержание	7.54	166	4.01	83.4
Пашня	5.32	111	3.87	80.5
Многолетние травы	6.81	113	4.19	87.1
березовый	5.43	142	3.25	67.6
Лес осиновый	7.09	148	4.41	91.7
сосновый	4.27	88.8	3.92	81.5
Кустарник	5.52	109	4.76	99.0
HCP ₀₅	0.18	3	0.15	2.6

Примечание. В графе 1 – содержание гумуса, %; 2 – запасы гумуса, т/га.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование, проведенное в условиях лесостепной зоны, показало, что содержание гумуса в лугово-черноземной почве зависело от растительного покрова, агротехнической обработки пахотного горизонта и эродированности почвы (табл. 1).

Значительное количество гумусовых веществ, аккумулярованное в неэродированной почве за 10-летний период, отмечали в пахотном слое при возделывании многолетних трав, которое достигало 6.8%. Самое высокое содержание гумуса выявлено в почве под осиновым лесом. Вероятно, это связано с тем, что листовой аппарат осинового леса в условиях лесостепной зоны Западной Сибири разворачивался позднее на 5–10 сут, почва в это время была более холодной, что сказывалось на процессах минерализации органических веществ и в конечном итоге отражалось на гумусообразовании. Самое низкое содержание гумуса в почве отмечали в экосистеме соснового леса. Сформированная органическая масса, возникшая в виде подстилки из опавшей хвои, была обеднена азотом, но обогащена углеродом, что сказывалось на значительных и асимметрично завышенных потерях углерода в процессе гумусонакопления.

Невысокое содержание гумуса отмечали также в экосистемах кустарника и березового леса. Образующаяся подстилка от опада этих деревьев минерализовалась довольно быстро и в конце вегетационного периода распадалась практически полностью. В целом снижение содержания гумуса за 10-летний период отчетливо наблюдали как в неэродированной, так и в эродированной пахотных почвах, а также в биоценозах под березовым и особенно сосновым

лесом. Отсюда видно, что для этих почв, при относительно ускоренном их зарастании лесной растительностью, добиться значительного повышения плодородия, обусловленного увеличением содержания гумуса, наиболее сложно. Исследованный период зарастания неиспользованной территории березовым лесом не дает желаемого эффекта, необходим иной источник поступления питательных веществ в почву. Разнообразие экосистем при зарастании эродированных почв травянистыми и лесными растениями отражается на запасах валового гумуса. Они были минимальными среди неэродированных почв под сосновым и березовым лесом и максимальными под осиновым и кустарником ивы ломкой.

При изучении распределения гумуса в почвенном профиле выявлено самое высокое его содержание, которое наблюдали в гумусово-аккумулятивном горизонте (рис. 1).

Затем с глубиной в почвенном профиле, начиная от горизонта А, регистрировали постепенное снижение содержания гумусовых веществ, отмечавшееся вплоть до переходного горизонта АВ. Резкое снижение содержания гумуса в почве выявлено в иллювиальном горизонте В₁, хотя его в небольшом количестве наблюдали даже на глубине 90–100 см (гор. В₂). В эродированной почве распределение гумуса очень сильно зависело от процессов водной эрозии, величина его содержания по сравнению с неэродированной почвой была значительно меньше по всему почвенному профилю. К тому же в пахотном горизонте А + АВ и переходном АВ (слой 0–40 см) различия были менее значительными. Заметим, что на автоморфных почвах резкое снижение содержания гумуса в условиях Приобья отмечали обычно на глубине

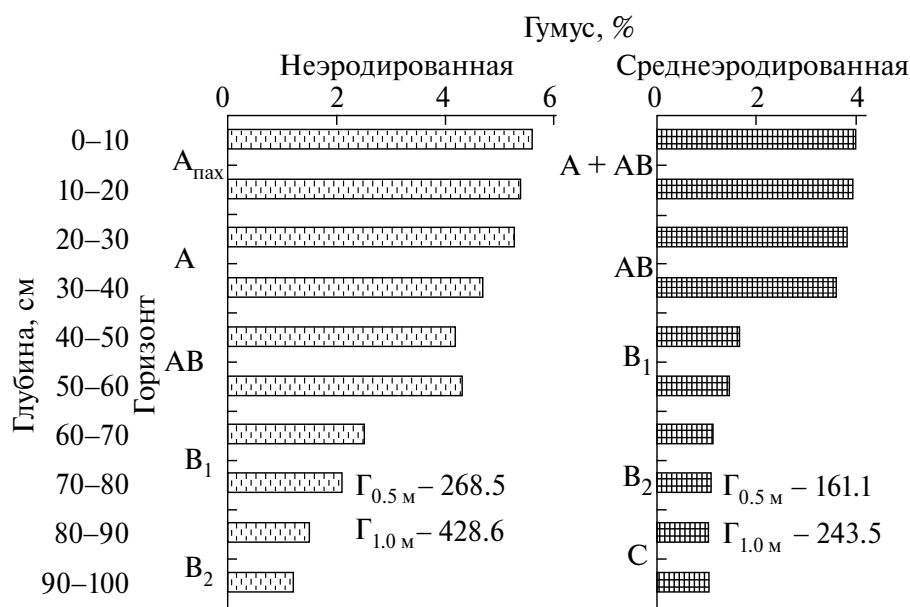


Рис. 1. Влияние водной эрозии на содержание, распределение и запасы гумуса в лугово-черноземных почвах. Г_{0.5 м} и Г_{1.0 м} – запасы гумуса в слоях 0.5 и 1.0 м, т/га.

30–40 см, реже – в пределах пахотного слоя [19]. Различия в распределении гумусовых веществ обусловлены прежде всего температурным и водным режимами, спецификой развития корневой системы по профилю почвы [20]. В изученной нами полугидроморфной эродированной почве закономерность распределения гумуса в почвенном профиле имела свои отличия. Они были обусловлены прежде всего неодинаковой плотностью сложения, созданием порового пространства и более низким содержанием органического вещества по всем почвенным горизонтам.

Различное распределение гумусовых веществ по профилю почв сказалось и на валовых запасах гумуса в полуметровом и метровом слоях почв, которые достигли >200 и 400 т/га. Снижение этих запасов в неэродированной лугово-черноземной почве происходило довольно равномерно, тогда как в эродированной значительно меньше запасалось гумуса, особенно в иллювиальном горизонте В₁. В частности, запасы гумуса в эродированной почве уступали неэродированной в полуметровом слое в 1.7 раза и в метровом – примерно на такую же величину.

В результате 20-летнего зарастания пашни луговыми травами в неэродированной почве заметно повысилось содержание гумуса в слое 0–20 см до 5.48% (табл. 2).

В более глубоких слоях обнаружено уже практически одинаковое содержание гумусовых веществ, которое свидетельствовало о мало различающемся влиянии органоминеральной основы пахотного и подпахотного слоев. Процессы водной эрозии вызвали в среднеэродированной почве снижение содержания гумуса во всех изученных горизонтах, хотя более четкая дифференциация в отношении органического вещества произошла в слое 20–40 см. Самое значительное накопление гумуса в неэродированной почве выявилось в результате 100-летнего зарастания почвенного покрова березовым лесом при

совместном воздействии с луговыми травами. Содержание гумуса на этом участке составило в среднем 7.8%, в отдельных случаях оно достигало более 8%. Достаточно высокая обогащенность почвы органическим веществом отмечена в среднеэродированной почве при самом длительном (100-летнем) функционировании экосистемы березового леса. Таким образом, в целях существенного накопления гумуса в лугово-черноземных почвах при их зарастании необходимо создать условия, при которых поступление углерода с подстилкой березового леса сочеталось бы с биомассой луговой травянистой растительности.

Исследование специфики полугидроморфных почв выявило не только относительно высокое содержание гумуса, но и соответствующую обогащенность пахотного слоя протеиногенными элементами [21]. В проведенных экспериментах с лугово-черноземными почвами показано, что при распределении макроэлементов по изученным почвенным горизонтам в отсутствие водной эрозии отмечалась также заметная аккумуляция валовых количеств азота, фосфора и калия. При этом процессы водной эрозии заметно снижали интенсивность обогащения почвы макроэлементами, что отражалось на обеспеченности растений питательными элементами за счет почвенных запасов. На плодородие почвы значительное влияние оказывала ее зольность. Она снижалась в более глубоких почвенных горизонтах, что, вероятно, было связано со снижением содержания гумуса в почве. По мере уменьшения содержания летучих элементов (углерода, азота, кислорода, водорода), входящих в состав органического вещества, уменьшалась и зольность почвы. Однако при повышении температуры в случае прокаливании почвенных образцов до 900°C наблюдали некоторое увеличение величины этого показателя. Такое явление, очевидно, было связано с различным присутствием устойчивых к высокой температуре фенольных соединений, входящих в состав гумуса.

Таблица 2. Влияние водной эрозии на элементный состав почвы, % на сухую массу

Глубина, см	Содержание гумуса в почве		N	P	K	Зольность при t, °C	
	под луговыми травами через 20 лет	березового леса спустя 100 лет				450	900
Неэродированная							
0–20	5.48	7.76	0.22	0.16	2.19	10.8	12.4
20–40	5.43	6.55	0.21	0.10	1.87	9.5	10.5
HCP ₀₅	0.31	0.46	0.02	0.01	—//—	0.2	0.3
Среднеэродированная							
0–20	2.45	6.59	0.15	0.11	Нет данных	7.6	8.3
20–40	2.25	6.40	0.05	0.10	—//—	5.2	6.4
HCP ₀₅	0.12	0.09	0.03	0.02	—//—	0.3	0.4

В процессах гумусообразования и выявлении на этом фоне связи минерального питания растений с органическим веществом в почвенном профиле важно знать величину запасов углерода и их соотношение с запасами макроэлементов. Показано, что накопление макроэлементов в неэродированной почве было максимальным в верхних слоях, затем оно постепенно снижалось и было минимальным на глубине 90–100 см (табл. 3).

Уменьшение содержания гумуса между верхним и нижним слоями достигало до 2.5 раза. Примерно такое же различие отмечали в эродированной почве, хотя абсолютные их величины были существенно меньше. Очень важное значение в азотном питании растений имеет соотношение между углеродом и азотом [22], что связано с процессами минерализации↔иммобилизации азота в почве. Выявлено, что минимальное соотношение между С : N было в верхних почвенных слоях, затем оно постепенно повышалось и достигало максимума на полуметровой глубине. После этого величина отношения между изученными макроэлементами вновь снижалась,

что наблюдали как в неэродированной, так и в эродированной почвах.

При оценке минерального питания используют также отношение между другими макроэлементами [23]. В проведенном нами исследовании отношение между углеродом и фосфором в неэродированной почве постепенно повышалось и было максимальным примерно на глубине 50 см. Минимума этот показатель достигал в результате постепенного снижения величины С : Р вплоть до 1-метровой глубины. Менее четкую закономерность в соотношении между углеродом и калием, а также между азотом и фосфором отмечали в неэродированной почве. В эродированной почве закономерность в отношениях между изученными макроэлементами во многом соответствовала ранее обсуждаемому их поведению в экосистеме. Значительные изменения в отношениях между макроэлементами обычно усиливались в иллювиальных горизонтах и постепенно менялись на максимальной почвенной глубине.

Основной источник поступления углерода в почву связан с образованием подстилки, формирование

Таблица 3. Запасы углерода (т/га) и их соотношение с содержанием макроэлементов в пахотных лугово-черноземных почвах

Глубина, см	Запасы углерода, т/га	С : N	С : Р	С : К	N : Р
Неэродированная почва					
0–10	37	13	18	1.7	1.4
10–20	35	13	21	1.6	1.6
20–30	38	15	24	1.9	1.6
30–40	34	23	30	1.6	1.3
40–50	34	27	27	1.3	1.1
50–60	35	50	28	1.4	0.5
60–70	25	48	16	0.8	0.3
70–80	19	32	14	0.7	0.4
80–90	15	43	10	–	0.3
90–100	15	23	9	–	0.2
Эродированная почва					
0–10	24	13	21	Не определяли	1.3
10–20	24	14	25	–//–	1.2
20–30	25	14	24	–//–	0.9
30–40	24	36	23	–//–	0.5
40–50	11	52	9	–//–	0.4
50–60	10	31	9	–//–	0.3
60–70	10	30	7	–//–	0.3
70–80	9	23	9	–//–	0.4
80–90	8	22	8	–//–	0.3
90–100	9	20	8	–//–	0.3
<i>HCP</i> ₀₅	1				

которой во многом обусловлено процессами водной эрозии. Как показало проведенное исследование, максимальная величина надземной биомассы отмечена на незэродированной почве (табл. 4).

На слабо- и среднеэродированных почвах наблюдали постепенное снижение запасов подстилки, которые зависели прежде всего от интенсивности процессов водной эрозии. Что касается сильноэродированных почв, то среди лугово-черноземных почв Новосибирского Приобья нами их не было зарегистрировано вообще.

В природных условиях довольно часто встречаются как смытые, так и намытые почвы, которые различаются значительно видовым составом произрастающих растений, формированием подстилочного материала и режимом увлажнения почвенного профиля. В проведенных опытах биомасса подстилки была максимальной на средненамытой почве, несколько меньше ее было на слабонамытой, которая затем уменьшалась еще значительно на сильно намытом почвенном образовании. Независимо от степени миграции почвенных гранул, отложения твердых частиц, образования недостаточно регулируемых потоков жидкой массы в пониженных формах рельефа, изменялся почвенный профиль, трансформировался пищевой режим, и на таком фоне развивался соответствующий микробоценоз. Полагаем, что в слабонамытую почву поступало недостаточно питательных элементов, а на сильнонамытой растения страдали большей частью от дефицита кислорода, нежели минерального питания. Аналогичная закономерность просматривалась и в отношении запасов углерода и азота, образованных из подстилки и частично экзогенного питания. Обратила на себя внимание более стабильная величина отношения углерода к азоту в надземной биомассе, которая отмечена как на смытых, так и намытых почвах. Полагаем, что это обусловлено генотипической реакцией растений сохранять элементный химический состав в процессе их вегетации и, прежде всего,

обеспечивать стабильность метаболизма клеток при функционирования протеинового комплекса.

Процессы гумусообразования и накопления в органическом веществе питательных элементов во многом зависят от видового состава растений, количества и качества подстилочного материала и времени его разложения (табл. 5).

Минимальное содержание нитратного азота отмечали в варианте с многолетними луговыми травами, его значительное увеличение обнаруживали в почве под лесной растительностью, особенно под подстилкой осинового леса. Это, вероятно, связано с активизацией процессов минерализации органического вещества подстилки при повышенной влажности гумусово-аккумулятивного горизонта во время задержки развития осинового леса. В дальнейшем содержание нитратного азота в подстилке многолетних растений отличалось в меньшей степени, что было связано с особенностями гидрологии лугово-черноземных почв [24]. Содержание подвижного фосфора в контрольном варианте заметно изменялось в динамике при отборе проб подстилочного материала. Подобные изменения отмечали и для других видов растительной подстилки, которые заметно варьировали также во временном интервале. Наибольшие изменения регистрировали при изучении содержания обменного калия в почве под лесной растительностью. Это связано с тем, что калий в подстилке растений мог довольно легко вымываться и затем накапливаться в почве гумусово-аккумулятивного горизонта [25].

Видовой состав растений, сформированный на незэродированной почве, оказал значительное влияние на содержание протеиногенных элементов в подстилках с различной спецификой их образования (табл. 6).

В ней меньше всего обнаружено углерода под осиновым лесом и особенно кустарником, что должно было сказаться на химическом составе гумусовых кислот. Темп накопления азота в подстилке по сравнению с углеродом изменялся в меньшей степени,

Таблица 4. Изменение физико-химического состояния подстилки, сформированной из многолетних трав на лугово-черноземных почвах

Вариант	Биомасса подстилки	Содержание		C : N
		C	N	
	г/м ²			
Неэродированная	70.7	36.8	12.0	3.1
Слабоэродированная	35.8	18.6	6.1	3.0
Среднеэродированная	19.0	9.9	23.2	3.1
Слабонамытая	46.7	24.3	7.9	3.1
Средненамытая	64.0	33.3	10.9	3.1
Сильнонамытая	30.3	15.6	5.2	3.0
<i>HCP</i> ₀₅	2.4	1.2	0.6	

Таблица 5. Влияние подстилки растений на динамику содержания питательных элементов в неэродированной лугово-черноземной почве, мг/100 г

Вариант	Время отбора почвенных проб			
	2013 г.			
	12.06	16.07	20.08	28.09
$N-NO_3$				
Пашня (контроль)	6.4	4.5	4.5	7.1
Многолетние луговые травы	3.6	4.3	4.2	3.1
березовый	6.1	3.7	5.4	3.7
Лес осиновый	18.9	3.1	3.7	5.7
сосновый	7.2	4.0	5.6	5.9
Кустарник	7.6	5.5	5.6	5.2
<i>НСР</i> ₀₅	1.4	0.6	0.8	0.9
P_2O_5				
Пашня (контроль)	16.9	17.7	18.1	13.3
Многолетние луговые травы	13.3	16.0	15.2	12.5
березовый	13.7	16.9	17.1	15.5
Лес осиновый	11.7	12.7	15.6	15.2
сосновый	19.0	20.6	16.9	18.0
Кустарник	15.4	16.5	14.5	15.2
<i>НСР</i> ₀₅	1.3	1.2	2.3	1.79
K_2O				
Пашня (контроль)	22.4	24.5	24.7	20.0
Многолетние луговые травы	12.1	14.7	19.2	12.8
березовый	24.3	31.3	24.9	25.0
Лес осиновый	45.1	23.7	22.4	22.5
сосновый	22.2	29.6	22.8	28.1
Кустарник	18.7	16.5	17.0	14.0
<i>НСР</i> ₀₅	3.3	2.2	3.2	3.6

что, вероятно, было обусловлено выравниванием процессов минерализации органической массы при разложении подстилочного материала. Реализация процессов разложения углеродсодержащей биомассы происходила несколько иначе, чем азота, что сказывалось на обусловленном взаимодействии этих макроэлементов. Не меньшую интенсивность отмечали также в накоплении фосфора в биомассе подстилки, связанном с термодинамическим эффектом экосистем при минерализации подстилки травянистых и древесных растений. Минимальное количество фосфора отмечали в подстилке кустарника и многолетних трав, что создавало условия для бесперебойного снабжения растений фосфатным питанием за счет почвенных ресурсов в первую половину вегетационного периода. Значительно слабее происходили процессы аккумуляции протеиногенных элементов в слабоэродированной почве по сравнению с неэродированной. Содержание макроэлементов в подстилке, сформированной на лугово-черноземной почве, снизилось примерно в 2 раза. Среди видового

состава растений выделяется кустарник, у которого наблюдали существенное (примерно в 1.5–2.0 раза) снижение содержания углерода, фосфора и калия.

При всесторонней оценке обеспеченности растений питательными элементами не менее важно дать оценку их содержания в пахотном горизонте в течение вегетационного периода [26]. Экспериментальные данные показали, что наличие доступных элементов питания в почвах под луговыми травами изменялось с разной интенсивностью в 1-й и во 2-й год проведения исследования (табл. 7).

Содержание нитратного азота в большинстве случаев снижалось от фазы трубкования растений до укосной спелости, что было связано с активным потреблением нитратов в период максимальных приростов биомассы. Отметим, что на неэродированной почве отмечено более высокое содержание нитратного азота, и оно было существенно меньше в постоянно меняющемся почвенном профиле при процессах водной эрозии. Имеются отдельные

Таблица 6. Содержание протеиногенных элементов в подстилках различного происхождения на эродированной лугово-черноземной почве, г/м²

Вариант	С	N	P	K
Неэродированная почва				
Луговые травы	18.8	0.51	0.14	0.32
Березовый лес	19.8	0.44	0.33	0.28
Осиновый лес	16.9	0.57	0.44	0.36
Сосновый лес	19.6	0.68	0.22	0.22
Кустарник	14.1	0.54	0.12	0.24
<i>HCP</i> ₀₅	0.04	0.07	0.02	0.02
Слабоэродированная почва				
Многолетние травы	9.9	0.23	0.17	0.18
Березовый лес	10.4	0.18	0.19	0.17
Осиновый лес	8.5	0.31	0.22	0.20
Сосновый лес	8.8	0.29	0.18	0.16
Кустарник	6.7	0.27	0.08	0.14
<i>HCP</i> ₀₅	0.03	0.09	0.01	0.08

Таблица 7. Влияние минеральных удобрений и гидротермических условий на содержание питательных элементов в эродированных почвах под луговыми травами

Вариант	Ресурс гидротер- мический	Физическое состояние почвы						<i>HCP</i> ₀₅
		неэродированная			эродированная			
		фаза развития растений						
		трубко- вание	цветение	укосная спелость	трубко- вание	цвете- ние	укосная спелость	
N-NO ₃								
Контроль	a-1	4.9	3.6	3.2	4.2	4.4	3.7	0.2
	б-1	5.3	4.3	5.2	3.1	3.0	2.5	0.2
N60P60K60	a-2	7.6	6.3	2.3	5.3	5.1	2.3	0.2
	б-2	7.4	4.5	3.3	3.9	4.0	3.8	0.2
P ₂ O ₅								
Контроль	a-1	13.3	18.9	20.6	12.5	19.4	12.9	0.7
	б-1	16.4	17.3	18.8	11.4	25.0.	11.3	0.6
N60P60K60	a-2	14.4	16.2	20.6	16.3	26.3	14.4	0.7
	б-2	12.5	18.7	18.9	15.9	22.5	16.3	0.7
K ₂ O								
Контроль	a-1	15.3	17.9	16.5	17.8	20.5	18.9	0.9
	б-1	14.7	18.9	16.9	18.7	12.1	17.3	0.7
N60P60K60	a-2	20.6	17.3	17.2	20.6	25.0	16.2	0.9
	б-2	16.7	17.8	16.7	18.8	19.4	17.8	0.7

Примечание. Сумма активных температур: a-1 – 1587°С (в 1-й год опыта) и a-2 – 1610°С (во 2-й год), количество осадков: б-1 – 136 мм (в 1-й год) и б-2 – 158 мм (во 2-й год).

варианты неэродированной и эродированной почв, в которых термические условия неоднозначно влияли на содержание нитратного азота: было как увеличение, так и снижение содержания этих соединений. Применение минеральных удобрений заметно повышало содержание нитратного азота в почве

в основном в начальные фазы развития растений, к концу вегетационного периода разница между удобренными и неудобренными вариантами практически отсутствовала. Следовательно, луговые травы были в состоянии усвоить весь имеющийся запас нитратного азота в почве, созданного как за счет

процессов минерализации органического вещества, так и внесенных азотных удобрений.

Изменения в содержании подвижного фосфора в почве происходили на разных этапах роста и развития растений с неодинаковой интенсивностью, причем их динамика иногда была разнонаправленной. Например, в неэродированной почве в период от фазы трубкования растений до фазы их цветения содержание подвижного фосфора в контрольном варианте вначале было невысоким, затем к середине сезона оно начало возрастать, к концу вегетационного периода сохранялась тенденция к повышению содержания подвижного фосфора, либо она оставалась без изменений. В эродированной почве в начальный период вегетации от фазы трубкования к фазе цветения регистрировали повышение содержания этого элемента, но затем к укосной спелости оно существенно снизилось. Внесение минеральных удобрений нередко приводило к вполне четкому увеличению содержания подвижного фосфора в эродированной почве при различной теплообеспеченности (например, варианты а-1 и а-2) от фазы трубкования до цветения, но затем отмечали существенное снижение содержания этих соединений. В фазе трубкования растений относительно фазы цветения содержание подвижных фосфатов значительно снизилось, хотя и в такой ситуации почва в удобренных вариантах заметно отличалась повышенной способностью удовлетворять потребность растений в этом элементе.

Динамика содержания обменного калия в почве во многом напоминала обнаруженную ранее закономерность относительно доступного фосфора. В неэродированной почве в контрольном варианте отмечали повышение содержания обменного калия от фазы трубкования растений до фазы цветения, в дальнейшем во время укосной спелости различия содержания подвижного калия были практически незаметными. В эродированной почве в контроле за аналогичный промежуток времени произошло как некоторое снижение содержания обменного калия, так и повышение. Применение минеральных удобрений нередко сопровождалось как возрастанием содержания калия в обменной форме, так и отсутствием подобной реакции независимо от интенсивности антропогенного воздействия на почву.

Отзывчивость луговых трав на внесение минеральных удобрений наиболее изучена на эродированном черноземе выщелоченном [27] и крайне недостаточно — на эродированной лугово-черноземной почве. Проведенные нами исследования на таких почвах показали высокую эффективность применения азотных удобрений под луговые травы (рис. 2).

В среднем за 2012, 2014, 2015 гг. прибавка урожая луговых трав на неэродированной почве сос-

тавила в среднем 46% при урожайности на фоне Р60К60 378 г/м². По годам продуктивность растений в варианте с фосфорно-калийным питанием менялась в больших пределах — 312–501 г/м². На эродированной лугово-черноземной почве прибавка урожая луговых трав от внесения азотных удобрений составила в среднем 90% при урожае на фосфорно-калийном фоне 153 г/м². По годам урожайность луговых трав на эродированной почве изменялась в пределах 94–232 г сухой биомассы/м².

Эффективность внесения фосфорных удобрений под луговые травы на неэродированной лугово-черноземной почве существенно уступала азотным; в среднем за 2009–2011 гг. прибавка составила 30% при урожае на фоне N60K60 338 г/м². Больших отличий в продуктивности растений по годам не отмечали, она менялась в варианте с азотно-калийным удобрением в пределах 310–385 г/м². На эродированной лугово-черноземной почве по сравнению с неэродированной растения лучше отзывались на внесение фосфорных удобрений: в среднем за 3 года урожай луговых трав в азотно-калийном варианте достигал 320 г/м². Прибавка от внесения фосфора оказалась небольшой, всего 17%.

Отзывчивость луговых трав на применение калийных удобрений отличалась от азотных и фосфорных. В среднем за 2006–2007 гг. прибавка урожая луговых трав на неэродированной лугово-черноземной почве составила 15% при урожае в азотно-фосфорном варианте 782 г/м². Различия продуктивности в эти годы оказались значительными: 611 и 952 г/м². Погодные условия для формирования биомассы растений были благоприятными. Однако на эродированной почве прибавка от внесения калийных удобрений оказалась незначительной. Это было связано с тем, что запасы калия в различных доступных для растений формах оказались достаточными для формирования урожая на уровне 240–250 г/м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, плодородие лугово-черноземной почвы во многом зависело от ее эродированности, содержания гумуса и содержания форм азота, фосфора и калия в корнеобитаемом слое. Процессы накопления и трансформации гумуса в почве за 10-летний срок наблюдения были обусловлены в основном ее эродированностью, темпами поступления углерода и азота в гумусовый горизонт, активностью микробного и плотностью корнеобитаемого слоя почвы. Выявлено, что при 20-летнем зарастании пашни луговыми травами даже в неэродированной почве содержание гумуса изменялось мало. Однако в случае 100-летнего формирования гумусово-аккумулятивного горизонта лесной экосистемы, не подверженного антропогенным воздействиям, совместное действие

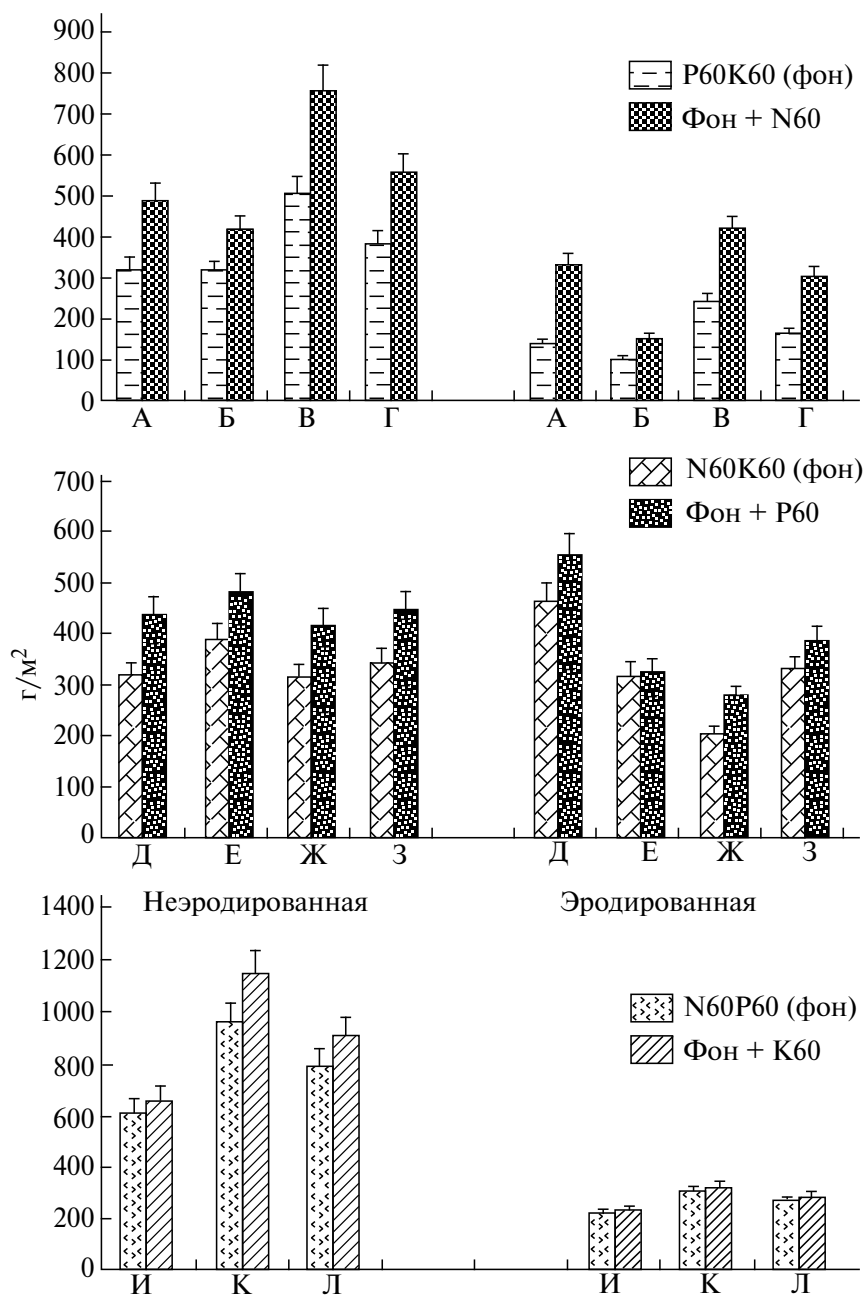


Рис. 2. Влияние минеральных удобрений на урожайность луговых трав на лугово-черноземных почвах.

А – 2012 г., Б – 2014 г., В – 2015 г., Д – 2009 г., Е – 2010 г., Ж – 2011 г., И – 2006 г., К – 2007 г., Г, З – в среднем за 3 года, Л – за 2 года.

подстилки березового леса, корней и биомассы травянистой растительности обеспечило повышение содержания гумуса в почве до 8% и более.

Продуктивность растений во многом зависела от гидротермических условий, эродированности почвы и содержания в ней доступных питательных веществ. Растения нередко страдали от дефицита тепла и влаги, что сдерживало возможность реализации физиолого-агрохимического потенциала экосистемы. Эродированность почвы как правило снижала продуктивность растений, и это приводило

к существенному уменьшению эффективности минеральных удобрений. На эродированных лугово-черноземных почвах растения больше всего нуждались во внесении азота, затем фосфора и меньше всего – калия. В целом можно утверждать, что мониторинг при проведении работ, связанных с регулированием почвенного минерального питания, создает основу экологически и экономически обоснованного сохранения запасов гумуса в почве, применения удобрений и повышения продуктивности растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капитанов А.Н., Явтушенко Е.В.* Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 239 с.
2. *Toy T.J., Foster G.R., Renard K.G.* Soil erosion processes: Prediction, measurement, and control. N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2002. 338 p.
3. *Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н.* Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья. М.: РАСХН, ВНИИПТИОУ, 2004. 630 с.
4. *Кленов Б.М., Корсунова Т.М.* Гумус некоторых типов почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 157 с.
5. *Козут А.С., Фрид А.С., Мусютенко Н.П., Куваева Ю.В.* Динамика содержания органического углерода в типичном черноземе в условиях длительного полевого опыта // Агрохимия. 2011. № 12. С. 37–44.
6. *Сухановский Ю.П., Санжарова С.И., Прущик А.Н.* Модель динамики содержания гумуса в эродированном черноземе Центрального Черноземья // Агрохимия. 2011. № 12. С. 45–52.
7. *Гасвая Э.А., Безуглова О.С., Нежинская Е.Н.* Агрофизические свойства чернозема обыкновенного слабоэродированного в длительном опыте в Ростовской области // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1399–1414.
8. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
9. *Каретин Л.Н.* Черноземные и луговые почвы Тобол-Ишимского междуречья. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. 294 с.
10. *Орлов А.Д.* Водная эрозия Новосибирского Приобья. Новосибирск, 1971. 176 с.
11. *Панфилов В.П., Слесарев И.В., Сеньков А.А.* Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1998. 256 с.
12. *Гамзиков Г.П., Ильин В.Б., Назарюк В.М.* Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 252 с.
13. *Никитишен В.И.* Эколого-агрохимические основы сбалансированного применения удобрений в адаптивном земледелии. М.: Наука, 2003. 183 с.
14. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 256 с.
15. *Кирюшин В.И.* Экологизация земледелия и технологическая политика. М.: МСХА, 2000. 473 с.
16. *Beck T.* Untersuchungen über die toxische Wirkung der Siedlungsabfällen heutigen Schwermetalle auf die Bodenmicroflora // Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. 1981. Bd. 144. № 6. S. 613–627.
17. *Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В.* Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 208 с.
18. *Красницкий В.М.* Содержание тяжелых металлов и прогноз их накопления в почвах // Анализ почв, растений и применение удобрений в Западной Сибири. Омск: ОмГАУ, 2002. С. 296–309.
19. *Панфилов В.П., Ландина М.М., Каретин Л.Н.* Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 544 с.
20. *Ковалев Р.В., Ильин В.Б., Трофимов С.С.* Почвы Новосибирской области. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1966. 422 с.
21. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Роль природных экосистем в восстановлении плодородия выпашанных почв // Пробл. агрохим. и экол. 2017. № 1. С. 43–50.
22. *Церлинг В.В.* Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справ.-к. М.: Агропромиздат, 1990. 235 с.
23. *Кудеяров В.Н.* Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 216 с.
24. *Панфилов В.П.* Агрофизические свойства основных типов почв Новосибирской области // Генезис почв Западной Сибири. Новосибирск, 1964. С. 151–217.
25. *Никитишен В.И.* Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы. М.: Наука, 2002. 258 с.
26. *Якутина О.П., Назарюк В.М.* Оценка плодородия эродированных почв юга Западной Сибири // Агрохимия. 2007. № 9. С. 10–20.
27. *Смирнова Н.В.* Азот в агроценозах на эродированном черноземе лесостепной зоны Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2005. 18 с.

Productivity of Biocenosis Plants and Humus Accumulation Processes in Eroded Meadow-Chernozem Soils

V. M. Nazariuk^a, F. R. Kalimullina^{a, #}

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS,
prosp. Acad. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

[#]*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru*

In long-term experiments, the content of humus in natural and agroecosystems on meadow-chernozem soils depended on the species diversity of plants, the state of the vegetation cover, the cultivation of the arable horizon and its erosion. During the 10-year observation period, the humus content in arable soil decreased by 4.5% relative to the initial state, while under meadow grasses, on the contrary, it increased by 22%. Then, during the 20-year accounting period, the processes of humus accumulation in the cultivated soil changed little. Among natural ecosystems, humus accumulation processes were most active in the humus-accumulative (A) and transitional horizons (AB) under the aspen forest. The reserves of humus and nutrients in eroded soils decreased dramatically, causing a decrease in the productivity of meadow grasses. It has been established that for a significant accumulation of humus (up to 8%) in the non-eroded soil of the 100-year period of ecosystem functioning, it is necessary to combine incoming carbon in the form of forest litter and roots with the biomass of perennial meadow grasses.

Keywords: ecosystem, humus formation, soil profile, proteinogenic elements, plant productivity.

АЗОТНЫЙ РЕЖИМ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ВИШНЕВОГО САДА И УРОЖАЙНОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. Т. А. Роева^{1,*}, Е. В. Леоничева¹, Л. И. Леонтьева¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур

302530 Орел, Орловская обл., д. Жилина, Россия

*E-mail: roeva@orel.vniispk.ru

Исследовали динамику минеральных форм азота ($N-NH_4$ и $N-NO_3$) в корнеобитаемом слое почвы вишневого сада в период 2018–2022 гг. с целью оценки доз азота, необходимых для культуры в первое 10-летие после посадки деревьев. Полевой опыт проводили в саду, расположенном в лесостепной зоне Среднерусской возвышенности (Орловская обл.). Мочевину и сульфат калия вносили в почву ежегодно рано весной в дозах, возрастающих от $N30K40$ до $N120K160$. Динамика $N-NH_4$ в почве удобренных и неудобренных участков была аналогичной: самый низкий уровень показателя наблюдали в июле в период созревания плодов. Содержание $N-NO_3$ в неудобренной почве незначительно изменялось в течение периода вегетации. Внесение удобрений приводило к более интенсивным изменениям уровня $N-NO_3$, зависящим от погодных условий. Ежегодное внесение удобрений приводило к ежегодному возрастанию содержания $N-NH_4$ в 2–12 раз, а содержания $N-NO_3$ в 18–70 раз в зависимости от внесенной дозы азота. При этом накопление минерального азота в корнеобитаемом слое почвы с годами не выявлено. Применение удобрений не оказывало достоверного влияния на урожайность вишни в годы, когда она была не более 15 т/га. В высокоурожайный период вегетации для получения плодов 20 т/га потребовалось применение удобрений в дозе $N60K80$.

Ключевые слова: вишня (*Prunus cerasus* L.), азотный режим почвы, азотные и калийные удобрения, аммонийный и нитратный азот, урожайность плодов.

DOI: 10.31857/S0002188124090024, **EDN:** CDAWRD

ВВЕДЕНИЕ

Вишня – широко распространенная косточковая культура в России. В настоящее время РФ является лидером среди европейских стран по объему производства вишни и по площадям, занятых этой культурой, которые в 2022 г. составили 297 200 т и 46 442 га соответственно [1].

Интенсивные технологии производства вишни включают использование клоновых подвоев, уплотнение насаждений, уменьшение размера деревьев, сокращение срока вступления в плодоношение и т.п. [2, 3]. Особое значение при таких технологиях имеет оптимальное обеспечение растений азотом. Это связано с поверхностным залеганием корневой системы деревьев на клоновых подвоях, занимающей небольшой объем почвы.

Современные подходы к применению азотных удобрений в многолетних насаждениях базируются на оценке азотного режима почвы [4–8]. Обеспеченность плодовых деревьев азотом в течение вегетации является одним из важных факторов, определяющих эффективность удобрений, урожайность и качество

плодов [6, 7]. В то же время содержание минеральных соединений азота в почве значительно варьирует в течение весенне-осеннего сезона из-за трансформации азота в результате микробиологических преобразований [5]. При этом применение высоких доз азотных удобрений под плодовые культуры снижает их агрономическую эффективность, нарушает естественный азотный цикл почвы, обуславливает изменение соотношения между активными пулами азота и увеличение количества нитратов, дополнительную минерализацию органического вещества почвы, что может приводить к потерям азота и загрязнению окружающей среды [4, 9]. Поэтому для оптимизации системы удобрения и снижения их негативного влияния на окружающую среду необходимо иметь данные об азотном режиме почвы в течение всего периода вегетации изучаемой культуры.

Влияние азотных удобрений на содержание различных форм азота в почве и их связь с азотным питанием плодовых деревьев остаются недостаточно изученными. Имеющиеся в настоящее время сведения по применению азотных удобрений в садах противоречивы. В работах ряда авторов сообщается

об их низкой эффективности, особенно в первые годы плодоношения [7, 8, 10, 11], другие отмечают положительный эффект исключительно умеренных доз [4–6].

Анализ научных публикаций, отражающих проблемы азотного питания вишни, показывает значительный недостаток многолетних исследований, учитывающий состояние азота в системе почва–растение. Для корректной оценки эффективности удобрений и совершенствования диагностики азотного питания вишни требуется информация о взаимосвязи между содержанием азота в почве и растениях в течение периода вегетации, которой мало. Сведения о применении азотных удобрений в вишневых садах имеются преимущественно в зарубежных источниках [6, 12]. Рекомендации по применению азотных удобрений под вишню, адаптированные к условиям различных агроклиматических зон РФ, разработаны недостаточно. Слабая изученность проблемы обуславливает необходимость изучения региональной специфики питания культуры с целью разработки научно обоснованных программ минерального питания на агросерых почвах европейской части РФ.

Цель работы – изучение влияния азотных и калийных удобрений на сезонную динамику минеральных форм азота в корнеобитаемом слое почвы неорошаемого вишневого сада, урожайность деревьев и накопление нитратов в плодах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент проводили в течение 5-ти лет (2018–2022 гг.) в вишневом саду 2015 г. посадки (666 деревьев/га) на территории ВНИИСПК, расположенного в лесостепной зоне Среднерусской возвышенности (Орловская обл.). Климат региона – умеренно континентальный. Среднегодовая температура в годы проведения исследования составила 7.4°C, годовое количество осадков – 450–703 мм. Сумма положительных температур находилась в пределах 2860–3280°C.

Почва – агросерая среднесуглинистая по классификации почв России (2004) [13], или Haplic Luvisol по классификации почв WRB (2014) [14], характеризовалась следующими показателями в слое 0–60 см: содержание гумуса – 3.58–4.57%, подвижных P_2O_5 и K_2O – 142–327 и 45–122 мг/кг соответственно, $N_{\text{лг}}$ – 78.4–108 мг/кг, pH_{KCl} 5.5–5.7 ед., $H_{\text{общ}}$ – 3.2–3.9 мг-экв/100 г, обменные Ca и Mg – 2940–3100 и 528–576 мг/кг соответственно. Содержание почвы в междурядьях сада (с 2015 по 2019 гг.) – черный пар, с 2020 г. – залужение, в рядах деревьев – обработка гербицидами. В саду проводили защитные мероприятия от вредителей и болезней, общепринятые для данной культуры.

Опыт начат в 2017 г. с сортом вишни Тургеневка (*Prunus cerasus* L.) на подвое В-2-180. Варианты

опыта: 1 – контроль (без удобрений), 2 – $N_{\text{м}}30K_{\text{с}}40$, 3 – $N_{\text{м}}60K_{\text{с}}80$, 4 – $N_{\text{м}}90K_{\text{с}}120$, 5 – $N_{\text{м}}120K_{\text{с}}160$. Азотные и калийные удобрения вносили ежегодно рано весной (середина апреля) на глубину 10–15 см. Повторность трехкратная, размещение вариантов рендомизированное. Каждая учетная делянка включала 5 деревьев (4 опытных, 1 защитное).

Почвенные образцы, смешанные из 3-х точечных проб, отбирали в слоях 0–20, 20–40 и 40–60 см в ряду деревьев на расстоянии 1.0–1.2 м от штамба. Отбор проб почвы проводили 5 раз в течение периодов вегетации, с мая по сентябрь 2018–2022 гг. В свежих почвенных образцах определяли содержание аммонийного азота с реактивом Несслера на спектрофотометре BIO RAD SmartSpek Plus (США) [15]. Содержание нитратного азота в почве (ГОСТ 26488-85) и плодах съемной зрелости (ГОСТ 26951-86) определяли в суспензии с 1%-ным раствором алюмокалиевых квасцов на нитратометре ИТ-1201 (Россия). Учет урожая проводили весовым методом с каждой делянки. Для математической обработки данных использовали дисперсионный и корреляционный методы [16].

За время проведения исследования не наблюдали экстремально неблагоприятных погодных условий, но в 2021 г. урожайность вишни была низкой из-за повреждения цветов и плодовых почек весенними заморозками.

Период вегетации (май–сентябрь) 2018 г. был засушливым (ГТК 0.76), 2019 и 2020 гг. характеризовались нормальными условиями увлажнения (ГТК 1.1), в 2021 и 2022 гг. увлажнение было избыточным (ГТК 1.6 и 1.4 соответственно).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растения потребляют азот из почвы преимущественно в виде минеральных форм – аммонийной и нитратной. Преобладающей формой неорганического азота в изученной почве был $N-NH_4$. В течение периодов вегетации 2018–2022 гг. его концентрация в слое 0–60 см менялась в диапазоне от 1.62 до 36.7 мг/кг на удобренных делянках (рис. 1).

При этом количество $N-NO_3$ варьировало в пределах 0.19–9.10 мг/кг, что свидетельствовало о невысокой активности процессов нитрификации.

В экспериментах с ^{15}N установлено, что максимальное поглощение азота деревьями вишни происходило в период созревания плодов [17]. Сезонная динамика $N-NH_4$ в почве изученного сада хорошо соотносилась с этими данными. В годы исследования, независимо от внесения удобрений, концентрация $N-NH_4$ в слое почвы 0–60 см была максимальной в мае и снижалась к июлю–августу в 2.5–12 раз. Такое снижение, видимо, было связано с интенсивным потреблением $N-NH_4$ растениями, а также

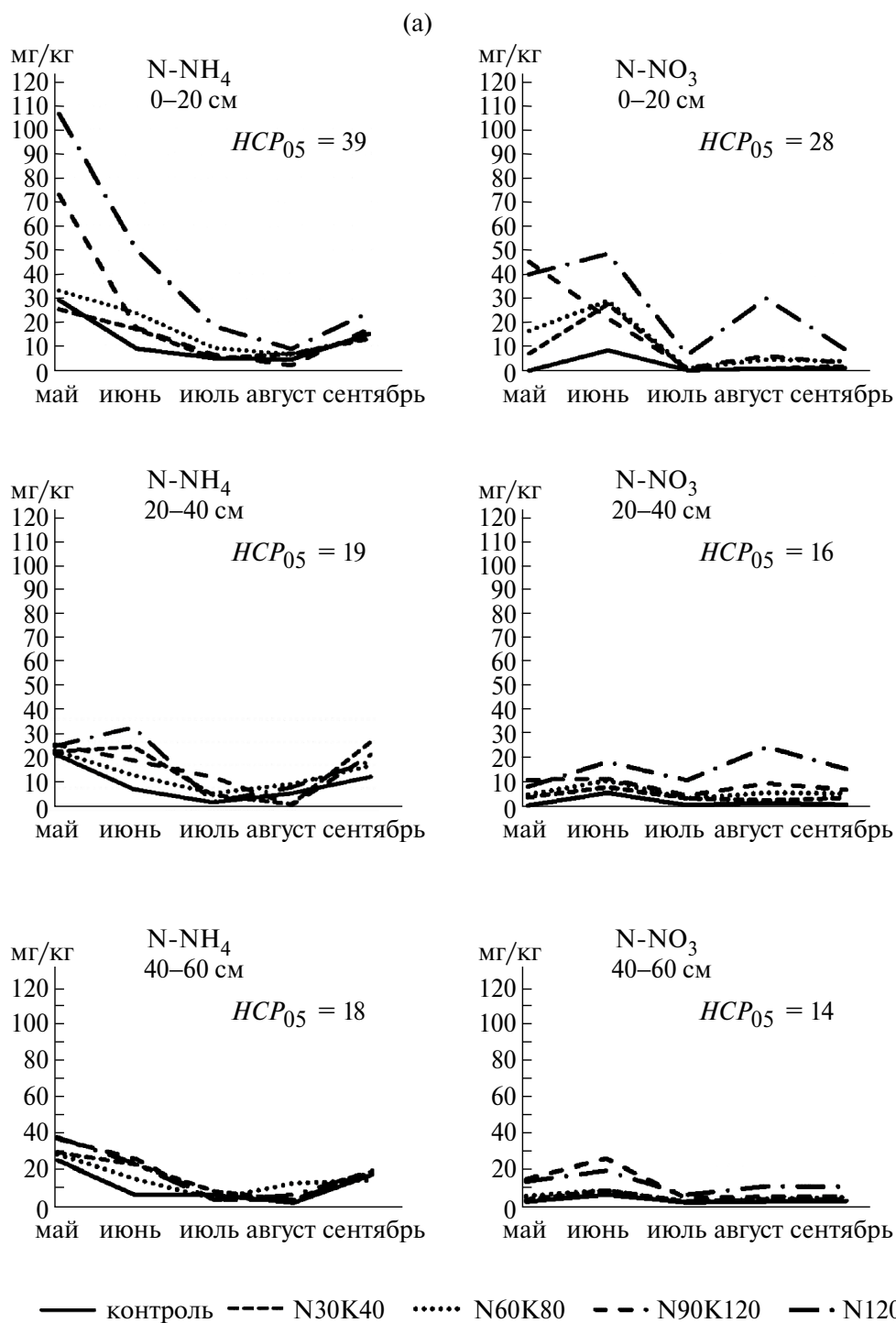


Рис. 1. Содержание аммонийного и нитратного азота в слоях почвы 0–20, 20–40 и 40–60 см под влиянием минеральных удобрений: (а) – 2018 г., (б) – 2019 г., (в) – 2020 г., (г) – 2021 г., (д) – 2022 г.

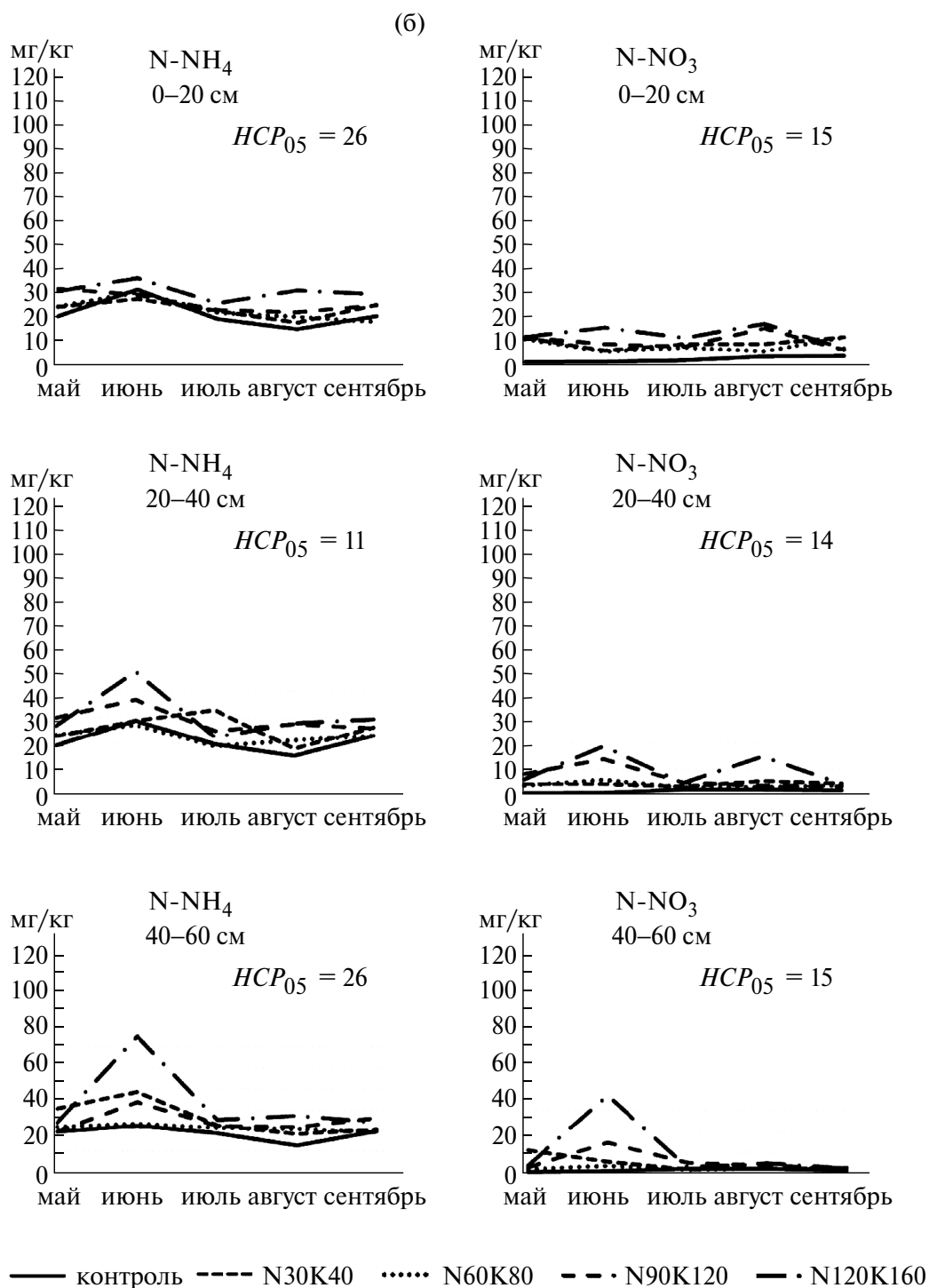


Рис. 1. Продолжение.

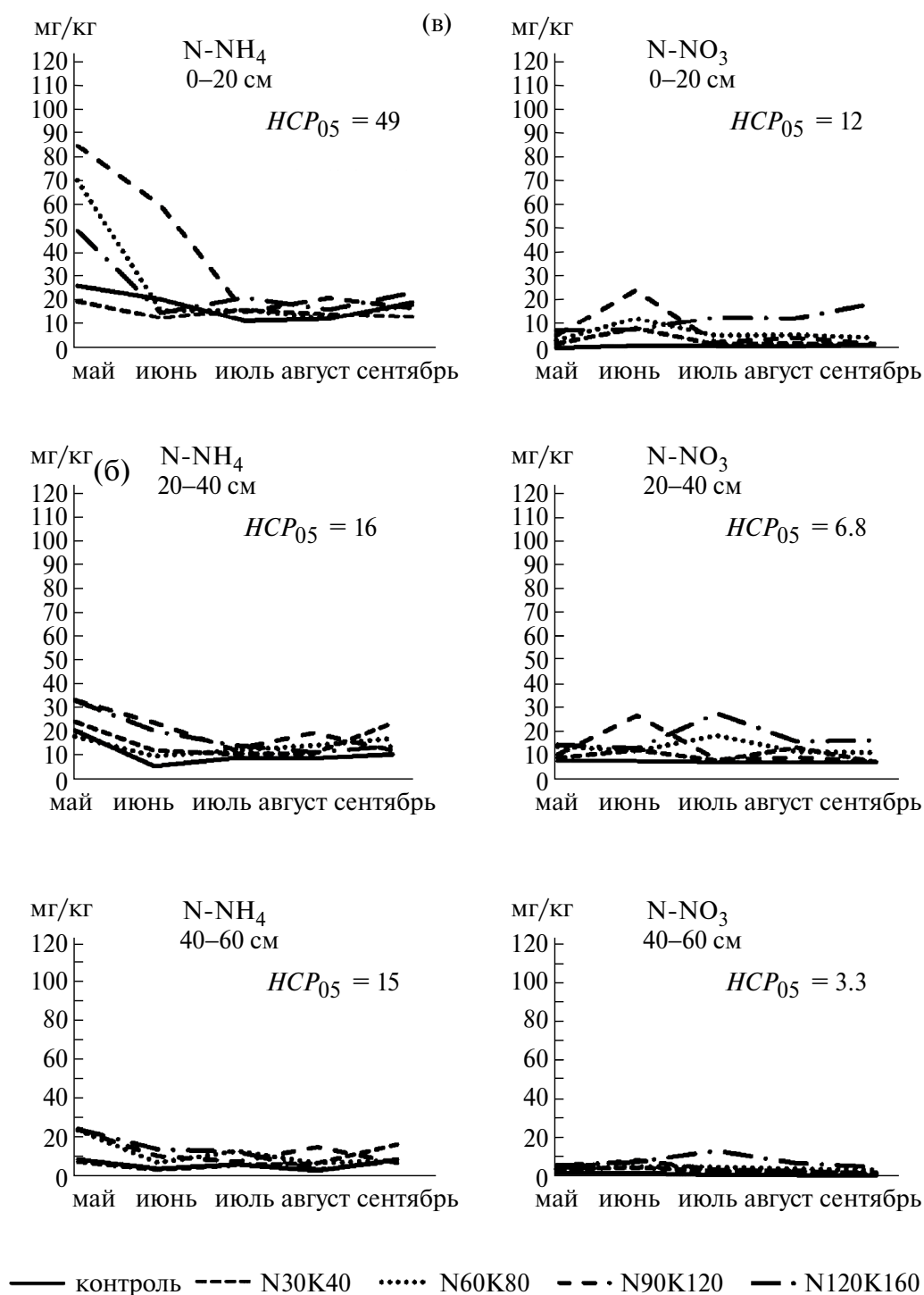


Рис. 1. Продолжение.

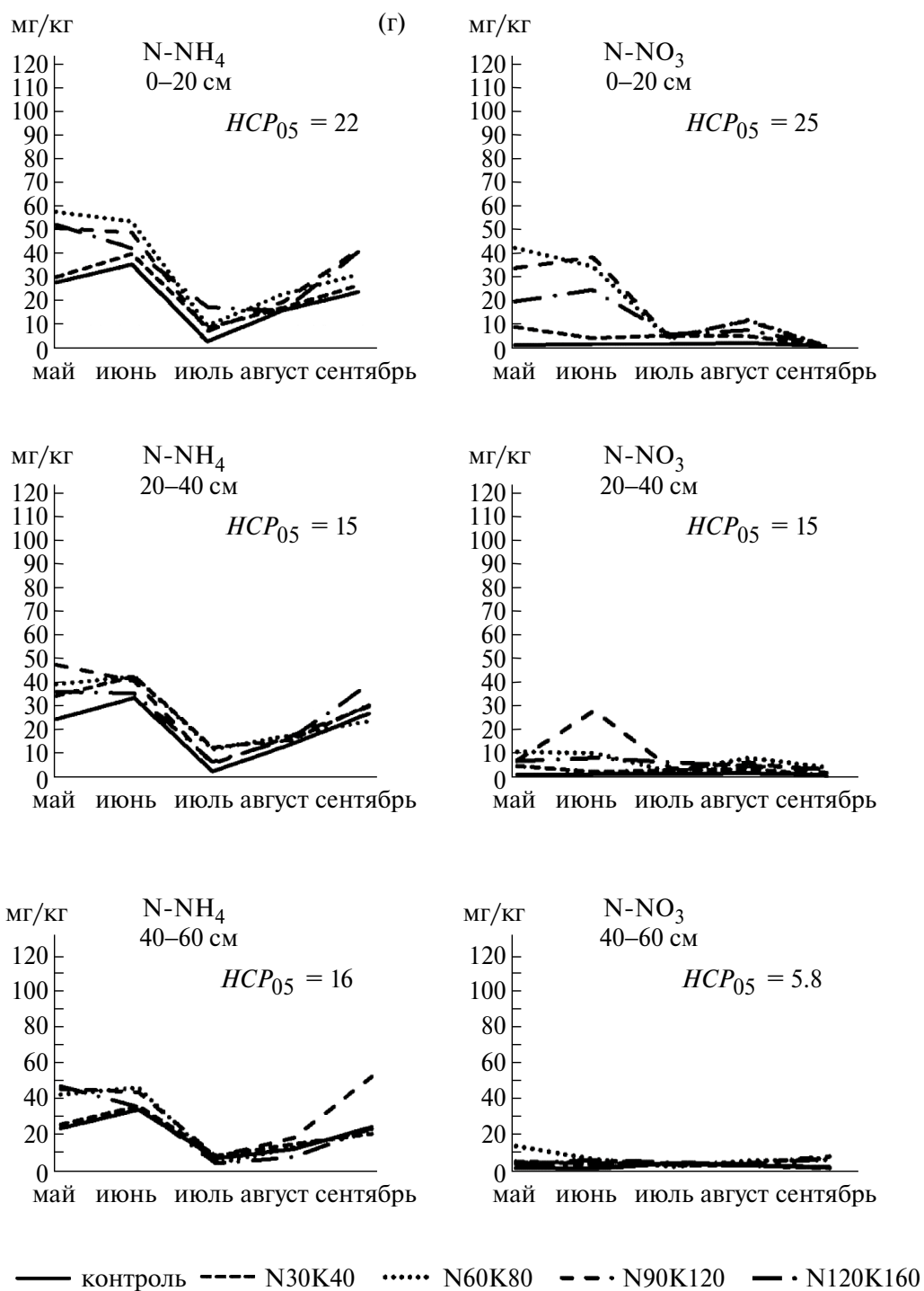


Рис. 1. Продолжение.

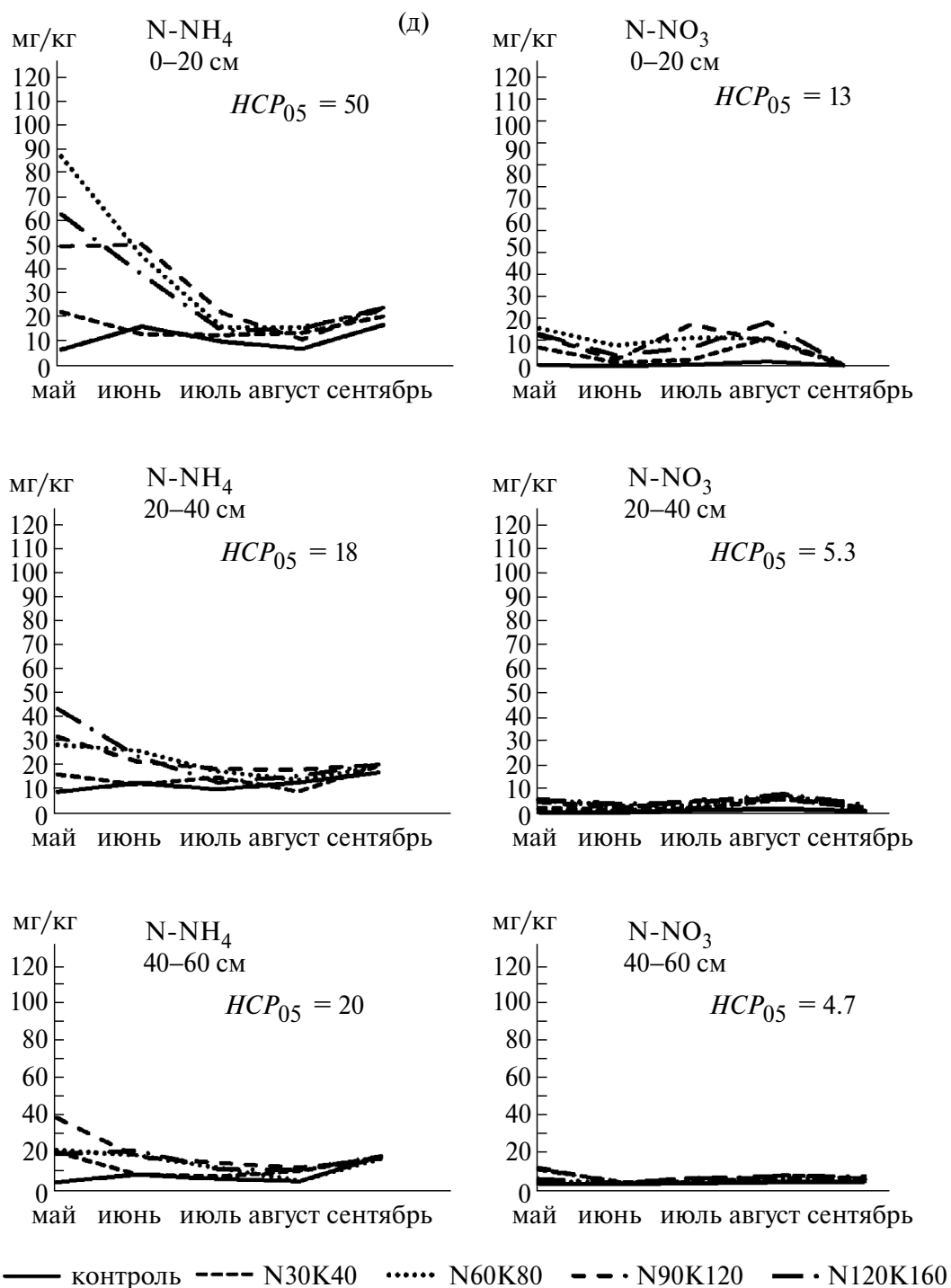


Рис. 1. Окончание.

с иммобилизацией микроорганизмами и глинистыми минералами [18]. В сентябре концентрация $N-NH_4$ в почве возрастала. В условиях Среднерусской возвышенности осенью почва еще достаточно прогрета, и в ней происходит активная деятельность микроорганизмов по минерализации поступивших за сезон органических остатков.

Описанные выше закономерности сезонной динамики $N-NH_4$ сохранялись на протяжении всех лет исследования, за исключением 2019 г. В 2019 г. относительно стабильное содержание аммонийного азота в слое почвы 0–20 см (14.1–30.9 мг/кг) сохранялось в период с мая по сентябрь во всех вариантах опыта (рис. 1б). Вероятно, причиной этого являлись погодные условия периода вегетации. В мае 2019 г. выпали обильные осадки (85 мм), что могло привести к вымыванию минерального азота, внесенного с удобрениями, в более глубокие слои почвы. Поэтому, в отличие от других лет проведения эксперимента, в мае 2019 г. содержание $N-NH_4$ в слое 0–20 см почвы удобрённых делянок не отличалось от контроля. Азот удобрений, перемещенный в более глубокие слои, мог быть иммобилизован почвенными микроорганизмами, поэтому показатели содержания азота на глубинах 20–40 и 40–60 см также достоверно не различались в вариантах опыта. Далее последовал период засухи, продолжавшийся с 27 мая по 26 июня, при этом среднемесячная температура июня была на 3.6°C выше среднесезонных показателей. Это привело к пересыханию верхнего слоя почвы, тогда как в нижележащих слоях, при лучшем прогреве и влажности 17–18%, создались благоприятные условия для дальнейшей микробной трансформации азота удобрений, что привело к возрастанию содержания аммония в нижних слоях почвы удобрённых делянок (рис. 1б). Потребление почвенного азота деревьями в этот период могло быть низким из-за засухи.

Для сезонных изменений содержания $N-NO_3$ была характерна иная специфика (рис. 1). В отличие от аммонийного азота, сезонная динамика $N-NO_3$ различалась на неудобрённых и удобрённых делянках. Во всех изученных слоях неудобрённой почвы распределение $N-NO_3$ в течение периодов вегетации 2018–2022 гг. было равномерным, без резких сезонных изменений. Внесение удобрений приводило к сезонным изменениям $N-NO_3$ в почве. При этом основным фактором, определяющим характер сезонной динамики $N-NO_3$, являлись гидротермические условия периодов вегетации. На удобрённых делянках в слое 0–20 см почвы весной и в начале лета отмечали рост содержания нитратного азота. Это можно объяснить тем, что достаточный запас влаги и повышение температуры в мае–июне способствовали активации процессов нитрификации мочевины. В июле содержание нитратов снижалось в результате потребления растениями и микроорганизмами, а также, возможно, происходило их вымывание, поскольку в июле 2018,

2020 и 2022 гг. были периоды интенсивных ливней. В августе отмечали повторный пик нитрификации и накопление $N-NO_3$ в почве. В сентябре количество нитратов в почве, как правило, снижалось, что могло быть связано с их трансформацией в другие формы почвенного азота, поскольку содержание аммонийного азота в этот период повышалось. Выявленные нами особенности сезонной динамики минеральных форм азота в почве вишневого сада согласовались с данными других исследований, проведенных в вишневых садах Восточной Европы [6].

Показано, что при внесении азотных удобрений содержание аммонийных и нитратных форм азота в почве под садами значительно возрастает [6, 7]. В изученном саду внесение азотных удобрений приводило к повышению содержания $N-NH_4$ в почве, по сравнению с контролем (в 2–13 раз), преимущественно в слое 0–20 см. Статистически значимые различия между вариантами по содержанию $N-NH_4$ отмечены только в мае–июне, а в последующие месяцы эти различия сглаживались.

В годы исследования увеличение содержания $N-NH_4$ в слое 0–20 см до высокого уровня (50–107 мг/кг) отмечали в вариантах N60K80, N90K120 и N120K160. Необходимо отметить, что только в засушливых мае и июне 2018 г. максимальное содержание $N-NH_4$ было в варианте с максимальной дозой удобрений N120K160 (рис. 1а), причем количество $N-NH_4$ было достоверно больше, чем в вариантах с более низкими дозами. В остальные годы величины показателя в вариантах N60K80, N90K120 и N120K160 статистически не различались между собой (рис. 1б–д). Такой эффект, вероятно, был связан со значительным увеличением в почве концентрации катиона калия, который может активно конкурировать с катионом аммония за обменные позиции [19], поскольку мочевины и сульфат калия вносили в наш эксперимент одновременно. Таким образом, в вариантах с высокими дозами удобрений фиксация катиона $N-NH_4$ почвой могла ослабевать, что облегчает его миграцию в нижние слои почвы.

Известно, что $N-NH_4$ поглощается коллоидами почвы и относительно слабо мигрирует по профилю, но при систематическом применении азотных удобрений все же происходит его вымывание [20]. В нашем опыте ежегодно отмечали периодическое увеличение содержания $N-NH_4$ в слоях 20–40 и 40–60 см почвы в основном при внесении доз удобрений N90K120 и N120K160. В некоторые годы (2021 г.) существенное увеличение содержания $N-NH_4$ в нижних слоях почвы отмечено и при внесении меньшей дозы N60K80. В варианте с самой малой дозой N30K40 не наблюдали миграции аммонийного азота вниз по профилю почвы.

Показано, что при внесении мочевины, являющейся источником азота в амидной форме,

происходит значительное увеличение доли $N-NO_3$ в почвенном растворе и возрастает риск вымывания нитратов на глубину [9, 21]. Нитраты, в отличие от аммония, отличаются высокой подвижностью и могут легко мигрировать из верхних горизонтов почв в более глубокие слои. Их миграция по профилю почвы во многом зависит от характера водного режима почвы и ее гранулометрического состава. Изученная почва характеризуется периодически промывным типом водного режима, для которого свойственна сильная миграция $N-NO_3$ в профиле почвы с нисходящими и восходящими потоками влаги при интенсивном применении азотных удобрений [22].

В неорошаемом экспериментальном саду концентрация $N-NO_3$ в слое 0–20 см почвы существенно возрастала (в 18–70 раз) по сравнению с контролем при внесении мочевины в дозах N90 и N120 (рис. 1). Увеличение концентрации нитратного азота при внесении доз $>N60$ создавало предпосылки для миграции $N-NO_3$ вглубь почвенного профиля. В среднем за изученный период содержание $N-NO_3$ в нижнем слое 20–60 см почвы превышало контроль (1.4 ± 0.5 мг/кг) в 2.4–8.6 раза в зависимости от величины доз удобрений и условий года. Можно предположить, что нитраты могут мигрировать глубже изученного нами слоя 0–60 см, т.к. имеются данные о накоплении $N-NO_3$ на глубине 1 м и более в почве интенсивно удобряемых садов [4, 5, 23]. Об этом может свидетельствовать высокая влажность почвы в слое 0–60 см, которая в периоды обильных осадков превышала 20%.

Оценка сезонной динамики минерального азота показала, что он не накапливался в корнеобитаемом слое почвы при внесении удобрений. Величины этого показателя определялись гидротермическими условиями, потребностью деревьев и количеством внесенных удобрений в каждом отдельно взятом периоде вегетации.

Определяющим фактором оценки эффективности удобрений является урожайность. Потенциальная урожайность деревьев вишни сорта Тургеневка в условиях нашего опыта достигала 20 т/га [24]. Деревья вступили в период плодоношения в 2018 г. В 2018–2021 гг. была получена урожайность на уровне 1.21–6.15 т/га, которая существенно не зависела от доз внесенных удобрений (табл. 1). В 2022 г. урожайность достигла максимума и в среднем в опыте составила 17.3 ± 2.3 т/га.

Важными факторами, повлиявшими на урожайность вишни в 2022 г., были метеорологические характеристики воздуха и почвы и уровень содержания минерального азота в предшествующем периоде вегетации. Гидротермические условия 2021 г. (повышенные температура и влажность) способствовали оптимизации процессов трансформации азота удобрений и органического вещества в агросерой почве, что привело к высокой обеспеченности минеральным азотом слоя 0–60 см почвы как на удобренных, так и неудобренных делянках (рис. 1г).

Благоприятный азотный режим почвы в 2021 г., а также низкая урожайность (из-за заморозков в период цветения) способствовали созданию у деревьев запаса питательных веществ и закладке большого количества цветковых почек. В результате в 2022 г. деревья вишни сорта Тургеневка практически смогли реализовать свой продуктивный потенциал.

Положительное влияние условий азотного питания деревьев на их урожайность в последующем периоде вегетации подтверждали результаты корреляционного анализа между урожайностью в 2022 г. и содержанием в почве форм $N-NO_3$, $N-NH_4$ и $N-NH_4 + N-NO_3$ в предшествующий 2021 г. Были выявлены статистически значимые положительные корреляции между этими величинами ($r = 0.67–0.91$, $p < 0.05$). При этом величина будущего урожая более тесно была связана с содержанием в почве $N-NO_3$

Таблица 1. Урожайность деревьев вишни сорта Тургеневка, т/га (2018–2022 гг.)

Вариант	Годы					Средние фактора А
	2018	2019	2020	2021	2022	
Контроль без удобрений	2.92	5.49	3.97	1.93	15.0	5.86
N30K40	1.57	5.64	5.17	1.75	14.9	5.81
N60K80	2.59	5.77	6.15	1.21	20.0	7.15
N90K120	3.41	4.67	5.44	1.71	18.0	6.64
N120K160	3.56	5.55	6.73	1.97	18.6	7.29
Средние фактора Б	2.81	5.42	5.49	1.71	17.3	
HCP_{05}	HCP_{05} фактора А = 1.9, HCP_{05} фактора Б = 1.9, HCP_{05} фактора А×Б = 4.2					

и суммарным количеством $N-NH_4 + N-NO_3$. Таким образом, поддержание оптимального азотного режима почвы на протяжении периода вегетации 2021 г. способствовало увеличению урожайности в следующем году.

В 2022 г. урожайность достоверно превысила контроль (на 33.7%) при внесении дозы N60K80. Более высокие дозы не способствовали дополнительному увеличению урожайности. Это указывало на то, что дозы N90K120 и N120K160 были намного больше, чем требуется деревьям даже в год с наиболее благоприятными условиями для реализации продуктивного потенциала. Полученные нами результаты согласуются с данными многолетнего эксперимента, проведенного в Западной Польше, в котором было установлено, что оптимальная доза азотных удобрений для вишневых садов составляет 60 кг/га, а повышение дозы азота до 120 кг/га нецелесообразно [25]. Аналогичные результаты получены и для семечковых культур, выращиваемых на черноземах юга Украины [5].

В экспериментальном саду слабое влияние удобрений на урожайность в 2018–2021 гг., видимо, было связано с естественным уровнем содержания минерального азота, достаточным для удовлетворения потребностей деревьев вишни. Почва сада характеризовалась высоким содержанием гумуса (4.5%), что свидетельствовало о благоприятных условиях для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, регулирующих биологический круговорот азота в экосистеме сада.

Установлено, что ежегодная потребность 8–10-летних деревьев вишни в азоте составляет 61.9 кг [26]. По данным [27], для формирования урожая 1 т/га 13-летним деревьям вишни ежегодно требуется 6 кг N/га. Проведенные расчеты показали, что даже в неудо-бренной почве нашего сада запасы минерального азота в слое 0–20 см варьировали в течение периодов вегетации в пределах 30–100 кг/га. Такое количество азота превышало потребности 4–7-летних деревьев вишни. Естественного уровня содержания

минерального азота $N-NH_4 + N-NO_3$ в количестве 18 ± 5 мг/кг верхнем слое 0–20 см почвы было достаточно для получения урожайности вишни до 15 т/га. Возрастание урожайности деревьев до 20 т/га потребовало дополнительного азотного и калийного питания. Можно сделать вывод, что для реализации потенциала высокопродуктивных сортов вишни недостаточно только мобилизации природных запасов азота даже в богатых гумусом почвах.

Одним из экологических аспектов применения азотных удобрений является качество плодов, а именно накопление в них нитратов. У плодовых деревьев наибольшая часть нитратов редуцируется в корнях, что связано с высокой активностью в них нитратредуктазы [28, 29]. Однако при обильном азотном питании часть $N-NO_3$ транспортируется через ксилему с транспирационным потоком к листьям и плодам. Количество $N-NO_3$ в растительных тканях зависит от особенностей метаболических процессов, почвенно-климатических факторов, внесения удобрений, степени зрелости плодов [4, 30].

Установлено, что накопление нитратов во фруктах более низкое по сравнению с овощными культурами [30]. В действующих в настоящее время нормативных документах РФ ПДК нитратов в свежих плодах вишни не установлено. Фруктовые консервы для детского питания должны содержать нитратов ≤ 50 мг/кг [31].

В нашем эксперименте содержание $N-NO_3$ в плодах вишни было невысоким (11.5–25.5 мг/кг) (табл. 2), что согласуется с результатами других исследователей [32].

В среднем за 4 года исследования удобрения не оказали достоверного влияния на содержание нитратов в плодах. Важным фактором накопления нитратов в плодах были метеоусловия периодов вегетации. Максимальная концентрация $N-NO_3$ в плодах зафиксирована в 2021 г., когда гидротермические условия были наиболее благоприятными для процессов нитрификации и усвоения нитратов растениями.

Таблица 2. Содержание нитратов в плодах вишни сорта Тургеневка, мг/кг

Вариант	Годы				Средние фактора А
	2019	2020	2021	2022	
Контроль без удобрений	16.3	19.4	22.3	21.6	19.9
N30K40	11.5	19.9	25.3	23.1	20.0
N60K80	14.6	19.2	25.4	21.0	20.0
N90K120	16.9	19.1	25.5	19.0	20.1
N120K160	17.4	18.4	25.5	17.3	19.6
Средние фактора Б	15.3	19.2	24.8	20.4	
HCP_{05}	HCP_{05} фактора А = 2.1, HCP_{05} фактора Б = 1.9, HCP_{05} фактора А×Б = 4.2				

Хотя имеются сведения о высоких положительных корреляциях между содержанием $N-NO_3$ в плодах и почве [4, 5], в нашем опыте такой взаимосвязи установлено не было. Таким образом, при ежегодном применении мочевины в дозах $N30-N120$ на агросерых почвах не возникло потенциальной угрозы накопления нитратов в плодах вишни.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее важными факторами, определявшими особенности сезонной динамики содержания минеральных соединений азота в агросерой почве вишневого сада, были метеорологические условия, потребление растениями минеральных форм азота и дозы удобрений.

Содержание $N-NH_4$ в корнеобитаемом слое почвы было максимальным в мае и снижалось к июлю–августу в 2.5–12 раз. При этом сезонная динамика $N-NH_4$ была сходной на удобренных и неудобренных делянках. При выращивании вишни без минеральных удобрений распределение $N-NO_3$ в почве сада было равномерным в течение периодов вегетации. Внесение удобрений приводило к сезонным изменениям содержания $N-NO_3$, характер которых в большей степени зависел от гидротермических условий.

Ежегодное применение мочевины в дозах $N60-120$ приводило к повышению содержания доступных форм азота в слое 0–20 см почвы: содержание $N-NH_4$ увеличивалось в 2–12 раз, $N-NO_3$ – в 18–70 раз. При этом накопления минерального азота в корнеобитаемом слое почвы не происходило. Величина содержания $N-NH_4 + N-NO_3$ определялась гидротермическими условиями, потребностью деревьев и количеством внесенных удобрений в каждом отдельно взятом периоде вегетации. Перемещение $N-NO_3$ в более глубокие слои почвы происходило, когда дозы удобрений превышали $N60K80$.

Увеличение количества доступного азота в сочетании с калийным питанием не оказывало достоверного влияния на урожайность деревьев вишни, когда она составляла не более 15 т/га. Для получения такого количества плодов было достаточно естественных запасов минерального азота $N-NH_4 + N-NO_3$ на уровне 18 ± 5 мг/кг. Возрастание урожайности деревьев до 20 т/га потребовало дополнительного азотного и калийного питания в количестве $N60K80$, что приводило к увеличению урожайности на 33.7%. Более высокие дозы $N90K120$ и $N120K160$ были избыточными и не приводили к дополнительному увеличению урожайности. Накопления нитратов в плодах под действием удобрений не установлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FAOSTAT Crops. <http://faostat.fao.org/beta/en/#data/QC>
2. Унадышева Г.Ю. Инновационные элементы технологии возделывания вишни // Достиж. науки и техн. АПК. 2016. № 30(9). С. 70–72.
3. Koumanov K.S., Staneva I.N., Kornov G.D., Germanova D.R. Intensive sweet cherry production on dwarfing rootstocks revisited // Sci. Horticulturae. 2018. V. 229. P. 193–200.
4. Носко Б.С., Малюк Т.В. Агрохимические и агроэкологические особенности применения азотных удобрений на черноземе южном в интенсивных садах груши // Агрохимия. 2010. № 9. С. 50–59.
5. Maliuk T., Pcholkina N., Kozłova L., Yeremenko O. Nitrogen in soil profile and fruits in the intensive apple cultivation technology // Modern development paths of agricultural production: Trends and innovations. Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 737–751.
6. Rutkowski K., Łysiak G.P. Effect of nitrogen fertilization on tree growth and nutrient content in soil and cherry leaves (*Prunus cerasus* L.) // Agriculture. 2023. V. 13(3). P. 578.
7. Kowalczyk W., Wrona D., Przybyłko S. Effect of nitrogen fertilization of apple orchard on soil mineral nitrogen content, yielding of the apple trees and nutritional status of leaves and fruits // Agriculture. 2022. V. 12(12). P. 2169.
8. Leonicheva E., Roeva T., Leonteva L., Stolyarov M. Nitrogen regime of Haplic Luvisol in orchards at fertilization // BIO Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. № 36.
9. Chen S., Zhang S., Hu T., Li H., Sun J., Sun G., Liu J. Responses of soil reactive nitrogen pools and enzyme activities to water and nitrogen levels and their relationship with apple yield and quality under drip fertilization // Sci. Horticulturae. 2024. V. 324. P. 112632.
10. Ernani P.R., Rogeri D.A., Proença M.M., Dias J. Addition of nitrogen had no effect on yield and quality of apples in a high density orchard carrying a dwarf rootstock // Revista Brasileira de Fruticultura. 2008. № 30(4). P. 1113–1118.
11. Rubio Ames Z., Brecht J. K., Olmstead M.A. Nitrogen fertilization rates in a subtropical peach orchard: effects on tree vigor and fruit quality // J. Sci. Food Agric. 2020. № 100(2). P. 527–539.
12. Sanchez J.E., Edson C.E., Bird G.W., Whalon M.E., Willson T.S., Harwood R.R., Kizilkaya K., Nugent J.E., Klein W., Middleton A., Loudon T.L., Mutch D.R., Scrimger J. Orchard floor and nitrogen management influences soil and water quality and tart cherry yields // J. Amer. Soc. Hort. Sci. 2003. № 128(2). P. 277–284.
13. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

14. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO, 2014. 181 p.
15. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Амелянчик О.А., Большеева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижукова В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
16. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н. Методика агрохимических исследований и статистическая оценка их результатов: учеб. пособ. 2-е изд. Майкоп: ОАО "Полиграф-ЮГ", 2015. 664 с.
17. Rivera R., Bañados P., Ayala M. Distribution of ^{15}N applied to the soil in the 'Bing'/'Gisela 6' sweet cherry (*Prunus avium* L.) combination // Sci. Horticulturae. 2016. V. 210. P. 242–249.
18. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Азот в агроэкосистеме на черноземных почвах (к 125-летию экспедиции В.В. Докучаева в Каменную Степь). М.: РАН, 2018. 180 с.
19. Scherer H.W., Feils E., Beuters P. Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium // Plant Soil Environ. 2014. № 60. P. 325–331.
20. Минеев В.Г. Агрохимия. М.: Наука, 2006. 720 с.
21. Zhou H., Niu X., Yan H., Zhao N., Zhang F., Wu L., Yin D., Kjellgren R. Interactive effects of water and fertilizer on yield, soil water and nitrate dynamics of young apple tree in semiarid region of northwest China // Agronomy. 2019. № 9(7). P. 360.
22. Никитишен В.И., Личко В.И. Баланс азота в агроэкосистемах на серых лесных почвах // Почвоведение. 2008. № 4. С. 481–493.
23. Ren M., Li C., Gao X., Niu H., Cai Y., Wen H., Yang M., Siddique K.H.M., Zhao X. High nutrients surplus led to deep soil nitrate accumulation and acidification after cropland conversion to apple orchards on the Loess Plateau, China // Agricult. Ecosyst. Environ. 2023. V. 351. P. 108482.
24. Джигадо Е.Н., Гуляева А.А. Улучшение сортимента косточковых культур в средней полосе России // Совр. сад-во (Contempor. Hortic.) 2013. № 4(8). С. 11–28.
25. Rutkowski K., Łysiak G.P. Weather conditions, orchard age and nitrogen fertilization influences yield and quality of 'Łutówka' Sour cherry fruit // Agriculture. 2022. V. 12(12). P. 2008.
26. Baghdadi M., Sadowski A. Estimation of nutrient requirements of sour cherry // ActaHortic. 1998. № 468. P. 515–522.
27. Roversi A., Monteforte A. Preliminary results on the mineral uptake of six sweet cherry varieties // ActaHortic. 2006. № 721. P. 123–128.
28. Gojon A., Bussi C., Grignon C., Salsac L. Distribution of NO_3 -reduction between roots and shoots of peachtree seedlings as affected by NO_3 -uptake rate // Physiol. Plantarum. 1991. № 82(4). P. 505–512.
29. Lee H.J., Titus J.S. Nitrogen accumulation and nitrate reductase activity in MM. 106 apple trees as affected by nitrate supply // J. Hortic. Sci. 1992. № 67(2). P. 273–281.
30. Colla G., Kim H.J., Kyriacou M.C., Rouphael Y. Nitrate in fruits and vegetables // Sci. Horticulturae. 2018. V. 237. P. 221–238.
31. Технический регламент Таможенного союза "О безопасности пищевой продукции" (ТР ТС 021/2011).
32. Dogan A., Kazankaya A., Balta M.F. Nitrate and nitrite levels of some fruit species grown in Van, Turkey // Asian J. Chem. 2008. № 20(2). P. 1191–1198.

Nitrogen Regime of the Agro-Grey Soil of a Cherry Orchard and the Yield of Trees when Applying Fertilizers

T. A. Roeva^{a, #}, E. V. Leonicheva^a, L. I. Leontieva^a

^a*Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding,
d. Zhilina, Orel region, Orel 302530, Russia*

[#]*E-mail: roeva@orel.vniispk.ru*

The dynamics of mineral nitrogen compounds (N-NH₄ and N-NO₃) in root zone of sour cherry orchard was investigated during 2018–2022 in order to estimate the nitrogen doses essential for this fruit crop in the first decade after planting. The field experiment was carried out at an orchard located in the forest-steppe zone of the Central Russian upland (Orel region). Urea and potassium sulfate were applied to the soil once a year in early spring with doses arising from N30K40 to N120K160 kg/ha. The dynamics of N-NH₄ in the soil of fertilized and unfertilized plots were similar, the lowest level of the indicator was in July during fruit ripening. The content of N-NO₃ in unfertilized soil fluctuated slightly through the vegetation period. The fertilizer treatments led to more intensive seasonal fluctuations of N-NO₃ in dependence of weather conditions. Annual fertilization led to annual increase of N-NH₄ content by 2–12 and N-NO₃ by 18–70 times, depending on the dose of nitrogen. But the accumulation of mineral nitrogen in root zone over the years was not revealed. The fertilizers did not affect sour cherry yield when it was lower than 15 t/ha. Still in the high-yielding season the fertilizers application in dose of N60K80 was necessary to reach the yield 20 t/ha.

Keywords: sour cherry (*Prunus cerasus* L.), soil nitrogen regime, nitrogen and potash fertilizers, ammonium and nitrate nitrogen, yield.

УДК 631.81:631.559:633.15(470.63)

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УДОБРЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ КУКУРУЗЫ В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ

© 2024 г. В. Н. Багринцева^{1,*}, И. Н. Ивашененко¹, В. В. Дридигер¹, О. Д. Серова¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы

357528 Пятигорск, ул. Ермолова, 140, Россия

*E-mail: maize-techno@mail.ru

В 2021–2023 гг. на опытном поле Всероссийского НИИ кукурузы в зоне достаточного увлажнения Ставропольского края изучили эффективность допосевного внесения в почву аммиачной селитры (N30) и нитроаммофоски (N30P30K30) в сравнении с некорневой подкормкой растений кукурузы в фазе 8-ми листьев удобрением Батр Цинк (1.0 л/га). В среднем за 3 года высота растений гибрида Машук 220 МВ увеличивалась от аммиачной селитры на 12, нитроаммофоски на 17, от подкормки удобрением Батр Цинк на 16 см, гибрида Машук 355 МВ – соответственно на 19, 23 и 23 см. От перечисленных удобрений получены прибавки урожая зеленой массы: в среднем за 3 года они составили для гибрида Машук 220 МВ соответственно 5.0, 6.7, 6.0 т/га, для гибрида Машук 355 МВ – 4.1, 7.0, 6.8 т/га. Удобрения ежегодно повышали урожайность зерна. Средняя прибавка урожая зерна гибрида Машук 220 МВ от аммиачной селитры была равна 0.64, от нитроаммофоски 0.40, от удобрения Батр Цинк 0.63 т/га. Урожайность зерна гибрида Машук 355 МВ от удобрений повышалась на 0.71, 0.81 и 0.74 т/га соответственно. Затраты на применение в качестве удобрения аммиачной селитры составили 2566.96, нитроаммофоски – 8001.87 руб./га. Стоимость проведения некорневой подкормки растений кукурузы удобрением Батр Цинк составила 1030.69 руб./га. Затраты на применение нитроаммофоски не окупались прибавкой урожая зерна. Подкормка растений гибрида Машук 220 МВ удобрением Батр Цинк на каждый 1 руб. затрат дала доход 6.33 руб., гибрида Машук 355 МВ – 7.62 руб., что было в 3.2–3.3 раза больше по сравнению с внесением аммиачной селитры в почву.

Ключевые слова: кукуруза, удобрения, аммиачная селитра, нитроаммофоска, удобрение Батр Цинк, подкормка, урожайность, окупаемость.

DOI: 10.31857/S0002188124090039, **EDN:** CCZGQL

ВВЕДЕНИЕ

Для удобрения кукурузы в основном применяют традиционные минеральные удобрения, которые вносят в почву [1, 2]. Однако эффективность твердых удобрений, заделываемых в почву, в южных регионах страны зависит от количества выпадающих в летний период осадков [3]. Исследования влияния на урожайность кукурузы фолиарного внесения растворимых удобрений показали, что их эффективность в меньшей степени зависит от условий увлажнения [4]. В настоящее время наряду с использованием традиционных минеральных удобрений важную роль в интегрированной системе удобрения кукурузы играют некорневые подкормки различными агрохимикатами [5, 6]. Питание растений через лист существенно повышает урожайность зеленой массы и зерна кукурузы [6–8]. За счет проникновения питательных веществ с поверхности листа в растения их поглощение и транспортировка по растительному организму

происходит с минимальными энергозатратами, а также без каких-либо потерь. Фолиарное внесение элементов питания при определенных условиях может быть более экономичным и эффективным по сравнению с традиционными способами устранения нарушений минерального питания растений [9, 10].

Особенно эффективны для кукурузы агрохимикаты, содержащие не только важные для кукурузы макроэлементы, но и микроэлементы. Кукуруза проявляет высокую потребность в микроэлементе Zn, который играет важную метаболическую роль в растениях и влияет на их рост и развитие. Внесение цинка с некорневой подкормкой улучшает рост и развитие растений кукурузы, увеличивает выход сухого вещества и урожайность зерна [11–13]. Некорневые подкормки некоторыми агрохимикатами по величине прибавок урожая зерна кукурузы не уступают применению минеральных удобрений [14, 15].

Цель работы – сравнение эффектов некорневой подкормки растений кукурузы удобрением Батр Цинк (1.0 л/га) и допосевного применения минеральных удобрений – аммиачной селитры (N30) и нитроаммофоски (N30P30K30) – на урожайность культуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2021–2023 гг. на опытном поле Всероссийского НИИ кукурузы, расположенном на высоте 541 м н.у.м., 44° с.ш., 43° в.д. в 4-й зоне (достаточного увлажнения) Ставропольского края.

Изучали эффективность применения азотного (N30), полного минерального (N30P30K30) удобрения и некорневой подкормки кукурузы в фазе 8-ми листьев микроудобрением Батр Цинк (1.0 л/га). Минеральные удобрения аммиачную селитру и нитроаммофоску вносили до посева под культивацию, Батр Цинк – опрыскивателем.

Батр Цинк – жидкое комплексное органоминеральное удобрение для листовых подкормок сельскохозяйственных культур, содержит 6% доступной для растений хелатной формы цинка, а также янтарную, лимонную, аскорбиновую кислоты, комплекс активных органических компонентов.

Почва опытного участка – чернозем обыкновенный карбонатный мощный тяжелосуглинистый. Содержание гумуса в слое 0–20 см почвы – среднее (4.0%). Содержание подвижных форм макроэлементов в почве определяли, когда кукуруза находилась в фазе 5-ти листьев, перед некорневой подкормкой растений. В среднем за 2021–2023 гг. в варианте с некорневой подкормкой без внесения минеральных удобрений в слое 0–20 см почвы содержание нитратного азота (по Грандваль–Ляжу) составило 18.0 мг/кг, подвижного фосфора (по Мачигину) – 10.0, подвижного калия (по Мачигину) – 236 мг/кг. После внесения аммиачной селитры (N30) содержание перечисленных элементов питания было равно соответственно: 32.9, 9.8, 245 мг/кг, после нитроаммофоски (N30P30K30) – 32.6, 13.0, 254 мг/кг.

Предшественником кукурузы в опыте была озимая пшеница. Основная обработка почвы – отвальная (вспашка).

Исследовали реакцию гибридов кукурузы селекции ВНИИ кукурузы: среднераннего Машук 20 МВ (ФАО 220) и среднеспелого Машук 355 МВ (ФАО 350). Сев кукурузы проводили в оптимальные сроки: в 2021 г. – 28 апреля, в 2022 г. – 29 апреля, в 2023 г. – 20 апреля сеялкой Gaspardo MTR-8 с повышенной нормой высева 90 тыс./га. В фазе 2–3-х листьев формировали

оптимальную для каждого гибрида густоту стояния растений: Машук 220 МВ – 70, Машук 355 МВ – 55 тыс. семян/га. Сорные растения в посеве кукурузы, находящейся в фазе 3-го листа, уничтожали гербицидом Аденто (0.5 л/га). Для рыхления почвы в фазе 6–7 листьев провели междурядную культивацию. Некорневую подкормку кукурузы в фазе 7–8 листьев агрохимикатом Батр Цинк проводили опрыскивателем навесным CLASS 600/12 при расходе рабочего раствора 250 л/га. Для борьбы с гусеницами хлопковой совки кукурузу в фазе выметывания метелки обработали инсектицидом Корраген (0.2 л/га).

Площадь делянки под одним гибридом была равна 28 м² (5.6 × 5 м), учетной – 10.5 м². Повторность в опыте четырехкратная.

Метеорологические условия в годы проведения исследования были различными. В 2021 г. сумма осадков за май–сентябрь (период вегетации кукурузы) была выше средней за последние 10 лет (2011–2020 гг.) на 43.7 мм и составила 382.2 мм. В мае, во время появления всходов, а также в фазе 5-ти листьев выпало 94.3 мм осадков, в июне во время роста растений – 63.9, в июле во время цветения – 73.5, в августе во время налива зерна – 78.1 мм. Среднесуточная температура воздуха в среднем за май–сентябрь 2021 г. составила 20.3°C и превысила среднюю за последние 10 лет на 1.1°C. Температура воздуха в мае была равна 17.4, июне – 20.9, июле – 23.8, августе – 24.3°C.

В 2022 г. осадков за период вегетации выпало 234.9 мм, что на 109.8 мм меньше среднего показателя за 10 лет. В мае выпало 80.3 мм, июне – 92.5, июле – 7.4, августе – 1.2 мм. Если в период появления всходов, интенсивного роста растений кукурузы и формирования репродуктивных органов количество осадков было достаточным, то во время цветения и налива зерна наблюдали их недостаток. Среднесуточная температура воздуха в мае–сентябре была равна 18.2°C, что на 1.4°C меньше средней за 10-тилетний период. В мае температура воздуха составила 14.2°C, июне – 21.1, июле – 22.5, августе – 24.3°C.

В 2023 г. осадков за период вегетации выпало 322.3 мм, что на 11.1 мм меньше среднего показателя за 10 лет. В мае выпало 95.3 мм, июне – 133.5, июле – 38.5, августе – 5.0 мм. Среднесуточная температура воздуха в мае–сентябре была равна 20.2°C, в мае температура воздуха составила 14.9°C, июне – 20.0, июле – 22.8, августе – 25.0°C.

По распределению осадков в критические периоды кукурузы 2023 г. был для растений наиболее благоприятным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Положительное влияние удобрений на прирост вегетативной части растений кукурузы проявилось во время их интенсивного роста. К фазе цветения растения, удобренные как минеральными удобрениями, так и агрохимикатом Батр Цинк, были существенно выше по сравнению с неудобранными (табл. 1).

В 2021 г. наибольшее влияние на рост растений оказала нитроаммофоска, высота гибридов Машук 220 МВ и Машук 355 МВ увеличилась на 14 см. В 2022 г. высота растений Машук 220 МВ увеличивалась от удобрений на 19–20 см, гибрида Машук 355 МВ – на 26–32 см. Наиболее значительным прирост растений в высоту был от некорневой подкормки удобрением Батр Цинк. В 2023 г. увеличение высоты растений гибрида Машук 220 МВ от удобрения Батр Цинк составило 17 см, как и от нитроаммофоски. Высота гибрида Машук 355 МВ увеличилась на 28 см – на 3 см больше по сравнению с нитроаммофоской.

Под воздействием минеральных удобрений и препарата Батр Цинк повышалась урожайность зеленой массы кукурузы (табл. 2). В 2021 г. прибавки урожая зеленой массы гибрида Машук 220 МВ были существенными, варьировали от 6.5 до 7.3 т/га без существенных различий. Полученные от всех удобрений прибавки урожая зеленой массы гибрида Машук 355 МВ были несущественными. В 2022 г. гибрид Машук 220 МВ отреагировал существенным повышением урожайности зеленой массы на все удобрения, но между прибавками урожая в вариантах также не установлено существенных различий. Существенные и равнозначные прибавки урожая зеленой массы гибрида Машук 355 МВ дала нитроаммофоска (5.6 т/га) и подкормка удобрением Батр Цинк (5.9 т/га). В 2023 г. существенным было повышение урожайности зеленой массы гибрида Машук 220 МВ от удобрений нитроаммофоска (9.4 т/га) и Батр Цинк (7.5 т/га). Наибольшие существенные и равнозначные прибавки урожайности зеленой массы гибрида Машук 355 МВ обеспечило применение удобрения Батр Цинк (13.7 т/га) и нитроаммофоски (12.4 т/га).

Все примененные удобрения положительно влияли на формирование початков на растениях кукурузы (табл. 3). Улучшение питания растений вызвало увеличение числа зерен в початках, их длины и массы. Увеличение размеров початков по отношению к контролю было как от внесения удобрений в почву, так и от подкормки. В среднем за 3 года от применения аммиачной селитры длина початков гибрида Машук 220 МВ увеличивалась на 0.9 см, гибрида Машук 355 МВ – на 1.0 см, от нитроаммофоски соответственно на 1.2 и 1.3 см, от удобрения Батр Цинк – на 0.9 и 1.2 см.

Число зерен в початках гибрида Машук 220 МВ увеличивалось от аммиачной селитры в среднем за годы исследования на 33, от нитроаммофоски – на 39, от микроудобрения Батр Цинк – на 45 шт., что было существенным в вариантах с нитроаммофоской и микроудобрением Батр Цинк. Увеличение числа зерен в початках гибрида Машук 355 МВ в вариантах опыта было равно 38, 39, 34 шт. соответственно, что было несущественным.

Прибавки массы початков гибрида Машук 220 МВ от примененных удобрений были несущественными, гибрида Машук 355 МВ – существенной была прибавка только в варианте с применением нитроаммофоски. Масса початков гибрида Машук 220 МВ в среднем за годы исследования увеличилась от аммиачной селитры на 10.6, от нитроаммофоски – на 12.7, от удобрения Батр Цинк – на 14.4 г. У гибрида Машук 355 МВ увеличение массы початков было равно соответственно 14.4, 16.9, 14.9 г.

Масса зерна, полученного с одного початка гибрида Машук 220 МВ, также увеличивалась несущественно, гибрида Машук 355 МВ – существенно увеличивалась только в варианте с нитроаммофоской. При внесении под кукурузу аммиачной селитры масса зерна в початке гибрида Машук 220 МВ увеличилась в среднем за 2021–2023 гг. на 10.0, гибрида Машук 355 МВ – на 11.7 г. Нитроаммофоска увеличивала массу зерна в початках гибридов на 11.1 и 13.2 г, подкормка удобрением Батр Цинк – соответственно на 12.2 и 11.9 г.

Повышение урожайности зерна гибрида Машук 220 МВ в 2021 г. на 0.54 т/га было существенным только за счет подкормки удобрением Батр Цинк (табл. 4). Урожайность гибрида Машук 355 МВ в этом году повышалась существенно (на 0.93 т/га) в результате внесения в почву нитроаммофоски, а также на 0.68 т/га после проведения некорневой подкормки удобрением Батр Цинк. В 2022 г. прибавки урожая зерна были существенными во всех вариантах опыта. Максимальное повышение урожайности гибридов кукурузы на 1.15 и 1.14 т/га обеспечила аммиачная селитра. Нитроаммофоска и Батр Цинк повышали урожайность гибридов на 0.58–0.77 т/га без существенных различий между вариантами применения удобрений. В 2023 г. прибавки урожая зерна гибридов кукурузы от изученных удобрений также были существенными. Некорневая подкормка растений удобрением Батр Цинк обеспечила наибольшее повышение урожайности гибрида Машук 220 МВ на 0.72 т/га и гибрида Машук 355 МВ на 0.97 т/га.

Применение аммиачной селитры и нитроаммофоски является очень дорогим способом улучшения питания растений и экономически не окупается. Полученные нами данные показали, что

Таблица 1. Влияние удобрений на высоту растений кукурузы, см

Вариант	2021 г.			2022 г.			2023 г.			Среднее	
	высота	прирост		высота	прирост		высота	прирост		высота	прирост
Без удобрений	214	—		210	—		225	—		216	—
N30	220	6		229	19		236	11		228	12
N30P30K30	228	14		230	20		242	17		233	17
Батр Цинк (1.0 л/га)	224	10		229	19		242	17		232	16
НСР ₀₅ , см	6			3			5			7	
Гибрид Машук 220 MB											
Без удобрений	237	—		232	—		244	—		238	—
N30	247	10		258	26		267	23		257	15
N30P30K30	251	14		263	31		269	25		261	23
Батр Цинк (1.0 л/га)	246	9		264	32		272	28		261	23
НСР ₀₅ , см	7			5			5			12	
Гибрид Машук 355 MB											

Таблица 2. Влияние удобрений на урожайность зеленой массы кукурузы

Вариант	2021 г.			2022 г.			2023 г.			Среднее	
	урожайность	прибавка		урожайность	прибавка		урожайность	прибавка		урожайность	прибавка
	т/га	%		т/га	%		т/га	%		т/га	%
Без удобрений	32.6	—		29.0	—		41.8	—		34.5	—
N30	39.9	7.3		33.8	4.8		44.7	2.9		39.5	5.0
N30P30K30	39.2	6.6		33.3	4.3		51.2	9.4		41.2	6.7
Батр Цинк (1.0 л/га)	39.1	6.5		33.1	4.1		49.3	7.5		40.5	6.0
НСР ₀₅ , см	4.1			3.7			3.7			2.9	
Гибрид Машук 220 MB											
Без удобрений	30.9	—		29.6	—		39.2	—		33.2	—
N30	32.5	1.6		33.0	3.4		46.4	7.2		37.3	4.1
N30P30K30	33.7	2.8		35.2	5.6		51.6	12.4		40.2	7.0
Батр Цинк (1.0 л/га)	31.6	0.7		35.5	5.9		52.9	13.7		40.0	6.8
НСР ₀₅ , см	3.5			4.1			6.6			5.7	
Гибрид Машук 355 MB											

Таблица 3. Влияние удобрений на структуру урожая кукурузы (среднее за 2021–2023 гг.)

Вариант	Длина початка, см		Зерен в початке, шт.		Масса початка, г		Масса зерна с початка, г	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Без удобрений N30 N30P30K30 Батр Цинк (1.0 л/га) HCP ₀₅ , см	16.3	–	416	–	124	–	100	–
	17.2	0.9	449	33	134	10	110	10
	17.5	1.2	455	39	136	12	111	11
	17.2	0.9	461	45	138	14	112	12
	0.8		34		16		14	
Гибрид Машук 220 МВ								
Без удобрений N30 N30P30K30 Батр Цинк (1.0 л/га) HCP ₀₅ , см	16.2	–	427	–	164	–	133	–
	17.2	1.0	465	38	178	14	145	12
	17.5	1.3	466	39	181	17	147	13
	17.4	1.2	461	34	179	15	145	12
	1.1		40		16		13	
Гибрид Машук 355 МВ								

Примечание. В графе 1 – показатель, 2 – прибавка.

Таблица 4. Влияние удобрений на урожайность зерна кукурузы

Вариант	2021 г.			2022 г.			2023 г.			Среднее	
	урожайность т/га	прибавка	%	урожайность т/га	прибавка	%	урожайность т/га	прибавка	%	урожайность т/га	прибавка %
Без удобрений N30 N30P30K30 Батр Цинк (1.0 л/га) HCP ₀₅ , см	5.47	–	–	5.71	–	–	7.98	–	–	6.39	–
	5.64	0.17	3.1	6.86	1.15	20.1	8.60	0.62	7.8	7.03	0.64
	5.53	0.06	1.1	6.29	0.58	10.2	8.55	0.57	7.1	6.79	0.40
	6.01	0.54	9.9	6.35	0.64	11.2	8.70	0.72	9.0	7.02	0.63
	0.45			0.42			0.41			0.46	
Гибрид Машук 220 МВ											
Без удобрений N30 N30P30K30 Батр Цинк (1.0 л/га) HCP ₀₅ , см	5.19	–	–	6.29	–	–	7.86	–	–	6.45	–
	5.61	0.42	8.1	7.43	1.14	18.1	8.43	0.57	7.3	7.16	0.71
	6.12	0.93	17.9	6.97	0.68	10.8	8.69	0.83	10.6	7.26	0.81
	5.87	0.68	13.1	6.87	0.77	9.2	8.83	0.97	12.3	7.19	0.74
	0.58			0.56			0.51			0.49	
Гибрид Машук 355 МВ											

Таблица 5. Окупаемость затрат на применение удобрений (среднее за 2021–2023 гг.)

Вариант	Затраты на внесение и стоимость удобрения, руб./га	Прибавка урожая, т/га	Стоимость	Дополнительный чистый доход	Получено дохода на 1 руб. затрат, руб.
			дополнительной продукции		
Гибрид Машук 220 МВ					
N30	2566.96	0.64	7680	5113.04	1.99
N30P30K30	8001.87	0.40	4800	−3201.87	—
Батр Цинк (1.0 л/га)	1030.69	0.63	7560	6529.31	6.33
Гибрид Машук 355 МВ					
N30	2566.96	0.71	8520	5953.04	2.32
N30P30K30	8001.87	0.81	9720	1718.13	0.21
Батр Цинк (1.0 л/га)	1030.69	0.74	8880	7849.31	7.62
Среднее для гибридов					
N30	2566.96	0.68	8160	5593.04	2.18
N30P30K30	8001.87	0.61	7320	−681.87	—
Батр Цинк (1.0 л/га)	1030.69	0.69	8280	7249.31	7.03

использование для некорневых подкормок растений жидкого удобрения Батр Цинк может быть альтернативой минеральным удобрениям. Затраты на проведение некорневой подкормки кукурузы удобрением Батр Цинк были в 2.5 раза меньше, чем на применение аммиачной селитры, и в 7.8 раза меньше по сравнению с нитроаммофоской (табл. 5). Примененный в качестве удобрения кукурузы Батр Цинк в среднем для гибридов дал дополнительный чистый доход на 1656.27 руб./га больше по сравнению с аммиачной селитрой в дозе 30 кг д.в./га. От применения нитроаммофоски в дозе N30P30K30 не получено дополнительного дохода. Подкормка растений удобрением Батр Цинк на каждый 1 руб. затрат дала доход в среднем в зависимости от гибрида 7.03 руб., что в 3.2 раза больше по сравнению с внесением аммиачной селитры в почву.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты показали, что на черноземе обыкновенном карбонатном в зоне достаточного увлажнения Ставропольского края некорневая подкормка растений кукурузы в фазе 8-ми листьев удобрением Батр Цинк в дозе 1.0 л/га существенно повышала урожайность зеленой массы и зерна. В среднем за 3 года прибавки урожая зерна гибридов Машук 220 МВ и Машук 355 МВ, полученные от некорневой подкормки, были на уровне прибавок от минеральных удобрений в дозах N30 и N30P30K30. При этом окупаемость 1 руб. затрат на проведение некорневой подкормки растений была значительно больше по сравнению с применением минеральных удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанова З.И., Шальнов И.В., Васильев А.С. Влияние расчетных доз удобрений и густоты стояния на продуктивность кукурузы, вынос и хозяйственный баланс основных элементов питания // Земледелие. 2016. № 3. С. 23–26.
2. Чекмарев П.А., Фомин В.Н., Турнин С.Л. Влияние удобрений на пищевой режим почвы и химический состав зерна гибридов кукурузы // Земледелие. 2017. № 8. С. 14–14.
3. Багринцева В.Н., Иващенко И.Н. Влияние погодных условий в Ставропольском крае на эффективность доз азотного удобрения на кукурузе // Агрохимия. 2020. № 2. С. 85–92.
4. Багринцева В.Н., Иващенко И.Н. Влияние некорневой подкормки растений удобрением Батр Цинк на формирование урожая кукурузы в Ставропольском крае // Рос. сел.-хоз. наука. 2022. № 6. С. 24–27.
5. Адаев Н.Л., Хамзатова М.Х., Амаева А.Г. Интенсификация системы удобрения кукурузы в условиях орошения в Чеченской Республике // Кукуруза и сорго. 2019. № 2. С. 14–21.
6. Васин В.Г., Кошелев И.К. Урожайность и кормовые достоинства гибридов кукурузы при внесении минеральных удобрений и стимуляторов роста // Вестн. Ульяновск. ГСХА. 2018. № 2(42). С. 45–53.
7. Семина С.А., Гаврюшина И.В. Влияние препаратов с микроэлементами на морфобиометрические показатели и урожайность кукурузы // Агрохим. вестн. 2017. № 6. С. 43–46.
8. Shabana E., Shahid J., Ifra S. Effect of humic acid foliar spraying and nitrogen fertilizers management on wheat yield // Inter. J. Agron. Agric. Res. 2014. V. 4. P. 28–33.
9. Егоров В.С., Дзержинская А.А. Фолиарное применение удобрений и механизм их поступления в растения // Пробл. агрохим. и экол. 2015. № 2. С. 51–57.
10. Jakab P., Odry L., Monostori T. Influence of foliar fertilization on yield and grain quality of corn // Rev. Agriculture. Rural Develop. 2021. № 1–2(10). P. 115–120.
11. Palai J.B., Jena J., Lenka S.K. Growth, yield and nutrient of maize as affected by zinc application // Ind. J. Pure Appl. Biosci. 2020. № 8(2). P. 332–339.
12. Hekmat A.W., Mohammadi N.K., Ghosh G. Effect of NPK, biofertilizer and zinc foliar nutrition on growth and growth attributes of baby corn (*Zea mays* L.) // Inter. J. Chem. Stud. 2019. № 7(4). P. 2432–2436.
13. Martinez-Cuesta N., Carciocchi W., Sainz-Rozas H. Effect of zinc application strategies on maize grain yield and zinc concentration in mollisols // J. Plant Nutr. 2021. № 4(44). P. 486–497.
14. Шмалько И.А., Багринцева В.Н. Урожай и окупаемость удобрений при корневом и некорневом питании растений кукурузы // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2022. Т. 52. № 3. С. 17–23. DOI: 10.26898/0370-8799-2022-3-2
15. Hu Y., Burcus Z., Schmidhalter U. Effect of foliar fertilization application on the growth and mineral nutrient content of maize seedlings under drought and salinity // Soil Sci. Plant Nutr. 2008. V. 54. P. 133–141.

Use of Various Fertilizers to Increase the Yield of Maze in the Stavropol Krai

V. N. Bagrintseva^{a, #}, I. N. Ivashenenko^a, V. V. Dridiger^a, O. D. Serova^a

^a*All-Russian Research Scientific Institute of Corn,
ul. Ermolova 14o, Pyatigorsk 357528, Russia*

[#]*E-mail: maize-techno@mail.ru*

In 2021–2023, in the experimental field of the All-Russian Corn Research Institute in the zone of sufficient moisture in the Stavropol Krai the effectiveness of pre-sowing application of ammonium nitrate (N30) and nitroammophoska (N30P30K30) to the soil was studied in comparison with non-root fertilization of maze plants in the 8-leaf phase with Batr Zinc fertilizer (1.0 l/ha). On average, over the period of 3 years, the height of Mashuk 220 MV hybrid plants increased from ammonium nitrate by 12, nitroammophoska by 17, from fertilizing with Batr Zinc fertilizer by 16 cm, Mashuk 355 MV hybrid – by 19, 23 and 23 cm, respectively. From the listed fertilizers, green mass yield increases were obtained: on average for 3 years, for the Mashuk 220 MV hybrid they amounted to 5.0, 6.7, 6.0 t/ha, respectively, and for the Mashuk 355 MV hybrid – 4.1, 7.0, 6.8 t/ha. Fertilizers increased grain yields annually. The average grain yield increase of Mashuk 220 MV hybrid from ammonium nitrate was 0.64, from nitroammophoska – 0.40, from Batr Zinc fertilizer – 0.63 t/ha. The grain yield of Mashuk 355 MV hybrid from fertilizers increased by 0.71, 0.81 and 0.74 t/ha, respectively. The cost of using ammonium nitrate as a fertilizer amounted to 2566.96, nitroammophoska – 8001.87 rub./ha. The cost of carrying out foliar fertilization of corn plants with Batr Zinc fertilizer amounted to 1030.69 rub./ha. The cost of using nitroammophoska did not pay off with an increase in grain yield. Fertilizing plants of Mashuk 220 MV hybrid with Batr Zinc fertilizer for every 1 rub. of costs gave an income of 6.33 rub., Mashuk 355 MV hybrid – 7.62 rub., which was 3.2–3.3 times more than the introduction of ammonium nitrate into the soil.

Keywords: maze, fertilizers, ammonium nitrate, nitroammophoska, fertilizer Batr Zinc, fertilization, yield, payback.

УДК 632.9:633.11“324”:631.559

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ БАКОВЫХ СМЕСЕЙ ПЕСТИЦИДОВ И МИКРОУДОБРЕНИЙ ПРИ ЗАЩИТЕ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА

© 2024 г. Л. М. Власова^{1,*}, О. В. Попова¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
396030 п. ВНИИСС, 92, Рамонский р-н, Воронежская обл., Россия

*E-mail: mihailovna-87lud@mail.ru

Исследовали эффективность защиты озимой пшеницы от вредителей и болезней, урожайность и качество зерна путем применения баковых смесей новых пестицидов и агрохимикатов преимущественно отечественного производства. Исследование проведено в мелкоделяночных опытах в условиях лесостепи Центрального Черноземья в посевах озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Краса Дона. Размер делянок в опытах – 30 м², повторность – четырехкратная, размещение делянок рендомизированное. Изучили баковые инсектофунгицидные смеси препаратов Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс индивидуально и в сочетании с микроудобрением Биостим Зерновой. Для контроля инсектофунгицидного действия использовали баковую смесь препаратов Восторг + Цериакс Плюс, изученную ранее. Применение инсектофунгицидных баковых смесей Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс индивидуально и с микроудобрением Биостим Зерновой в посевах озимой мягкой пшеницы сорта Краса Дона обеспечило высокую биологическую эффективность против комплекса вредителей и болезней. Инсектицидная активность баковых смесей составила 96.5–100, фунгицидная – 78.3–90.5%. Опрыскивание озимой пшеницы баковыми инсектофунгицидными смесями индивидуально и с микроудобрением способствовало существенному увеличению урожайности озимой мягкой пшеницы. Наибольшие прибавки урожая зерна 12.9 и 13.6 ц/га получены в вариантах с обработкой препаратами Спарринг + Эйс + Биостим Зерновой и Клонрин + Элатус Эйс + Биостим Зерновой. Применение изученных баковых смесей индивидуально и с микроудобрением повышало качество зерна озимой пшеницы: увеличилось содержание сырой клейковины на 2.1–3.4% по отношению к контролю, улучшилось ее качество.

Ключевые слова: озимая мягкая пшеница, интегрированная защита, баковые инсектофунгицидные смеси, микроудобрения, вредители, болезни, эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188124090043, **EDN:** CCWLAE

ВВЕДЕНИЕ

Защита растений является одной из составляющих продовольственной безопасности страны. В условиях масштабных санкций в отношении России и опасности прекращения импорта пестицидов и действующих веществ для их производства из недружественных стран актуальным становится разработка элементов защиты зерновых культур на основе пестицидов и агрохимикатов преимущественно отечественного производства.

Применение баковых инсектофунгицидных смесей пестицидов и агрохимикатов выступает в качестве важнейшего приема повышения биологической, экономической и экологической эффективности интегрированной защиты озимой

пшеницы. Правильно подобранные и приготовленные смеси обладают рядом достоинств: имеют широкий спектр действия против комплекса вредных организмов, позволяют объединить защитные обработки с приемами по уходу за посевами (в результате достигается повышение производительности труда, экономия ГСМ, уменьшение общего расхода воды, времени и себестоимости работ), замедляют появление резистентности вредных организмов к применяемым препаратам, снижают пестицидную нагрузку на обрабатываемую площадь и затраты на дорогостоящие пестициды за счет сокращения нормы применения препаратов благодаря синергетическому эффекту, сокращают кратность обработок, уменьшают механическое повреждение культуры и предотвращают

переуплотнение почвы, сократив число выездов техники в поле. При этом неправильно составленные и приготовленные баковые смеси пестицидов могут привести к ряду нежелательных последствий: изменению физико-химических свойств компонентов, увеличению токсичности по отношению к культурным растениям [1–10].

Цель работы – повысить эффективность защиты озимой пшеницы от вредителей и болезней, урожайность и качество зерна путем применения баковых смесей новых пестицидов и агрохимикатов преимущественно отечественного производства.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели в мелкоделяночных опытах в условиях лесостепи Центрального Черноземья на опытных полях УНТЦ “Агротехнология” Воронежского ГАУ в посевах озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Краса Дона. Предшественник – черный пар. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднесуглинистый с содержанием гумуса 4.6%, pH 5.6–5.9 ед. Способ посева озимой пшеницы – обычный рядовой, глубина посева – 4–5 см, норма высева – 5 млн шт./га. Размер делянок в опытах – 30 м², повторность – четырехкратная, размещение делянок рендомизированное [11]. Ранней весной была проведена подкормка озимой пшеницы аммиачной селитрой N35 по мерзло-талой почве. В фазе кущения культуры проведена обработка против двудольных сорняков гербицидом Примадонна Супер, ККР (0.75 л/га).

Опрыскивание посевов озимой пшеницы баковыми инсектофунгицидными смесями индивидуально и с микроудобрением проведено однократно при наступлении фазы колошения ранцевым опрыскивателем “Solo 425” с 1.5 м штангой, расход рабочей жидкости – 300 л/га. В схему опытов входило изучение баковых инсектофунгицидных смесей препаратов Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс индивидуально и в сочетании с микроудобрением Биостим Зерновой. Для контроля инсектофунгицидного действия использовали баковую смесь препаратов Восторг + Цериакс Плюс, изученную ранее. Характеристика препаратов: 1 – Восторг, КС (ООО “Интер Групп”, ООО ТД “Кирово-Чепецкая Химическая Компания”) – химический инсектицид, состоящий из клотианидина 140 г/л + лямбда-цигалотрина 100 г/л; 2 – Цериакс Плюс, КЭ (ООО “БАСФ”) – химический фунгицид, пираклостробин 66.6 г/л + флукаспироксад 41.6 г/л + эпоксиконазол 41.6 г/л; 3 – Спарринг, МД (АО “Щелково Агрохим”) – химический инсектицид, тиаметоксам 150 г/л + фипронил 90 г/л; 4 – Эйс, ККР (АО “Щелково Агрохим”) – химический

фунгицид, пираклостробин 80 г/л + протиоконазол 40 г/л + тебуконазол 160 г/л; 8 – Клонрин, КЭ (АО “ФМРус”, ООО “Агрохиминвест”) – химический инсектицид, клотианидин 150 г/л + зетаациперметрин 100 г/л; 9 – Элатус Эйс, КЭ (ООО “Сингента”) – химический фунгицид, бензовиндифлупир 40 г/л + пропиконазол 250 г/л; 10 – Биостим Зерновой, Ж (АО “Щелково Агрохим”) – микроудобрение, свободные аминокислоты растительного происхождения – 91.0 г/л, азот общий – 71.5, фосфор – 52.0, калий – 52.0, магний – 26.0, сера – 32.5, железо – 3.9, марганец – 9.1, цинк – 7.8, медь – 5.2, бор – 2.6, молибден – 0.26 г/л, кобальт – 0.13 г/л.

Учеты вредителей были проведены непосредственно перед обработкой, на 3-и, 7-е и 14-е сут после обработки. Учет красногрудой пьявицы (*Oulema melanopus* L.) был проведен путем подсчета личинок всех возрастов на верхних листьях 10-ти соседних стеблей в 10-ти точках каждой повторности. Учет личинок и имаго обыкновенной злаковой тли (*Schizaphis graminum* Rond.) и большой злаковой тли (*Sitobion avenae* F.) проводили путем подсчета на 25-ти колосьях (5 проб по 5 колосьев) в каждой повторности. Учет пшеничного трипса (*Haplothrips tritici* Kurd.) был проведен в лаборатории путем подсчета на 25-ти срезанных колосьях в каждой повторности, помещенных в матерчатый мешочек с эфиром. Учет личинок и имаго клопа вредная черепашка (*Eurygaster integriceps* Puton) проводили на 10-ти площадках размером 0.1 м² (32 × 32 см) в каждой повторности опыта [12].

Учеты пораженности болезнями были проведены перед обработкой и через 10 и 20 сут после нее на 25-ти растениях (5 проб по 5 растений) с каждой делянки. Были проанализированы все листья на главном стебле. Все учеты проведены согласно методическим указаниям. Степень поражения мучнистой росой (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal.) определяли по шкале Захаровой, септориозом листьев (*Septoria tritici* Rob. ex Desm.) – по шкале Джеймса. Развитие листостебельных болезней при учете (в %) вычисляли по формуле: $R = \sum(a \times d) / N$, где R – развитие болезни, %, $(a \times d)$ – сумма произведений числа больных растений (a) на соответствующий им процент поражения (d), N – общее количество учтенных растений (здоровых и больных).

Расчет биологической эффективности фунгицидов и инсектицидов проводили по формуле Аббота: $\mathcal{E} = 100 \times (K - O) / K$, где $\mathcal{E}$ – биологическая эффективность, %, K – число живых особей в контроле в данный срок учета для инсектицидов или развитие болезни в контроле для фунгицидов, O – число живых особей в опытном варианте в данный срок учета для инсектицидов или развитие болезни в опытном варианте после обработки для фунгицидов [13].

Анализ структуры урожая проводили в пробных снопах (25 растений) с каждой делянки. Качество зерна оценивали по системе показателей в соответствии с требованиями российских ГОСТов [14]. Уборка урожая зерна озимой пшеницы в опытах проведена поделочно селекционным комбайном SR2010 Terrion Sampo. Статистическая обработка данных выполнена методом дисперсионного анализа с использованием прикладных программ.

Погодные условия вегетационных периодов 2022 и 2023 гг. несколько различались. Апрель в 2022 и 2023 гг. выдался влажным, осадков выпало больше среднемноголетней нормы. Более теплым был апрель 2022 г., температура воздуха оказалась выше среднемноголетних показателей. В апреле 2023 г. теплой была лишь 1-я декада, а 2-я и 3-я декады – холодными. Май 2023 г. отметился холодной погодой с небольшим количеством осадков, май 2022 г. также выдался холодным, но осадков выпало даже чуть больше среднемноголетней нормы. Июнь 2023 г. отмечен очень дождливой прохладной погодой, а июнь 2022 г., наоборот, выдался жарким и засушливым. В июле 2022 и 2023 гг. стояла прохладная дождливая погода.

Таким образом, особенно значительные различия в погодных условиях наблюдали в июне 2022 и 2023 гг., что обусловило разницу в развитии листостебловых болезней озимой пшеницы. В 2023 г. условия оказались более благоприятными для развития мучнистой росы (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal.) и бурой листово-ржавчины (*Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici*) особенно на восприимчивых сортах. Развитие септориоза листьев озимой пшеницы (*Septoria tritici* Rob. ex Desm.) в 2023 г. также было более высоким. Однако в 2023 г. из-за прохладных дождливых условий отмечена более низкая численность таких вредителей, как клоп вредная черепашка (*Eurygaster integriceps* Puton), красногрудая пядица (*Oulema melanopus* L.), хлебный жук кузья (*Anisoplia austriaca* Herbst.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В опыте с озимой мягкой пшеницей (*Triticum aestivum* L.) сорта Краса Дона после черного пара изучали влияние опрыскивания посевов баковыми инсектофунгицидными смесями Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс индивидуально и в сочетании с микроудобрением Биостим Зерновой на пораженность листостебельными инфекциями, на формирование урожайности и качества зерна.

В лабораторных условиях при проверке на совместимость компонентов баковых смесей отрицательных реакций (выпадения осадка, расслаивания раствора, излишнего пенообразования, изменения

цвета раствора, образования геля и тому подобного) не отмечено.

Опрыскивание озимой пшеницы в фазе колошения баковыми смесями Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс обеспечило высокую эффективность против вредителей. Через 14 сут после обработки в среднем за 2 года исследования гибель видов злаковых тлей (обыкновенной злаковой тли (*Schizaphis graminum* Rond.) и большой злаковой тли (*Sitobion avenae* F.)) составила 96.5–99.1%, пшеничного трипса (*Haplothrips tritici* Kurd.) – 98.5–100, личинок красногрудой пядицы (*Oulema melanopus* L.) и клопа вредная черепашка (*Eurygaster integriceps* Puton) – 100% по отношению к контролю, что было на уровне индивидуального применения препаратов Спарринг и Клонрин при численности вредителей в контроле соответственно 13.0 (при заселенности колосьев 56%) и 8.0 экз./колос, 0.6 экз./стебель и 0.7 шт./м² (табл. 1).

По отношению к эталону (Восторг + Цериакс Плюс) инсектицидная активность баковых смесей Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс была несколько выше против видов злаковых тлей на 6.8 и 4.2% соответственно, пшеничного трипса – на 4.8 и 3.3%, личинок красногрудой пядицы – на 5.0%, против клопа вредная черепашка эффективность была на уровне эталона.

Добавление микроудобрения Биостим Зерновой не влияло на инсектицидную активность изученных баковых смесей Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс.

Фунгицидная активность баковой смеси Спарринг + Эйс на 20-е сут после обработки в среднем за 2 года исследования составила против септориоза листьев озимой пшеницы (*Septoria tritici* Rob. ex Desm.) 87.0%, что было на 8% больше уровня применения эталона смеси Восторг + Цериакс Плюс (79.0%) при развитии болезни в контроле 30.0% (табл. 2).

Фунгицидная активность баковой смеси Клонрин + Элатус Эйс на 20-е сут после обработки составила против септориоза листьев озимой пшеницы 78.3%, что было на уровне применения эталона смеси Восторг + Цериакс Плюс, но меньше изученной баковой смеси Спарринг + Эйс на 8.7%. Против мучнистой росы (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal.) эффективность изученных баковых смесей составила 90.5–88.1% и соответствовала уровню эталона при развитии болезни в контроле 8.4%.

Добавление микроудобрения Биостим Зерновой не влияло на эффективность баковых смесей против септориоза листьев и мучнистой росы.

В среднем за 2 года исследования во всех вариантах опыта получены прибавки урожая зерна озимой пшеницы от 3.8 до 13.6 ц/га по отношению к контролю (табл. 3).

Таблица 1. Биологическая эффективность баковых инсектофунгицидных смесей индивидуально и с микроудобрением против вредителей озимой пшеницы сорта Краса Дона (среднее за 2022–2023 гг.)

Вариант	Норма применения, л/га	Биологическая эффективность, %			
		виды злаковых тлей	пшеничный трипс	личинки красногрудой пьявицы	клоп вредная черепашка
Контроль (без обработки)*	—	13.0	8.0	0.6	0.7
Восторг, КС + Цериакс Плюс, КЭ (эталон)	0.15 + 0.5	92.3	95.2	95.0	100
Спарринг, МД	0.15	98.5	99.4	100	100
Эйс, ККР	0.6	—	—	—	—
Спарринг, МД + Эйс, ККР	0.15 + 0.6	99.1	100	100	100
Спарринг, МД + Эйс, ККР + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + 0.6 + 1.2	100	100	100	100
Клонрин, КЭ	0.15	96.1	98.1	100	100
Элатус Эйс, КЭ	0.5	—	—	—	—
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ	0.15 + 0.5	96.5	98.5	100	100
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + 0.5 + 1.2	96.5	98.5	100	100

* Абсолютные показатели численности злаковых тлей, трипсов – шт./колос, личинок красногрудой пьявицы – шт./стебель, клопа вредная черепашка – экз./м².

Таблица 2. Биологическая эффективность баковых инсектофунгицидных смесей индивидуально и с микроудобрением против болезней озимой пшеницы сорта Краса Дона (среднее за 2022–2023 гг.)

Вариант	Норма применения, л/га	Мучнистая роса		Септориоз листьев	
		R	БЭ	R	БЭ
Контроль (без обработки)	—	8.4	—	30.0	—
Восторг, КС + Цериакс Плюс, КЭ (эталон)	0.15 + 0.5	1.0	88.1	6.3	79.0
Спарринг, МД	0.15	—	—	—	—
Эйс, ККР	0.6	0.9	89.3	4.0	86.7
Спарринг, МД + Эйс, ККР	0.15 + 0.6	0.8	90.5	3.9	87.0
Спарринг, МД + Эйс, ККР + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + 0.6 + 1.2	0.8	90.5	3.9	87.0
Клонрин, КЭ	0.15	—	—	—	—
Элатус Эйс, КЭ	0.5	1.0	88.1	6.7	77.7
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ	0.15 + 0.5	1.0	88.1	6.5	78.3
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + 0.5 + 1.2	0.9	89.3	6.3	79.0

Примечание. R – развитие болезни, %, БЭ – биологическая эффективность, %.

Таблица 3. Влияние баковых инсектофунгицидных смесей индивидуально и с микроудобрением на урожайность озимой пшеницы сорта Краса Дона

Вариант	Норма применения, л/га	2022 г.		2023 г.		Средняя	
		Урожайность	Прибавка урожая	Урожайность	Прибавка урожая	Урожайность	Прибавка урожая
		ц/га					
Контроль (без обработки)	—	45.4	—	69.3	—	57.4	—
Восторг, КС + Цериакс Плюс, КЭ (эталон)	0.15 + 0.5	53.7	8.3	77.3	8.0	65.5	8.1
Спарринг, МД	0.15	51.5	6.1	75.0	5.7	63.2	5.8
Эйс, ККР	0.6	49.2	3.8	73.5	4.2	61.4	4.0
Спарринг, МД + Эйс, ККР	0.15 + 0.6	55.5	10.1	78.0	8.7	66.8	9.4
Спарринг, МД + Эйс, ККР + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + 0.6 + 1.2	58.8	13.4	83.3	14.0	71.0	13.6
Клонрин, КЭ	0.15	51.5	6.1	74.5	5.2	63.0	5.6
Элатус Эйс, КЭ	0.5	49.2	3.8	73.3	4.0	61.2	3.8
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ	0.15 + 0.5	54.7	9.3	77.6	8.3	66.2	8.8
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + 0.5 + 1.2	58.2	12.8	82.4	13.1	70.3	12.9
НСР ₀₅		2.0	—	3.3	—	—	—

Добавление к изученным баковым смесям микроудобрения Биостим Зерновой повышало урожайность озимой пшеницы на 4.1–4.2 ц/га, что позволило получить в данных вариантах опыта наибольшие прибавки урожая зерна 12.9–13.6 ц/га по отношению к контролю.

При обработке посевов озимой пшеницы в фазе колошения инсектофунгицидными смесями Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс индивидуально и в сочетании с микроудобрением Биостим Зерновой формировалось более крупное зерно, в среднем за 2 года исследования масса 1000 зерен в данных вариантах была больше по отношению к контролю на 3.2–4.1 г (табл. 4).

Обработка посевов озимой пшеницы в фазе колошения баковыми инсектофунгицидными смесями индивидуально и с микроудобрением также повышала содержание сырой клейковины в зерне на 2.1–3.4% по отношению к контролю. Улучшалось и качество клейковины: если в контроле она относилась к группе “удовлетворительная слабая”

(ИДК = 94.1 ед.), то в вариантах с обработкой баковыми смесями индивидуально и с микроудобрением она была “хорошей” (ИДК = 72.5–73.9 ед.).

ВЫВОДЫ

1. Применение инсектофунгицидных баковых смесей Спарринг + Эйс и Клонрин + Элатус Эйс индивидуально и с микроудобрением Биостим Зерновой в посевах озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Краса Дона обеспечило высокую биологическую эффективность против видов злаковых тлей (обыкновенной злаковой тли (*Schizaphis graminum* Rond.) и большой злаковой тли (*Sitobion avenae* F.)), пшеничного трипса (*Haplothrips tritici* Kurd.), личинок красногрудой пьяницы (*Oulema melanopus* L.) и клопа вредная черепашка (*Eurygaster integriceps* Puton), мучнистой росы (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal.) и септориоза листьев (*Septoria tritici* Rob. ex Desm.). Инсектицидная активность баковых смесей составляла 96.5–100, фунгицидная – 78.3–90.5%.

Таблица 4. Влияние баковых инсектофунгицидных смесей индивидуально и с микроудобрением на качество зерна озимой пшеницы сорта Краса Дона

Вариант	Норма применения, л/га	Масса 1000 зерен, г			Содержание сырой клейковины, %			ИДК, ед.
		2022 г.	2023 г.	средняя	2022 г.	2023 г.	среднее	среднее за 2022–2023 гг.
Контроль (без обработки)	–	39.3	39.5	39.4	20.4	20.0	20.2	94.1
Восторг, КС + Цериакс Плюс, КЭ – эталон	0.15 + + 0.5	42.9	42.0	42.4	22.4	22.0	22.2	74.4
Спарринг, МД	0.15	41.6	41.0	41.3	21.9	21.3	21.6	74.8
Эйс, ККР	0.6	40.7	40.5	40.6	22.2	21.0	21.6	83.8
Спарринг, МД + Эйс, ККР	0.15 + + 0.6	43.3	42.3	42.8	22.8	22.0	22.4	73.9
Спарринг, МД + Эйс, ККР + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + + 0.6 + + 1.2	44.0	43.0	43.5	24.2	23.0	23.6	73.0
Клонрин, КЭ	0.15	41.5	40.8	41.2	22.1	21.5	21.8	75.0
Элатус Эйс, КЭ	0.5	40.4	40.3	40.4	21.7	21.5	21.6	83.2
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ	0.15 + + 0.5	43.0	42.1	42.6	22.4	22.2	22.3	73.6
Клонрин, КЭ + Элатус Эйс, КЭ + Биостим Зерновой, Ж	0.15 + + 0.5 + + 1.2	43.6	42.8	43.2	23.5	23.5	23.5	72.5
НСР ₀₅		0.5	0.6	–	1.0	0.9	–	–

2. Опрыскивание посевов баковыми инсектофунгицидными смесями индивидуально и с микроудобрением способствовало существенному увеличению урожайности озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Краса Дона. Наибольшие прибавки урожая зерна 12.9 и 13.6 ц/га получены в вариантах с обработкой смесями Спарринг + Эйс + Биостим Зерновой и Клонрин + Элатус Эйс + Биостим Зерновой.

3. Применение изученных баковых смесей индивидуально и с микроудобрением повысило качество зерна озимой пшеницы: увеличилось содержание сырой клейковины на 2.1–3.4% по отношению к контролю, улучшилось качество клейковины: если в контроле она относилась к группе “удовлетворительная слабая” (ИДК = 94.1 ед.), то в вариантах с обработкой баковыми смесями индивидуально и с микроудобрением она была “хорошей” (ИДК = 72.5–73.9 ед.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доронин В.Г., Ледовский Е.Н., Пахотина И.В., Молод Я.Ф. Биологическая эффективность баковых смесей препаратов для защиты яровой пшеницы и их влияние на качество зерна // Агрохимия. 2023. № 9. С. 42–49.
2. Молод Я.Ф., Еришов В.Л. Эффективность защиты посевов яровой мягкой пшеницы от листостеблевых инфекций в южной лесостепи // Итоги и перспективы развития Сибирского земледелия: мат-лы Всерос. (национальной) научн.-практ. конф. с международ. участием, посвящ. 105-летию агроном. (агротехнолог.) фак-та и 75-летию д-ра с.-х.-наук, проф. Рендова Н.А. Омск: Омский ГАУ, 2023. С. 132–135.
3. Власова Л.М., Попова О.В. Баковые смеси инсектицидов, фунгицидов и микроудобрений в посевах зерновых культур // Защита и карантин раст. 2023. № 5. С. 13–16.

4. Ледовский Е.Н., Доронин В.Г. Фунгициды и баковые смеси с удобрениями в посевах яровой пшеницы на юге Западной Сибири // Тавр. Вестн. аграр. науки. 2022. № 3(31). С. 56–65.
5. Торопова Е.Ю., Казакова О.А., Пискарев В.В., Порсев И.Н., Христов Ю.А. Роль сортов и фунгицидов в контроле септориоза яровой пшеницы // Агрохимия. 2019. № 5. С. 66–75.
6. Гарипова Г.Н., Сахибгареев А.А. Роль химических, биологических препаратов и удобрений в повышении урожая зерновых культур в степных зонах Башкортостана // Зерн. хоз-во России. 2016. № 2. С. 47–54.
7. Глуховцев В.В., Кукушкина Л.А., Дёмина Е.А. Стимуляторы роста в современных технологиях возделывания яровой пшеницы // Усп. совр. науки. 2015. № 5. С. 19–21.
8. Усольцев Ю.А., Косова В.Н. Вредоносность листовых заболеваний яровой пшеницы и ячменя и эффективность некоторых химических препаратов в борьбе с ними // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. ст. по мат-лам V Всерос. (нац.) научн.-практ. конф. Курган: КурганГСХА, 2021. С. 127–133.
9. Усольцев Ю.А., Косова В.Н. Использование фунгицидов и ростовых веществ против заболеваний ярового ячменя // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. ст. по мат-лам V Всерос. (нац.) научн.-практ. конф. Курган: КурганГСХА, 2021. С. 134–139.
10. Илларионов А.И., Женчук А.В. Эффективность баковых смесей пестицидов и агрохимикатов при интегрированной защите озимой пшеницы от вредных организмов // Вестн. ВоронежГАУ. 2019. Т. 12. № 1(60). С. 13–23.
11. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
12. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2004. 321 с.
13. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 378 с.
14. ГОСТ Р 54478-2011 Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. М.: Стандартинформ, 2012. 19 с.

Biological Effectiveness of Tank Mixtures of Pesticides and Micronutrients in the Protection of Winter Wheat and Their Effect on Grain Yield and Quality

L. M. Vlasova^{a, #}, O. V. Popova^a

^aAll-Russian Scientific Research Institute of Plant Protection,
VNIIS 92, Ramonsky district, Voronezh Region 396030, Russia

[#]E-mail: mihailovna-87lud@mail.ru

The effectiveness of protecting winter wheat from pests and diseases, yield and grain quality were studied by using tank mixtures of new pesticides and agrochemicals, mainly of domestic production. The study was conducted in small-scale experiments in the conditions of the forest-steppe of the Central Chernozem region in crops of winter soft wheat (*Triticum aestivum* L.) of the Krasa Dona variety. The size of plots in the experiments is 30 m², the repeatability is fourfold, the placement of plots is randomized. Tank insectofungicidal mixtures of Sparring + Ace and Klonrin + Elatus Ace individually and in combination with micronutrient Biostim Zernovoy were studied. To control the insectofungicidal effect, a tank mixture of Vostorg + Ceriax Plus, studied earlier, was used. Application of insectofungal tank mixtures Sparring + Ace and Klonrin + Elatus Ace individually and with micro-fertilization of Biostim Zernovoy in winter soft wheat crops of the Krasa Dona variety provided high biological efficacy against a complex of pests and diseases. The insecticidal activity of tank mixtures was 96.5–100, fungicidal – 78.3–90.5%. Spraying of winter wheat with tank insectofungicidal mixtures individually and with micro-fertilization contributed to a significant increase in the yield of winter soft wheat. The largest grain yield increases of 12.9 and 13.6 c/ha were obtained in variants with Sparring + Ace + Biostim Zernovoy and Klonrin + Elatus Ace + Biostim Zernovoy combinations. The use of the studied tank mixtures individually and with micro-fertilization increased the quality of winter wheat grain: the content of crude gluten increased by 2.1–3.4% relative to the control, and its quality improved.

Keywords: winter soft wheat, integrated protection, tank insectofungicide mixtures, micro fertilizers, pests, diseases, effectiveness.

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ИЗВЕСТКОВАНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ДОЛОМИТОВОЙ МУКОЙ НА МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ

© 2024 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия

²Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

В многолетнем прецизионном микрополевым эксперименте изучено влияние известкования кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой (ДМ, диапазон доз 0–2.0 H_r , 9-й год последействия) на реакцию почвы, содержание подвижных соединений Zn, Cu, Mn, Fe, Cd, Pb в почве и микроэлементный состав растений ячменя (*Hordeum* L.). Выявлено, что наиболее чувствительными к изменению кислотно-основных свойств почвы были Zn и Mn, содержание которых в органах растений ячменя достоверно линейно уменьшалось в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r . Существенным было последействие даже минимальной дозы ДМ (0.2 H_r). Наблюдали тенденцию к снижению содержания Fe в соломе и колосе растений ($r = -0.572$ и -0.570 соответственно) в указанном диапазоне доз. Полученные данные подтвердили, что известкование может приводить к увеличению содержания Cd в зерновых культурах: в интервале доз ДМ 0.8–2.0 H_r увеличение содержания элемента в колосе по отношению к контрольному варианту опыта достигало 1.6–2.0 раза, а в соломе – линейно возрастало в интервале доз ДМ 0–1.0 H_r ($r = 0.945$). Содержание Cu и Pb в растениях ячменя слабо зависело от дозы известкового мелиоранта.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, известкование, доломитовая мука, последействие, растения ячменя, микроэлементный состав растений, реакция почвы.

DOI: 10.31857/S0002188124090059, **EDN:** CCTVSI

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая задача сельскохозяйственного производства – сбалансированный и безопасный элементный состав продукции растениеводства и животноводства, одним из инструментов достижения которой на кислых почвах является применение известковых мелиорантов. Такой прием повышения плодородия кислых почв, как известкование, имеет ряд специфических особенностей, определяющих его влияние на кислотно-основные свойства почвы и элементный состав сельскохозяйственных культур. Известно [1], что действие известкового мелиоранта может проявляться в течение 15–20 лет и более. При внесении повышенных доз доломитовой муки (2.0 и 2.5 H_r) нейтрализующее действие мелиоранта наблюдали даже через 32 года после внесения [2].

В процессе взаимодействия известковых мелиорантов с почвой, помимо нейтрализации почвенной кислотности и насыщения почвенного поглощающего комплекса основаниями, происходит усиление конкурентных взаимодействий между Ca,

Mg и их химическими аналогами, приводя к изменению элементного состава почвенного раствора и растений. Степень и продолжительность воздействия на систему почва–растение определяется дозой, нейтрализующей способностью и фракционным составом мелиоранта, составом и свойствами почвы [3, 4].

Изменение реакции почвы и насыщения ППК кальцием и магнием при известковании кислых почв может приводить к существенному снижению содержания химических элементов в культурных растениях, к дефициту необходимых для растений и человека микроэлементов, что можно рассматривать как дополнительный фактор риска здоровью населения, особенно при низком фоновом содержании эссенциальных микроэлементов в почве [4]. Известно [5], что дефицит микронутриентов в питании современного человека – это объективная реальность, которая проявляется независимо от качества и количества потребляемой пищи. Известно также [6], что в таежно-лесной нечерноземной зоне реакции живых организмов обусловлены

недостатком кальция, фосфора, кобальта (73% всех почв), меди (70%), йода (80%), молибдена (53%), бора (50%), цинка (49%), оптимальным содержанием марганца (72%), относительным избытком особенно в поймах рек стронция (15%). Влияние известкования на элементный состав растений существенно зависит также от почвенно-климатических условий и видовых и сортовых особенностей растений, определяющих интенсивность накопления химических элементов, распределение их в органах растений, отношение к реакции среды.

Цель работы – в условиях многолетнего микрополевого эксперимента изучить влияние последствия доломитовой муки (ДМ) в широком диапазоне доз на микроэлементный состав (Zn, Cu, Mn, Fe, Cd и Pb) растений ячменя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в условиях многолетнего микрополевого прецизионного (без повторностей) опыта, заложенного на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в Меньковском филиале Агрофизического института (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) в полиэтиленовых сосудах без дна ($S = 1 \text{ м}^2$, глубина – 25 см, $\approx 300 \text{ кг}$ почвы/сосуд) в мае 2012 г. [7, 8].

Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда площадью 1 м^2) была вынута почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру

делянок размещали полиэтиленовые сосуды без дна, которые наполняли кислой легкосуглинистой дерново-подзолистой почвой с показателями: pH 4.6 ед., $H_{\text{г}}$ – 3.96, сумма обменных оснований – 0.87 ммоль/100 г. Схема опыта, варианты: 1 – контроль (фон NPK), 2 – фон + ДМ 0.2 $H_{\text{г}}$, 3 – фон + ДМ 0.3 $H_{\text{г}}$, 4 – фон + ДМ 0.4 $H_{\text{г}}$, 5 – фон + ДМ 0.5 $H_{\text{г}}$, 6 – фон + ДМ 0.6 $H_{\text{г}}$, 7 – фон + ДМ 0.7 $H_{\text{г}}$, 8 – фон + ДМ 0.8 $H_{\text{г}}$, 9 – фон + ДМ 0.9 $H_{\text{г}}$, 10 – фон + ДМ 1.5 $H_{\text{г}}$. Размещение делянок систематическое, 2-рядное. Доза доломитовой муки (CaCO_3 50.4% + MgCO_3 48.9%) по 1 $H_{\text{г}}$ составила 5.54 т/га. Ежегодно вносили минеральные удобрения (АзФК, суммарная за 2012–2020 гг. доза – N604P484K414).

На 9-й год взаимодействия ДМ с почвой (2020 г.) выращивали ячмень (*Hordeum L.*) сорта Ленинградский до фазы колошения. Почвенные пробы были отобраны до посева, результаты их аналитических испытаний (pH_{KCl} почвы и содержания подвижных соединений тестируемых химических элементов) представлены в табл. 1.

Аналитические исследования выполнены сотрудниками испытательной лаборатории Агрофизического института. Содержание цинка, меди, марганца, железа, кадмия и свинца в почве и растениях ячменя определяли атомно-абсорбционным методом после мокрого озоления, pH_{KCl} почвы – потенциометрическим методом. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7.5.

Таблица 1. Реакция почвы и содержание подвижных соединений микроэлементов в почве (через 9 лет после внесения доломитовой муки)

Вариант	Показатели							
	pH _{KCl}	$H_{\text{г}}$ ммоль/100 г	Zn	Cu	Cd	Pb	Mn	Fe
			мг/кг (экстрагент – ААБ pH 4.8)					
1. Контроль	4.2	5.0	0.79	0.15	0.02	0.18	22.0	24.6
2. ДМ 0.2	4.4	4.3	0.51	0.12	0.02	0.13	15.5	19.2
3. ДМ 0.3	4.6	3.7	0.43	0.14	0.02	0.17	13.9	15.1
4. ДМ 0.4	4.6	3.8	0.96	0.16	0.03	0.18	13.5	14.1
5. ДМ 0.5	5.0	3.3	0.39	0.15	0.02	0.12	9.6	9.7
6. ДМ 0.6	4.9	3.3	0.33	0.17	0.02	0.05	11.1	10.8
7. ДМ 0.7	5.1	3.0	0.26	0.08	0.02	0.02	9.6	9.2
8. ДМ 0.8	5.2	2.8	0.32	0.18	0.02	<0.01	9.6	8.4
9. ДМ 0.9	5.2	2.8	0.32	0.11	0.03	<0.01	10.4	9.4
10. ДМ 1.0	5.9	1.7	0.24	0.22	0.01	<0.01	7.5	6.0
11. ДМ 1.5	6.0	1.6	0.22	0.16	0.02	<0.01	8.2	5.8
12. ДМ 2.0	6.4	1.1	0.15	0.12	<0.01	0.02	8.8	5.4

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты многолетнего микрополевого эксперимента свидетельствовали о длительном последствии известкования дерново-подзолистой почвы на элементный состав сельскохозяйственных культур. В зависимости от дозы известкового мелиоранта, генетически обусловленных особенностей растений и свойств химических элементов возможен широкий диапазон варьирования эффектов [7, 9–11].

Установлено, что наиболее чувствительными к изменению кислотно-основных свойств почвы являются цинк и марганец: на 9-й год последствия ДМ содержание данных эссенциальных (жизненно необходимых) химических элементов в органах растений ячменя линейно зависело от дозы известкового мелиоранта (рис. 1).

По уменьшению содержания Zn (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: колос (36.0–13.0) > корни (14.0–8.0) > солома (7.6–0.2).

На 9-й год после внесения ДМ в дозе 1.0 H_r содержание Zn в колосе, соломе и корнях снизилось по отношению к контролю на 46, 77 и 29% соответственно, при увеличении дозы мелиоранта до 2.0 H_r различие составило 63, 97 и 39%. Установлено, что содержание Zn в колосе, соломе и корнях растений линейно снижалось в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r (коэффициенты корреляции $r = -0.899$, -0.895 , -0.750 соответственно, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576) (рис. 1, табл. 2).

В зависимости от дозы известкового мелиоранта убыль содержания Zn по отношению к контролю варьировалась в пределах: колос – 7–63, солома – 18–97, корни – 10–39%.

Выявлено, что внесение ДМ оказывало длительное последствие на содержание подвижных соединений Zn в почве: на 9-й год после внесения ДМ содержание элемента линейно снижалось ($r = -0.752$) в интервале величин pH 4.2–6.4 (табл. 1, 2). Наибольшую интенсивность указанного процесса наблюдали в интервале pH почвы 5.0–6.4 (интервал доз ДМ 0.5–2.0 H_r). Последствие доз ДМ 0.5 и 2.0 H_r привело к снижению содержания подвижных соединений цинка в почве по отношению к контролю на 51 и 81% соответственно (табл. 1).

Известно [12, 13], что растворимость и доступность растений соединений Zn возрастает с подкислением среды: минимальная растворимость элемента отмечена при pH 5.5–6.9, дальнейшее повышение pH ведет к увеличению его растворимости. Установлено [7, 14], что увеличение содержания Mg в почве и растениях при внесении ДМ оказывало более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca.

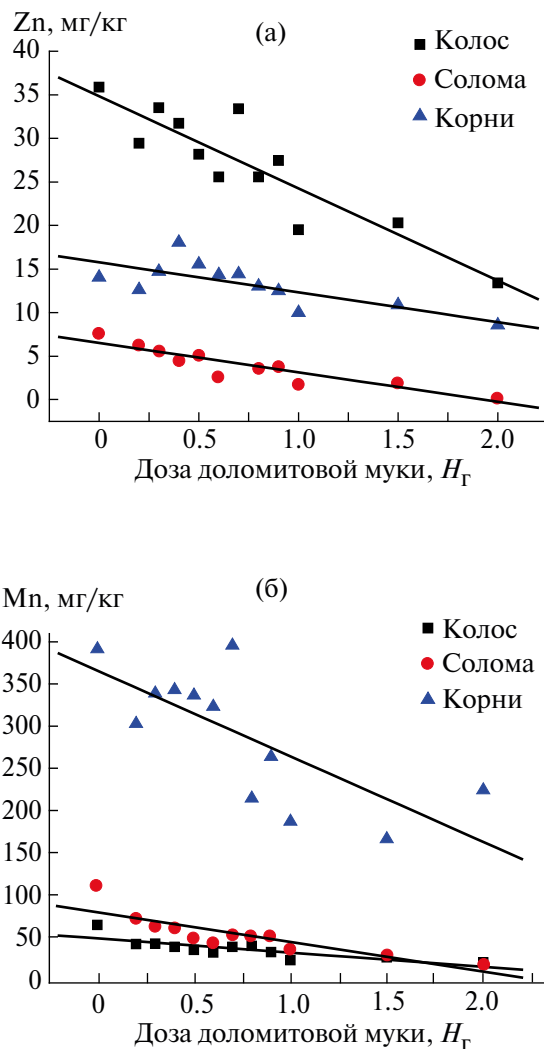


Рис. 1. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка и марганца в растениях ячменя.

Реакция почвенного раствора существенно влияет на подвижность Mn и Fe в почве и их доступность растениям, недостаток или избыток этих химических элементов негативно сказывается на процессах жизнедеятельности всех организмов [10, 12, 13].

Марганец относится к важнейшим для организма человека микроэлементам, является компонентом множества ферментов и выполняет в организме многочисленные функции, особенно выраженное действие Mn оказывает на инсулиновый обмен. На фоне недостатка Mn у практически здоровых людей может развиваться психоневрологическая симптоматика, напоминающая такие заболевания, как шизофрения и болезнь Паркинсона [15]. Дефицит Mn в кормах может вызывать патологические нарушения у животных [16].

Установлено, что известкование дерново-подзолистой почвы сопровождалось длительным

Таблица 2. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Zn, Mn, Cu, Fe и Cd в растениях ячменя от дозы доломитовой муки и реакции почвы в интервале доз 0–2.0 H_r (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости = 0.576)

Зависимость	Колос	Солома	Корни
Zn(f) = Доза ДМ	–0.899	–0.895	–0.750
Zn(f) = pH почвы	–0.915	–0.903	–0.930
Zn(f) = Zn _{подв} почвы	0.665	0.632	0.722
Mn(f) = Доза ДМ	–0.818	–0.841	–0.733
Mn(f) = pH почвы	–0.857	–0.869	–0.783
Mn(f) = Mn _{подв} почвы	0.902	0.945	0.633
Fe(f) = Доза ДМ	–0.572	–0.576	0.460
Fe(f) = pH почвы	–0.542	–0.587	0.410
Fe(f) = Fe _{подв} почвы	0.593	0.864	–0.212
Cu(f) = Доза ДМ	–0.260	–0.252	–0.406
Cu(f) = pH почвы	–0.334	–0.343	–0.380
Cu(f) = Cu _{подв} почвы	–0.583	–0.286	–0.271
Cd(f) = Доза ДМ	0.557	0.178	0.258
Cd(f) = pH почвы	0.573	0.270	0.346
Cd(f) = Cd _{подв} почвы	–0.405	0.165	–0.204
Pb(f) = Доза ДМ	0.226	–0.394	0.020
Pb(f) = pH почвы	0.232	–0.492	0.036
Pb(f) = Pb _{подв} почвы	0.340	–0.627	0.174

последствием, влияющим на содержание Mn в культурных растениях. Зависимость содержания Mn в колосе, соломе и корнях растений ячменя в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r по линейной модели характеризовалась коэффициентами корреляции $r = -0.818$, -0.841 и -0.733 соответственно (рис. 1, табл. 2). В отличие от цинка, максимальное содержание марганца отмечено в корнях растений (рис. 1). По уменьшению содержания Mn (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: корни (391–224) > солома (112–21) > колос (64–20).

В варианте 10 (доза ДМ 1.0 H_r) последствие мелиоранта привело к снижению содержания Mn по отношению к контролю в колосе, соломе и корнях на 65, 69 и 52% соответственно. Существенным было последствие даже минимальной дозы ДМ (0.2 H_r): по отношению к контролю содержание Mn в колосе и соломе снизилось на 35% (рис. 1).

Содержание подвижных соединений Mn и Fe в почве линейно снижалось в интервале величин pH 4.2–6.4 ($r = -0.802$ и -0.877 соответственно)

(табл. 1, 2). Наибольшую интенсивность указанного процесса наблюдали в интервале pH почвы 5.0–6.4 ед. Максимальное по отношению к контролю снижение содержания подвижных соединений указанных химических элементов составило: Mn – 66 (вариант 10), Fe – 78% (вариант 12) (табл. 1).

Железо преимущественно накапливалось в корнях растений (табл. 3). По убыванию среднего в вариантах содержания Fe (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: корни (2260 ± 470) > солома (75 ± 24) $\geq$ колос (75 ± 7).

В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r содержание Fe в соломе и колосе ячменя линейно убывало, в корнях наблюдали устойчивую тенденцию указанного эффекта (табл. 2, 3). Максимальное снижение по отношению к контролю содержания Fe в колосе составило 27% (доза ДМ 2.0 H_r), в соломе – 55% (доза ДМ 0.7 H_r).

Известно [10, 12, 13], что поглощение и перенос Fe в растительных органах во многом зависят от величины pH, окислительно-восстановительного

потенциала (Eh) почвы, содержания кальция и фосфора, а также соотношения некоторых тяжелых металлов в почвенном растворе. Основным следствием острого или хронического дефицита железа у человека является железодефицитная анемия [15]. Для профилактики дефицита железа ВОЗ рекомендует обогащать Fe пищевые продукты массового потребления, например, пшеничную муку [17].

Медь является жизненно важным для человека и животных элементом, который входит в состав витаминов, гормонов, ферментов, дыхательных пигментов, участвует в процессах обмена веществ, в тканевом дыхании и т.п. [15]. Большинство почв в достаточной степени обеспечено подвижной медью. Наименьшее количество подвижных соединений Cu характерно для дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв, а также многих торфяных почв [12].

Содержание подвижных соединений Cu в почве опыта (варианты 1–12) варьировалось в пределах 0.15 ± 0.04 мг/кг (табл. 1), что, согласно группировке почв по содержанию подвижных форм микроэлементов, определяемых в вытяжке ацетатно-аммонийного буферного раствора (рН 4.8) [18], соответствует низкому содержанию. Считается [13], что содержания Cu в почве <2 мг/кг неблагоприятны для большинства видов растений.

Корреляционная связь между содержанием подвижных соединений Cu в почве, дозой ДМ и реакцией почвы отсутствовала. Наблюдала тенденцию к снижению содержания Cu в растениях в интервале доз мелиоранта $0\text{--}2.0 H_r$ (табл. 2). Содержание Cu в органах растений ячменя можно характеризовать как равномерное, мг/кг: колос — 1.3 ± 0.3 , солома, корни — 1.5 ± 0.7 (табл. 3). Вероятно, отсутствие выраженного эффекта последействия известкования

на содержание Cu в растениях обусловлено низким содержанием элемента в почве.

Кадмий — один из самых опасных экотоксикантов внешней среды, в организм человека поступает в основном с продуктами растительного происхождения. Достоверные доказательства эссенциальности Cd для человека и животных отсутствуют. Это кумулятивный яд, который может вызывать острое и хроническое отравление [19–22].

Кадмий характеризуется как элемент высокой биологической доступности для растений. В отличие от большинства других тяжелых металлов, он способен накапливаться в генеративных органах (зерне) до опасных уровней концентраций. Содержание Cd в растениях зависит от его содержания в почве, физико-химических свойств почвы и видовых и сортовых особенностей растений. Реакция почвы, наряду с видовыми особенностями растений, считается одним из основных факторов, определяющих распределение Cd в системе почва–растение. По данным [23–26], известкование кислых почв может привести к загрязнению кадмием зерновых культур, даже при низком (кларковом) уровне содержания элемента в почве.

Содержание подвижных соединений Cd в почве опыта варьировалось в диапазоне 0.019 ± 0.007 мг/кг (коэффициент вариации $v = 37\%$). Минимальное содержание подвижного Cd в почве соответствовало величинам рН 5.9 и 6.4. Наблюдала тенденцию к снижению содержания подвижных соединений Cd в почве в интервале доз ДМ $0\text{--}2.0 H_r$ ($r = 0.465$ при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576) (табл. 1).

Таблица 3. Влияние последействия возрастающих доз ДМ на содержание Cu, Cd, Pb и Fe в растениях ячменя (через 9 лет после внесения мелиоранта), мг/кг абсолютно сухого вещества

Вариант	Колос				Солома				Корни			
	Cu	Cd	Pb	Fe	Cu	Cd	Pb	Fe	Cu	Cd	Pb	Fe
1. Контроль	1.3	0.09	0.6	88.6	1.5	0.06	1.0	128.8	1.3	0.14	<0.10	2400
2. ДМ $0.2 H_r$	1.1	0.06	1.0	75.3	3.6	0.09	1.3	106.2	1.4	0.21	1.31	1690
3. ДМ $0.3 H_r$	1.8	0.07	1.1	76.4	1.8	0.14	1.4	98.0	2.1	0.41	<0.10	2210
4. ДМ $0.4 H_r$	1.3	0.05	2.0	78.7	1.4	0.15	1.4	72.8	1.4	0.29	<0.10	2310
5. ДМ $0.5 H_r$	1.4	0.08	1.5	77.0	1.3	0.13	0.8	71.8	2.4	0.48	<0.10	1870
6. ДМ $0.6 H_r$	1.2	0.02	1.6	67.7	1.2	0.15	0.5	53.0	2.3	0.36	<0.10	2490
7. ДМ $0.7 H_r$	1.9	0.09	3.6	85.7	0.8	0.19	<0.1	52.1	1.7	0.48	0.55	1960
8. ДМ $0.8 H_r$	1.5	0.19	1.9	68.5	1.2	0.23	0.6	59.5	0.2	0.50	1.20	1680
9. ДМ $0.9 H_r$	1.3	0.14	2.0	67.0	1.3	0.24	<0.1	53.7	2.4	0.36	1.28	2870
10. ДМ $1.0 H_r$	0.8	0.14	1.7	71.6	1.0	0.21	<0.1	68.3	<0.1	0.38	0.71	2590
11. ДМ $1.5 H_r$	0.9	0.09	0.8	76.7	0.9	0.15	<0.1	68.6	0.9	0.36	0.54	1930
12. ДМ $2.0 H_r$	1.3	0.17	2.0	64.8	1.9	0.09	1.1	64.5	0.7	0.32	<0.10	3180

По убыванию содержания Cd (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: корни (0.36 ± 0.11) > солома (0.15 ± 0.06) > колос (0.1 ± 0.05) (табл. 3).

Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания Cd в органах растений ячменя от дозы ДМ и реакции почвы в интервале доз мелиоранта 0–2.0 H_r , представлены в табл. 2. Выявлено, что в интервале доз ДМ 0.8–2.0 H_r (рН_{KCl} почвы 5.2–6.4 ед. (табл. 1)) увеличение содержания Cd в колосе по отношению к контрольному варианту опыта достигало 1.6–2.0 раза (табл. 3). В соломе и корнях растений ячменя содержание Cd линейно возрастало в интервалах доз ДМ 0–1.0 H_r ($r = 0.945$) и 0–0.8 H_r ($r = 0.872$) соответственно, затем несколько снижалось (табл. 2, 3). Максимальное содержание Cd в колосе и корнях соответствовало дозе ДМ 0.8 H_r (рН почвы 5.2 ед. (табл. 1)). МДУ Cd для грубых и сочных кормов и зернофуража составляет 0.3 мг/кг [27].

Ранее в условиях данного эксперимента было установлено [4], что через 3 года после внесения ДМ в интервале доз 0–2.0 H_r содержание Cd в зерне ячменя сорта Ленинградский линейно возрастало ($r = 0.857$ при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576), при внесении ДМ в дозах 1.0 и 2.0 H_r содержание Cd в зерне превысило содержание в контроле в 5.4 и 10.0 раз соответственно.

Содержание подвижных соединений Pb в почве вариантов 1–12 (9-й год последействия ДМ) варьировалось в диапазоне 0.08 ± 0.07 мг/кг (коэффициент вариации $v = 88\%$) (табл. 1). Коэффициенты корреляции (r), характеризующие зависимости содержания подвижных соединений Pb в почве от дозы ДМ и реакции почвы (в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r), составили соответственно 0.744 и –0.783 (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости = 0.576) (табл. 2). Резкое снижение содержания подвижных соединений Pb наблюдали при рН почвы >5.0 ед., что соответствовало интервалу доз ДМ 0.6–2.0 H_r (табл. 1).

Известно [13], что при взаимодействии известковых мелиорантов с почвой растворимость Pb снижается: при высоких уровнях рН происходит его осаждение в виде гидроксида, фосфата, карбоната, а также создаются благоприятные условия для образования Pb-органических комплексов.

Свинец – канцероген и тератоген. Роль Pb в жизнедеятельности организма человека изучена недостаточно, однако известно, что он участвует в обменных процессах костной ткани, а основной путь поступления в организм – через желудочно-кишечный тракт [15]. Имеются данные о стимулирующем действии низких концентраций $Pb(NO_3)_2$ на рост растений [13]. Диапазон нормальных концентраций Pb в растениях (мг/кг

сухого вещества), варьируется в пределах 0.1–5.0 [28], МДУ Pb для грубых и сочных кормов и зернофуража составляет 5.0 мг/кг [27].

По убыванию среднего в вариантах содержания свинца (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд (табл. 3): колос (1.6 ± 0.8) > солома (0.7 ± 0.5) ≥ корни (0.5 ± 0.5).

В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r содержание Pb в колосе и соломе растений ячменя слабо зависело от дозы мелиоранта и реакции почвы, в корнях не зависело от указанных показателей (табл. 2). Однако следует отметить тесную положительную корреляционную связь ($r = 0.821$) между дозой ДМ и содержанием Pb в колосе в интервале доз 0–0.7 H_r (табл. 3), что соответствовало интервалу величин рН_{KCl} 4.2–5.1 (табл. 1). Известно [13], что некоторые факторы (например, низкий рН почв, низкое содержание P в почве, присутствие органических лигандов) способствуют поглощению Pb корнями или перемещению его в надземные органы растений.

В заключение следует отметить, что эффективность известкования как приема снижения поступления в культурные растения такого опасного экотоксиканта, как свинец, будет зависеть от физико-химических свойств почвы, гранулометрического состава и уровня ее плодородия, дозы известкового мелиоранта и продолжительности его взаимодействия с почвой, а также в значительной степени – от видовых и сортовых особенностей растений.

ВЫВОДЫ

Известкование кислых дерново-подзолистых почв оказывало длительное последствие на микроэлементный состав сельскохозяйственных культур. Эффект зависел от дозы и продолжительности контакта известкового мелиоранта с почвой, видовых особенностей растений и свойств химических элементов. От свойств химических элементов существенно зависело также их распределение в органах растений.

В условиях многолетнего микрополевого эксперимента установлен выраженный эффект длительного последствия доломитовой муки (ДМ) через 9 лет после внесения мелиоранта на элементный состав растений ячменя. Выявлено, что из тестируемых микроэлементов (Zn, Cu, Mn, Fe, Cd, Pb) наиболее чувствительными к изменению кислотно-основных свойств почвы были Zn и Mn, содержание которых в органах растений ячменя достоверно линейно снижалось в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r , существенным было последствие даже минимальной дозы ДМ (0.2 H_r). На 9-й год после внесения ДМ в дозе 1.0 H_r содержание в колосе, соломе и корнях цинка снизилось по отношению

к контролю на 46, 77 и 29% соответственно, марганца — на 65, 69 и 52%.

Достоверного влияния последствия доломитовой муки на содержание Си в растениях ячменя не выявлено. Содержание элемента в органах растений можно характеризовать как равномерное: в колосе — 1.3 ± 0.3 , соломе, корнях — 1.5 ± 0.7 мг/кг.

Железо преимущественно накапливалось в корнях растений ячменя. В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r наблюдали тенденцию к снижению содержания Fe в соломе и колосе ($r = -0.572$ и -0.570 соответственно, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576). Максимальное снижение по отношению к контролю содержания Fe в колосе составило 27% (доза ДМ 2.0 H_r), в соломе — 55% (доза ДМ 0.7 H_r).

Полученные данные подтвердили, что известкование может приводить к увеличению содержания Cd в зерновых культурах: в интервале доз ДМ 0.8–2.0 H_r увеличение содержания элемента в колосе по отношению к контрольному варианту опыта достигало 1.6–2.0 раза, а в соломе линейно возрастало в интервале доз ДМ 0–1.0 H_r ($r = 0.945$). Максимальное содержание Cd в колосе и корнях соответствовало дозе ДМ 0.8 H_r (рН почвы 5.2 ед.).

По убыванию среднего в вариантах содержания свинца (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: колос (1.6 ± 0.8) > солома (0.7 ± 0.5) ≥ корни (0.5 ± 0.5). В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r содержание свинца в колосе и соломе растений ячменя слабо зависело от дозы мелиоранта и реакции почвы, в корнях не зависело от указанных показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шильников И.А., Сычёв В.Г., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
2. Булатова Н.В., Чеботарёв Н.Т., Регорчук Н.В. Влияние длительного последствия извести и внесения минеральных удобрений на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность многолетних трав // Перм. аграрн. вестн. 2018. № 3(23). С. 35–41.
3. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2016. № 7. С. 3–11.
4. Витковская С.Е. Методы оценки эффективности и экологической безопасности химических мелиорантов. СПб.: АФИ, 2017. 76 с.
5. Тармаева И.Ю., Боева А.В. Минеральные вещества, витамины: их роль в организме. Проблемы микронутриентной недостаточности: учеб. пособ. Иркутск: ИГМУ, 2014. 89 с.
6. Самофалова И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород: учеб. пособ. Пермь: Перм. ГСХА, 2009. 30 с.
7. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф., Яковлев О.Н. Продуктивность растений ячменя и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва–растение при нейтрализации почвенной кислотности доломитовой мукой // Агрохимия. 2020. № 1. С. 50–57.
8. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние известкования дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой на урожайность сельскохозяйственных культур (результаты многолетнего микрополевого эксперимента) // Агрохимия. 2022. № 4. С. 52–59.
9. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Оглуздин А.С., Дубовицкая В.И. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на поведение тяжелых металлов в системе почва–растение // Пробл. агрохим. и экол. 2014. № 3. С. 31–34.
10. Витковская С.Е., Яковлев О.Н. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе почва–растение // Агрохимия. 2017. № 11. С. 44–51.
11. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях овощных бобов // Мат-лы IV Междунар. научн.-практ. конф. молод. ученых “Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств”. Ч. 2. Гомель, 2018. С. 151–154.
12. Возбуцкая А.Е. Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. 3-е изд. испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 426 с.
13. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
14. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на распределение цинка в системе “дерново-подзолистая почва–растения озимой ржи” // Агрофизика. 2017. № 3. С. 4–12.
15. Радыш И.В., Скальный А.В., Нотова С.В., Маршинская О.В., Казакова Т.В. Введение в элементологию: учеб. пособ. Оренбург: ОГУ, 2017. 183 с.
16. Бурдуковский М.Л. Влияние длительной химизации почв юга Дальнего Востока на биологический круговорот и содержание макро- и микроэлементов: Дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2014. 134 с.
17. Гальченко А.В., Назарова А.М. Эссенциальные микро- и ультрамикроэлементы в питании вегетарианцев и веганов. Ч. 1. Железо, цинк, медь, марганец // Микроэл-ты в медицине. 2019. Т. 20(4). С. 14–23.
18. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель

- сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформартех, 2003. 240 с.
19. *Оберлис Д., Харланд Б., Скальный А.* Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных / Под ред. А.В. Скального. Пер. с англ. Оренбург, 2018. 658 с.
 20. *Каплин В.Г.* Основы экотоксикологии. М.: КолосС, 2006. 232 с.
 21. *Исидоров В.А.* Введение в химическую экотоксикологию. Учеб. пособ. СПб.: Химиздат, 1999. 144 с.
 22. *Кожина Л.Ф.* Металлы подгруппы цинка и их соединения. Учеб.-метод. пособ. для студентов направления подготовки "Педагог. образ-е", профиль "Химия". Саратов, 2018. 49 с.
 23. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
 24. *Алексеев Ю.В., Литвинович А.В., Маслова А.И.* Экологическая проблема, возникающая при известковании почв в зерновых севооборотах // Продукционный процесс растений: теория и практика эффективного и ресурсосберегающего управления. Тр. Всерос. конф. с междунаро. участием. СПб.: АФИ, 2009. С. 207–211.
 25. *Литвинович А.В., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Возможность загрязнения кадмием яровых зерновых культур при мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2014. № 4. С. 80–87.
 26. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков): учеб. пособ. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2012. 55 с.
 27. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М., 1987. 4 с.
 28. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.

Long-Term Effects of Liming Sod-Podzolic Soil by Dolomite on the Microelement Composition of Plants *Hordeum* L.

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#}

^aRussian State Hydrometeorological University,
Voronezhskaya ul. 79, Saint-Petersburg 192007, Russia

^bAgrophysics Research Institute,
Grazhdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

[#]E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

In a long-term precision microfield experiment, the effect of liming acidic sod-podzolic light loamy soil with dolomite flour (DF, dose range 0–2.0 H_a , 9th year of the aftereffect) on the soil reaction, the content of mobile compounds Zn, Cu, Mn, Fe, Cd, Pb in the soil, and the trace element composition of barley plants (*Hordeum* L.) was studied. It was revealed that the most sensitive to changes in the acid-base properties of the soil were Zn and Mn, the content of which in the organs of barley plants significantly decreased linearly in the dose range of DF 0–2.0 H_a . The consequence was significant even at the minimum dose of DF (0.2 H_a). There was a tendency to a decrease in the Fe content in straw and ear of plants ($r = -0.572$ and -0.570 , respectively) in the indicated dose range. The data obtained confirmed that precipitation can lead to an increase in the Cd content in grain crops: in the dose range of DF 0.8–2.0 H_a , the increase in the element content in the ears of plants relative to the control variant of the experiment reached 1.6–2.0 times, and in straw increased linearly in the dose range of DM 0–1.0 H_a ($r = 0.945$), the content of Cu and Pb in barley plants was weakly dependent on the dose of liming agent.

Keywords: sod-podzolic soil, liming, dolomite flour, aftereffect, barley plants, microelement composition of plants, soil reaction.

УДК 631.46:631.811.982:633.11:632.112

ВЛИЯНИЕ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ, СПОСОБНЫХ К БИОСИНТЕЗУ И/ИЛИ ДЕСТРУКЦИИ ФИТОГОРМОНОВ, НА РОСТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ГОРМОНАЛЬНЫЙ СТАТУС РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВОДЫ[§]

© 2024 г. М. Д. Тимергалин^{1,*}, А. В. Феоктистова¹, Т. В. Рамеев¹, М. Д. Бакаева¹,
С. Н. Стариков¹, З. Р. Султангазин², С. П. Четвериков¹

¹Уфимский институт биологии — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН

450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

²Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства —

обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450059 Уфа, ул. Рихарда Зорге, 19, Россия

*E-mail: timermax@mail.ru

Показана способность различных штаммов почвенных бактерий синтезировать и/или разрушать регуляторы роста растений: индолил-3-уксусную кислоту (ИУК), цитокинины (ЦК) и абсцизовую кислоту (АБК). Бактерии стимулировали рост побегов и корней мягкой пшеницы в нормальных условиях увлажнения и при засухе, оказывали значимое влияние на содержание фитогормонов в побегах и корнях растений. Наиболее перспективными стимуляторами роста были штаммы, имеющие средний уровень продукции ИУК в сочетании со способностью к деградации фитогормонов: *Pseudomonas protegens* DA1.2, *P. plecoglossicida* 2.4-D и штамм-продуцент цитокининов *P. chlororaphis* IB-6.

Ключевые слова: фитогормоны, пшеница, ризобактерии, ауксины, абсцизовая кислота, цитокинины.

DOI: 10.31857/S0002188124090068, **EDN:** CCRZKQ

ВВЕДЕНИЕ

Способность многих бактерий повышать урожайность растений находит применение в растениеводстве, где все шире используют препараты на основе ризосферных бактерий, стимулирующих рост растений. Это свое полезное свойство бактерии проявляют не только в благоприятных для возделывания растений условиях, но и в стрессовых, в том числе при засухе [1]. Бактериальные препараты повышают засухоустойчивость растений и доступность элементов минерального питания за счет активации роста и развития корней [2]. Этот эффект объясняют тем, что микроорганизмы способны продуцировать гормоны растений и их функциональные аналоги [3, 4] и тем самым активировать рост и развитие корней и побегов.

Однако известно, что микроорганизмы могут разрушать и трансформировать фитогормоны

в растениях, влияя на их концентрацию и даже использовать в качестве питательных веществ [5]. Эти процессы исследованы хуже, чем микробный биосинтез фитогормонов, и остается еще много нерешенных вопросов, связанных с микробной деградацией гормонов растений. В частности, не ясна роль бактерий, способных к деградации фитогормонов, в формировании симбиотических растительно-микробных систем и регуляции устойчивости сельскохозяйственных растений к неблагоприятным условиям окружающей среды. Не изучено влияние микроорганизмов, обладающих способностью как к синтезу, так и к деградации фитогормонов, на процессы роста и гормональный баланс растений.

Цель работы — исследование воздействия ростостимулирующих штаммов почвенных бактерий, способных к синтезу, деградации или трансформированию наиболее распространенных групп фитогормонов, таких как индолил-3-уксусная кислота (ИУК), цитокинины (ЦК) и абсцизовая кислота (АБК), на гормональный статус и рост растений пшеницы в условиях засухи.

[§] Исследование выполнено в рамках Госзадания Минобрнауки России № 075-03-2021-607 по теме № 122031000309-7.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Тестируемые штаммы были взяты из коллекции микроорганизмов УИБ УФИЦ РАН или были ранее выделены из почв, отобранных на территории сельскохозяйственных угодий и промышленных предприятий. Опыты проводили на проростках мягкой яровой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Кинельская Юбилейная, который обладает комплексной устойчивостью к стрессовым факторам. Сорт рекомендован для возделывания в условиях лесостепной и переходной к степной зонах Средневолжского, Центрально-Черноземного и Уральского регионов РФ и включен в Госреестр в Средневолжском и Уральском регионах.

Для исследования деструкции фитогормонов культурами бактерий их выращивали в конических колбах на термостатируемом шейкере (160 об./мин) при температуре 28°C в течение 4 сут в среде с добавлением фитогормонов. Использовали минеральную основу среды Раймонда [6], в которую после автоклавирования вносили ИУК, АБК или ЦК в количестве 250 мг/л. В качестве контроля использовали аналогичную стерильную питательную среду без добавления бактериального инокулята [9]. Культуральную жидкость подвергали центрифугированию при 8000 g с последующей ультрафильтрацией через кассеты с диаметром пор 1 кДа (SARTOCOON Slice Cassete, Германия).

Синтезированные и выделенные бактериями в культуральную жидкость фитогормоны определяли в системе ВЭЖХ LC-20 Prominence с диодно-матричным детектором SPD-M20A (Shimadzu, Япония). Для хроматографического разделения использовали колонку PerfectSil Target ODS-3 HD 5µm (150 × 4.6 mm) (MZ-Analysentechnik, Германия). В качестве подвижной фазы использовали 50%-ный раствор ацетонитрила в 0.1%-ной уксусной кислоте при скорости элюирования 0.4 мл/мин. Объем вводимой пробы 5 мкл. Анализ ВЭЖХ-МС проводили на жидкостном tandem-ном хромато-масс-спектрометре LCMS-IT-TOF (Shimadzu, Япония) в ЦКП УФИЦ РАН "Агидель". Прибор LCMS-IT-TOF работал с использованием ионизации электрораспылением (ESI) в режиме отрицательных ионов со следующими параметрами: высоковольтный зонд — 3.5 кВ, поток распыляющего газа — 1.5 л/мин, температура CDL — 50°C, температура термоблока — 50°C, давление газосушителя — 150 кПа, напряжение детектора TOF — 1.6 кВ. Концентрацию ИУК, АБК и ЦК определяли по калибровочной кривой, построенной с использованием стандартов (Sigma-Aldrich, США), в интервале концентраций 50–100 000 нг/мл.

Предназначенные для обработки растений штаммы бактерий культивировали в питательном бульоне. Посев штаммов в питательную

среду производили из суспензий бактериальных клеток в стерильной водопроводной воде так, чтобы их исходный титр в питательной среде составлял $(1.0 \pm 0.5) \times 10^6$ КОЕ/мл. Микроорганизмы культивировали в колбах Эрленмейера на термостатируемом шейкере (160 об./мин) при температуре 28°C в течение 72 ч.

Семена пшеницы проращивали в течение 2 сут и пересаживали в сосуды объемом 0.5 л, заполненные смесью песка с почвой в соотношении 1 : 9 (в качестве дренажа на дно сосудов вносили мелкую гальку). Растения выращивали на светоплощадке при плотности потока фотонов ФАР 190 мкмоль/м²/с, 14-часовом фотопериоде и температуре 22–26°C. Путем ежедневного полива поддерживали уровень влажности почвы 60% ПВП. До и после полива взвешивали сосуды с растениями для определения количества воды, необходимой для полива. Дефицит воды создавали, поддерживая влажность почвы на уровне 30% ПВП. На 7-е сут после появления всходов их опрыскивали культурами бактерий из расчета 5×10^7 КОЕ/сосуд. Каждый вариант опыта ставили в пятикратной повторности.

Количество АБК, ИУК и ЦК в растительных тканях определяли на 3-и сут после опрыскивания растений методом иммуноферментного анализа. Побеги и корни гомогенизировали и экстрагировали 80%-ным этиловым спиртом. Спиртовой экстракт упаривали до водного остатка, после центрифугирования последнего отбирали аликваты супернатанта для анализа. Пробоподготовку и определение содержания цитокининов проводили, как описано ранее [7]. Очистку, концентрирование и измерение содержания ИУК и АБК осуществляли согласно детальному описанию, приведенному в работе [8]. Ростовые характеристики определяли через 14 сут после обработок.

Данные были обработаны с использованием программного обеспечения Statistica (Statsoft) (верс. 10) и MS Excel. На рисунках и таблицах данные представлены в виде среднего $\pm$ стандартная ошибка. Значимость различий оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента (MS Excel, $p \leq 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика изученных штаммов микроорганизмов. Перечень использованных для обработки растений штаммов микроорганизмов и их способность к деструкции и синтезу фитогормонов представлены в табл. 1.

В общей сложности было выбрано 10 штаммов бактерий таким образом, чтобы способность к синтезу и деструкции фитогормонов не коррелировала с их таксономической принадлежностью. Из них 7 штаммов продуцировали ИУК (с различными

Таблица 1. Содержание фитогормонов (нг/мл культуральной жидкости) через 72 ч культивирования штаммов бактерий на богатой питательной среде и степень биодеструкции фитогормонов различных классов (%) этими штаммами

Штамм	Род, вид	ИУК		АБК		ЦК	
		1	2	1	2	1	2
5(3)	<i>Pseudomonas mosselii</i>	—	—	14 ± 1	—	—	—
DA1.2	<i>P. protegens</i>	870 ± 63	53 ± 3	—	30 ± 2	—	60 ± 4
IB-6	<i>P. chlororaphis</i>	—	—	—	—	1100 ± 106	—
2.4-D	<i>P. plecoglossicida</i>	1717 ± 120	63 ± 5	13 ± 2	66 ± 4	—	70 ± 5
1.1	<i>P. turuhanskensis</i>	8700 ± 651	—	—	—	—	—
4CH	<i>P. chlororaphis</i>	850 ± 58	—	—	—	—	—
BLK	<i>Enterobacter ludvigii</i>	2000 ± 163	45 ± 3	11 ± 1	—	—	—
27X2	<i>Bacillus</i> sp.	—	—	—	22 ± 1	212 ± 18	—
8CH	<i>Burkholderia vietnamiensis</i>	500 ± 36	—	—	20 ± 1	—	25 ± 2
MX3	<i>Bacillus siamensis</i>	140 ± 12	—	—	22 ± 1	43 ± 2	20 ± 2

Примечание. В графе 1 — нг/мл культуральной жидкости, 2 — %.

уровнями биосинтеза: низкого — <500 нг/мл, среднего — в диапазоне 850–2000 нг/мл и высокого — >2000 нг/мл), 3 штамма были способны к деструкции ИУК, 3 штамма продуцировали АБК, 5 штаммов были способны ее разлагать, 3 штамма микроорганизмов синтезировали ЦК, 4 штамма разрушали ЦК, 3 штамма бактерий продуцировали одновременно 2 фитогормона. Большая часть бактерий—деструкторов фитогормонов была способна разлагать 2 или 3 типа этих веществ. У части отобранных штаммов сочетались способности к биосинтезу и разрушению фитогормонов.

Влияние микроорганизмов на гормональный статус растений. Сложность изучения гормональных взаимодействий заключается в том, что разные фитогормоны действуют не по отдельности, а посредством синергических или антагонистических перекрестных связей [10, 11]. Кроме этого, чувствительность тканей растений к каждому гормону меняется в зависимости от воздействия стресса [12].

Было определено содержание АБК, ЦК и ИУК в корнях и побегах пшеницы, обработанной различными культурами бактерий в условиях стресса, вызванного почвенной засухой. ИУК — наиболее известный ауксин. Этот гормон контролирует широкий спектр процессов, связанных с ростом и развитием растений, таких как рост и удлинение клеток в апикальных меристемах, колонизацию корней бактериями, дифференцировку сосудистых тканей, защиту от патогенов [13]. При условии оптимального полива штаммы бактерий не способствовали существенному накоплению ИУК (рис. 1а).

Дефицит воды приводил к накоплению ИУК в побегах и корнях растений как в вариантах опыта с применением бактерий, так и без них (рис. 1б).

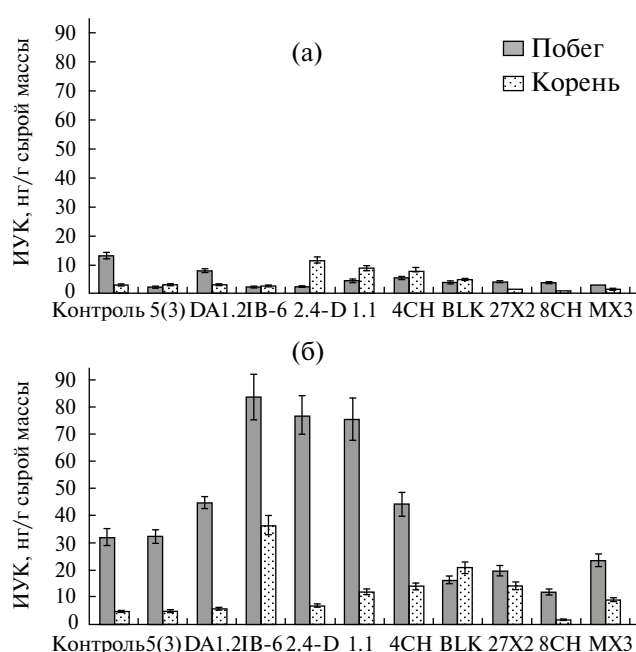


Рис. 1. Содержание ИУК в растениях пшеницы сорта Кинельская Юбилейная через 3 сут после обработки штаммами бактерий в условиях оптимального полива (а) и дефицита воды (б), $n = 9$.

На этом фоне наблюдали различия между растениями, обработанными разными штаммами бактерий. Большая часть бактериальных штаммов (2.4-D, 1.1, DA1.2, 4CH), способных продуцировать >500 нг ИУК/мл, способствовала значительному увеличению суммарного количества ИУК, выделенного из корней и побегов пшеницы. Аналогичное действие оказывал синтезирующий ЦК штамм IB-6. Вероятно, что в данном случае были

задействованы разные механизмы регуляции содержания ауксинов в растениях пшеницы. Продуценты ИУК могут оказывать непосредственное влияние на баланс растительных ауксинов. А действие цитокининпродуцирующего штамма IB-6 было опосредовано перекрестным взаимодействием ауксин/цитокинин на уровнях биосинтеза, деградации, транспорта и передачи сигналов. Так как накопление ауксинов в апикальных меристемах, расположенных на кончиках побегов и корней, инициирует рост надземных и подземных органов [14], можно предположить, что накопление ауксинов под действием бактерий предотвращало торможение роста побегов и корней в условиях дефицита воды.

ЦК представляют собой N6-замещенные производные аденина, которые влияют на деление клеток, инициацию роста побегов, минеральное питание, филлотаксис, развитие сосудов, формирование гаметофитов и эмбрионов, старение листьев, адаптацию к абиотическим стрессам и другие физиологические и биохимические процессы [15]. Синтез ЦК, главным образом N6-(2-изопентенил) аденина (iPA), зеатина и их производных, микроорганизмами хорошо изучен [16]. При этом влияние микроорганизмов, способных разрушать или трансформировать ЦК, на процессы роста и гормональный баланс растений остается неизученным.

В условиях оптимального увлажнения почвы многие из исследованных бактерий способствовали накоплению цитокининов (рис. 2).

При этом в вариантах опыта с ауксинпродуцирующими бактериями (штаммы 2.4-D, 1.1, BLK, 8CH) цитокинины накапливались преимущественно в корнях пшеницы, а в вариантах опыта с цитокининпродуцирующими бактериями (IB-6, 27X2) — преимущественно в побегах. Тенденция к перераспределению ЦК в растениях в пользу корней после сохранялась и на фоне засухи, причем такой эффект вызывали все тестируемые штаммы бактерий.

Абсцизовая кислота управляет многими процессами, связанными с ростом и развитием растений, включая созревание семян, деление, удлинение и дифференцировку клеток, активацию цветения, регулирование стрессовых ответов растений, например, закрытие устьиц и замедление роста [17].

Роль бактериальной АБК во взаимодействии растений и микроорганизмов изучена недостаточно, при этом способность бактерий, разрушающих АБК, снижать содержание этого фитогормона в растениях была впервые продемонстрирована при инокуляции рассады томатов и риса *Rhizobacteria Rhodococcus* sp. P1Y и *Novosphingobium* sp. P6W [18].

В условиях оптимального полива АБК накапливалась в первую очередь в побеге и корне растений,

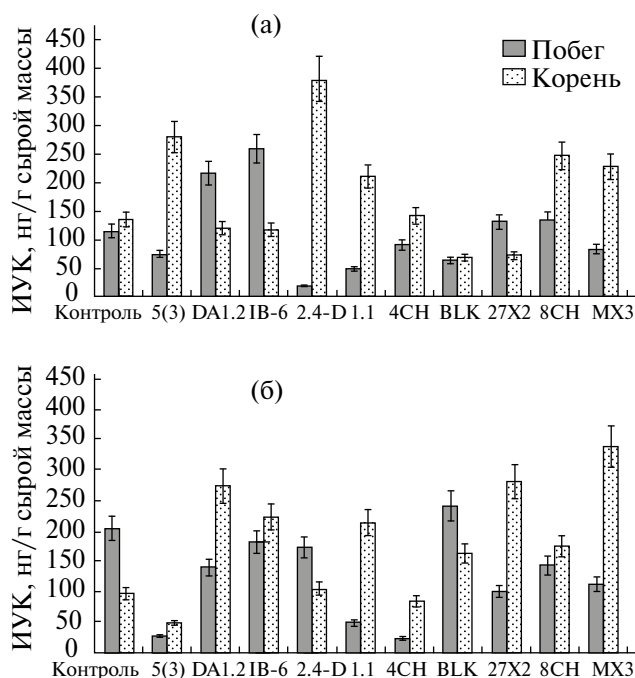


Рис. 2. Содержание ЦК в растениях пшеницы сорта Кинельская Юбилейная через 3 сут после обработки штаммами бактерий в условиях оптимального полива (а) и дефицита воды (б), $n = 9$.

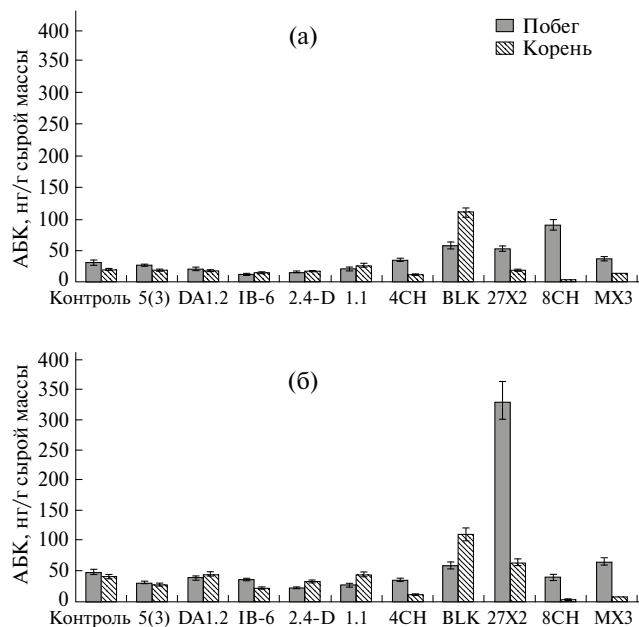


Рис. 3. Содержание АБК в растениях пшеницы сорта Кинельская Юбилейная через 3 сут после обработки штаммами бактерий в условиях оптимального полива (а) и дефицита воды (б), $n = 9$.

обработанных штаммом BLK, эта тенденция сохранялась и при дефиците воды (рис. 3).

На фоне засухи также отмечено аномальное накопление АБК в побеге растений, обработанных ЦК-продуцирующим АБК деструктором 27X2.

Для вариантов опыта, в которых наблюдали активизацию роста пшеницы, было характерно снижение содержания АБК, равномерно распределенное между корнями и побегами. Ранее было показано, что ростостимулирующие штаммы 2.4-D и DA1.2 способствовали снижению концентрации АБК в тканях растений в условиях стресса [19, 20].

Влияние микроорганизмов на рост растений. Результаты измерения длины, массы побега и корня растения пшеницы приведены на рис. 4, 5.

Стимуляция линейного роста побегов при оптимальном увлажнении почвы была обнаружена после обработки штаммами *Pseudomonas chlororaphis* 4CH и *P. protegens* DA1.2. На фоне засухи этот показатель превышал контроль при обработке растений штаммами *P. chlororaphis* IB-6, *P. protegens* DA1.2, *P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. turuhanskensis* 1.1.

Наиболее чувствительным показателем при обработке растений штаммами бактерий было

накопление сырой массы корня. Это объясняется способностью бактерий сохраняться и размножаться в почве, что обеспечивает их длительный контакт с корнями растений. При оптимальном поливе статистически значимый стимулирующий эффект был обнаружен у 6-ти штаммов бактерий, а в условиях дефицита влаги — у 3-х штаммов. Независимо от режима увлажнения наиболее активными стимуляторами роста корней были *P. chlororaphis* IB-6, *P. protegens* DA1.2, *P. plecoglossicida* 2.4-D.

В условиях оптимального увлажнения почвы среди исследованных бактерий 6 штаммов способствовали накоплению биомассы побега. При этом наилучшие результаты показали штаммы *Pseudomonas chlororaphis* 4CH и *P. protegens* DA1.2. В условиях дефицита воды накоплению массы побегов способствовали штаммы микроорганизмов *P. chlororaphis* IB-6, *P. protegens* DA1.2, *P. plecoglossicida* 2.4-D, *Bacillus* sp. 27X2.

Таким образом, штаммы бактерий, продуцирующие от 500 до 2000 нг ИУК/мл культуральной жидкости, с большей вероятностью улучшали рост растений мягкой пшеницы, чем бактерии с более низким или высоким уровнем продукции этого фитогормона. Влияние бактериальной ИУК на баланс фитогормонов в растениях подтверждалось изменениями в содержании ИУК в корнях и побегах пшеницы после интродукции штаммов бактерий с высоким потенциалом к продукции этого вещества. При этом лучшими характеристиками, особенно в засушливых условиях, обладали штаммы бактерии *P. protegens* DA1.2 и *P. plecoglossicida* 2.4-D, которые одновременно с синтезом ИУК были способны и к разложению ИУК, АБК и цитокининов. Возможно, это объясняется тем, что экзогенное применение ИУК в высокой концентрации может негативно сказываться на росте корней в силу того, что оно провоцирует производство растением фитогормона этилена [21]. Вероятно, способность к деградации ИУК может служить предохранительным механизмом от накопления избытка ИУК в зоне корня, если условия сложатся благоприятно для размножения интродуцированных бактерий и колонизации ими корней. Разрушение абсцизовой кислоты могло противодействовать торможению роста пшеницы в неблагоприятных условиях. Действительно, на фоне почвенной засухи после применения наиболее активных штаммов бактерий в корнях или побегах растений сорта Кинельская Юбилейная количество АБК было меньше, чем в контрольных растениях.

Ростстимулирующий эффект в отношении мягкой пшеницы оказал также штамм бактерий *P. chlororaphis* IB-6, синтезирующий цитокинины в значительном количестве (>1000 нг/мл). По-видимому, это объясняется взаимным влиянием

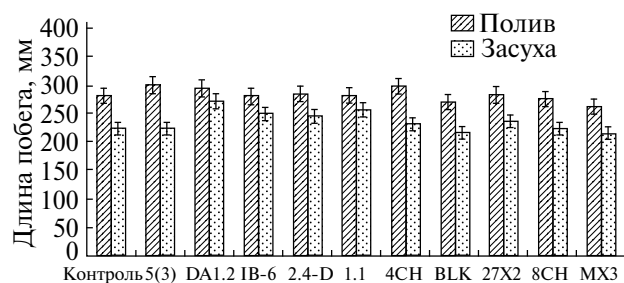


Рис. 4. Длина побега пшеницы сорта Кинельская Юбилейная в условиях оптимального полива и дефицита воды, $n = 15$.

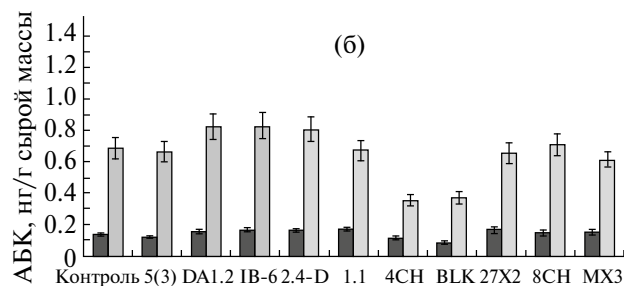
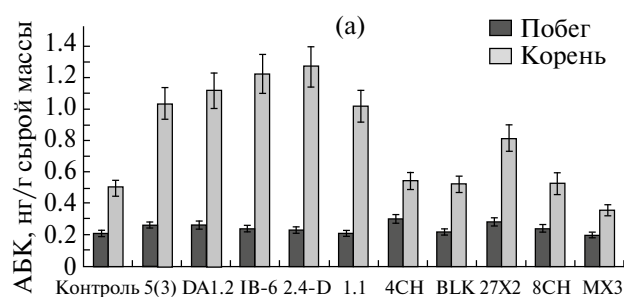


Рис. 5. Масса побега и корня пшеницы сорта Кинельская Юбилейная после обработки штаммами бактерий в условиях оптимального полива (а) и дефицита воды (б), $n = 15$.

ауксинов и ЦК в растениях, поскольку гормональный ответ растений, обработанных этим штаммом (особенно в засушливых условиях), был похож на гормональный ответ растений, обработанных активными продуцентами ИУК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, бактерии *P. protegens* DA1.2 и *P. plecoglossicida* 2.4-D стимулировали рост побегов и корней мягкой пшеницы сорта Кинельская Юбилейная при разных уровнях увлажнения почвы. Отличительными чертами этих штаммов бактерий были средний уровень продукции ИУК в сочетании со способностью к деструкции фитогормонов разных классов. Как перспективный стимулятор роста проявил себя также продуцент цитокининов *P. chlororaphis* IB-6. Штаммы – стимуляторы роста пшеницы значимо влияли на содержание в растениях пшеницы фитогормонов ИУК, АБК и ЦК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ruzzi M., Aroca R. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture // *Sci. Hortic.* 2015. V. 196. P. 124–134. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.08.042
2. Petrillo C., Vitale E., Ambrosino P., Arena C., Istito R. Plant growth-promoting bacterial consortia as a strategy to alleviate drought stress in *Spinacia oleracea* // *Microorganisms*. 2022. V. 10. P. 1798. DOI: 10.3390/microorganisms10091798
3. Kudoyarova G., Arkhipova T., Korshunova T., Bakaeva M., Loginov O., Dodd I.C. Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. P. 1368. DOI: 10.3389/fpls.2019.01368
4. Asari S., Tarkowská D., Rolčík J., Novák O., David Palmero D.V., Bejai S., Meijer J. Analysis of plant growth-promoting properties of *Bacillus amyloliquefaciens* UCMB5113 using *Arabidopsis thaliana* as host plant // *Planta*. 2017. V. 245. P. 15–30. DOI: 10.1007/s00425-016-2580-9
5. Syrova D.S., Shaposhnikov A.I., Yuzikhin O.S., Belimov A.A. Destruction and transformation of phytohormones by microorganisms // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2022. V. 58. P. 1–18. DOI: 10.1134/S0003683822010094
6. Raymond R.L. Microbial oxidation of *n*-paraffinic hydrocarbons // *Develop. Industr. Microbiol.* 1961. V. 2. P. 23–32.
7. Kudoyarova G.R., Vysotskaya L.B., Arkhipova T.N., Kuzmina L.Yu., Galimsyanova N.F., Sidorova L.V., Gabbasova I.M., Melentiev A.I., Veselov S.Yu. Effect of auxin producing and phosphate solubilizing bacteria on mobility of soil phosphorus, growth rate, and P acquisition by wheat plants // *Acta Physiol. Plantar.* 2017. V. 39. P. 253. DOI: 10.1007/s11738-017-2556-9
8. Feoktistova A., Timergalin M., Chetverikov S., Nazarov A., Kudoyarova G. Effects on *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and humic substances on the growth, pigment indices and concentration of hormones in wheat seedlings grown under water deficit // *Microorganisms*. 2023. V. 11. P. 549. DOI: 10.3390/microorganisms11030549
9. Стариков С.Н., Четверикова Д.В., Четвериков С.П. Деструкция фитогормонов бактериями-стимуляторами роста растений // *Экобиотехнология*. 2023. Т. 6. № 4. С. 217–226. DOI: 10.31163/2618-964X-2023-6-4-217-226
10. Peleg Z., Blumwald E. Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants // *Curr. Opin. Plant Biol.* 2011. V. 14(3). P. 290–295. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.02.001
11. Wolters H., Jürgens G. Survival of the flexible: hormonal growth control and adaptation in plant development // *Nat. Rev. Genet.* 2009. V. 10(5). P. 305–317. DOI: 10.1038/nrg2558
12. Khan N., Bano A., Ali S., Babar M.D.A. Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses // *Plant Growth Regul.* 2020. V. 90. P. 189–203. DOI: 10.1007/s10725-020-00571-x
13. Du M., Spalding E.P., Gray W.M. Rapid auxin-mediated cell expansion // *Ann. Rev. Plant Biol.* 2020. V. 71. P. 379–402. DOI: 10.1146/annurev-arplant-073019-025907
14. Vernoux T., Besnard F., Traas J. Auxin at the shoot apical meristem // *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* 2010. V. 2(4). DOI: 10.1101/cshperspect.a001487
15. Kieber J.J., Schaller G.E. Cytokinins // *Arabidopsis Book*. 2014. V. 2. DOI: 10.1199/tab.0168
16. Trdá L., Barešová M., Šašek V., Nováková M., Zahajská L., Dobrev P.I., Motyka V., Burketová L. Cytokinin metabolism of pathogenic fungus *Leptosphaeria maculans* involves isopentenyltransferase, adenosine kinase and cytokinin oxidase/dehydrogenase // *Front Microbiol.* 2017. V. 21. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01374
17. Brookbank B.P., Patel J., Gazzarrini S. Role of basal ABA in plant growth and development // *Genes*. 2021. V. 12(12). P. 1936. DOI: 10.3390/genes12121936
18. Belimov A.A., Dodd I.C., Safronova V.I., Dumova V.A., Shaposhnikov A.I., Ladatko A.G., Davies W.J. Absciscic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth // *Plant Physiol. Biochem.* 2014. V. 74. P. 84–91. DOI: 10.1016/j.plaphy.2013.10.032

19. Феоктистова А.В., Тимергалин М.Д., Рамеев Т.В., Четвериков С.П. Совместное воздействие штамма RGPB *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D и гуминовых веществ на рост, содержание фотосинтетических пигментов и фитогормонов в растениях пшеницы в условиях засухи // Агрохимия. 2023. № 9. С. 28–36.
DOI: 10.31857/S0002188123090065
20. Феоктистова А.В., Тимергалин М.Д., Рамеев Т.В., Четвериков С.П. Обработка растений пшеницы бактериями *Pseudomonas Protegens* DA1.2 нивелировала негативное действие гербицида чисталан в условиях дефицита воды // Агрохимия. 2021. № 10. С. 89–96.
DOI: 10.31857/S0002188121100082
21. Glick B.R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world // Microbiol. Res. 2014. V. 169. P. 30–39.
DOI: 10.1016/j.micres.2013.09.009

Effect of Rhizospheric Bacteria Capable of Biosynthesis and/or Destruction of Phytohormones on the Growth Characteristics and Hormonal Status of Wheat Plants in Conditions of Water Scarcity

M. D. Timergalin^{a, #}, A. V. Feoktistova^a, T. V. Rameev^a, M. D. Bakaeva^a, S. N. Starikov^a,
Z. R. Sultangazin^b, S. P. Chetverikov^a

^aUfa Institute of Biology – a separate structural unit of the Ufa Federal Research Center of the RAS,
prosp. October 69, Ufa 450054, Russia

^bBashkir Scientific Research Institute of Agriculture – a separate structural unit of the Ufa Federal Research Center
of the RAS,

ul. Richard Sorge 19, Ufa 450059, Russia

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

The ability of various strains of soil bacteria to synthesize and/or destroy plant growth regulators: indolyl-3-acetic acid (IAA), cytokinins (CK) and abscisic acid (ABA) has been shown. Bacteria stimulated the growth of shoots and roots of soft wheat under normal conditions of moisture and drought, had a significant effect on the content of phytohormones in shoots and roots of plants. The most promising growth stimulators were strains with an average level of IAA production in combination with the ability to destroy phytohormones: *Pseudomonas protegens* DA1.2, *P. plecoglossicida* 2.4-D and the cytokinin-producing strain *P. chlororaphis* IB-6.

Keywords: phytohormones, wheat, rhizobacteria, auxins, abscisic acid, cytokinins.

УДК 631.95:631.87

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ БИОКОНВЕРСИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НОВЫХ ВИДОВ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. Т. Ю. Анисимова^{1,*}, С. И. Тарасов¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа –
филиал Верхневолжского ФАНЦ
601390 Владимирская область, Судогодский р-н, п. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия
*E-mail: anistan2009@mail.ru

Изучили эффективность применения традиционных и интенсивных технологий аэробной переработки компостных смесей на основе осадка сточных вод (*ОСВ*), торфа и активаторов биотермических процессов. Установлено, что переработка отходов в буртах по традиционной технологии не обеспечила высокотемпературную санацию компостных смесей. Интенсивная аэробная переработка в ферментационных камерах активизировала биотермические процессы, обеспечила надежное обеззараживание компостной смеси, имевшей в составе птичий помет, *ОСВ*, торф. Производство биокомпостов соответствовало требованиям ГОСТ Р 55570, ГОСТ Р 54651, Регламента ЕС №2019/1009, национального стандарта Канады CAN/BNQ 0413-200. В сравнении с переработкой в буртах интенсивная аэрация, проведенная в крайне сжатые сроки, сопровождалась меньшими потерями в компостных смесях органического вещества, азота (в среднем на 10%), увеличением содержания подвижного калия, избирательным накоплением подвижных форм тяжелых металлов (меди, цинка, свинца), не оказавшим влияние на фитотоксичность биокомпостов.

Ключевые слова: птичий помет, торф, осадки сточных вод, микробные удобрения, компостные смеси, ускоренное компостирование, температурные режимы, биокомпосты.

DOI: 10.31857/S0002188124090074, **EDN:** CCQSTE

ВВЕДЕНИЕ

Результатом процесса интенсификации сельского хозяйства стали существенные негативные воздействия на природные комплексы и их компоненты, отрицательные изменения в состоянии окружающей природной среды. Остро стоят проблемы почвенного плодородия агроценозов, поиска возможных путей повышения биологической активности почвы, сохранения и улучшения ее агроэкологического состояния, в том числе повышения уровня обеспеченности органическим веществом и улучшения агрофизических свойств почв, особенно легкого механического состава.

В современном земледелии РФ снижается использование органических удобрений, что обусловлено не только уменьшением поголовья КРС, свиней, но и недостаточным использованием современных технологий производства данных удобрений на животноводческих и птицеводческих комплексах, отсутствием на предприятиях

нормативной базы по агрохимикатам из отходов животноводства [1].

Сельскохозяйственные и антропогенные органические отходы являются одним из основных отходов производственной и бытовой деятельности человека. Одним из видов данных отходов являются различные виды животноводческих и городских отходов, в частности, осадки сточных вод (*ОСВ*).

Эффективность производства органических удобрений на основе *ОСВ* посредством ускоренного компостирования в РФ изучена мало. Не определены оптимальные ингредиентные составы компостных смесей на основе *ОСВ*, не установлены энергосберегающие режимы, сроки их твердофазной интенсивной аэробной переработки. Отсутствуют сведения о целесообразности применения различных препаратов многофункционального спектра действия при производстве биокомпостов на основе *ОСВ* методом ускоренного компостирования. Не разработаны рекомендации их применения.

Удобрения, произведенные на основе отходов коммунального хозяйства (*ОСВ*), содержат почти равное количество органического вещества и биогенных элементов по сравнению с навозом в пересчете на сухое вещество. Однако объем их применения крайне ограничен, что обусловлено высоким инфекционным и инвазионным потенциалом. Недостатками *ОСВ* также являются низкие величины соотношений $C : N (<10)$, их высокая влажность ($>75\%$) и плотность (>1.0). Массовое применение осадка сточных вод в качестве удобрений ограничено наличием в них повышенных концентраций загрязняющих веществ, среди которых наибольшую опасность представляют тяжелые металлы: Cd, Ni, Pb, Zn, Cu, Cr и др. [2].

Снизить инфекционный потенциал, токсичность *ОСВ* можно контролируемым компостированием. Согласно зарубежной практике, концепции разумного потребления и устойчивого развития (“Sustainable Development”), наиболее перспективными технологиями производства органических удобрений на основе отходов коммунального хозяйства являются технологии аэробной твердофазной переработки в интенсивном режиме, позволяющие получать биокомпосты, используемые в лесонасаждениях, сельских и озеленительных хозяйствах [3].

При производстве органических удобрений наибольшее распространение получила технология ускоренного компостирования в специализированных установках с принудительной интенсивной аэрацией. В РФ применяют аналогичные установки, как правило, зарубежного производства (*Kari Compo S-90E, ABONO, Kohshin* и др.), в основном в хозяйствах индустриального животноводства, птицеводства, при производстве коммерческих видов органических удобрений на основе навоза, помета [4].

Разработка научно обоснованных экологически безопасных приемов использования отходов от производственной деятельности АПК в хозяйственном обороте, внедрение и совершенствование технологии по их переработке способствуют сокращению объемов накопленных и вновь образованных отходов. Объектами исследования являлись компостные смеси на основе птичьего помета, торфа, осадков сточных вод, навоза и микробных удобрений.

Цель работы — разработка экологически безопасных методов и технологий биоконверсии органических отходов агропромышленного комплекса и коммунального хозяйства для производства и использования новых видов органических и органоминеральных удобрений в земледелии.

В процессе выполнения работы провели аналитический обзор научной отечественной и зарубежной литературы, экспериментальные исследования

в стационарной специализированной установке по ускоренному компостированию, лабораторные аналитические исследования с использованием агрохимических методов, а также компьютерных программ Excel, STATVIA.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение приемов и технологий биоконверсии отходов АПК и городского хозяйства проводили в модельном опыте, материалом для исследований служили компостные смеси на основе *ОСВ* станций биологической очистки г. Владимира и торфа верхового. Для ускорения деструкции органических отходов и повышения удобрительного потенциала биокомпостов в компостную смесь на основе *ОСВ* и торфа добавляли высушенный птичий помет влажностью 36% и микробное удобрение Бамил (разработка ВНИИСХМ).

Исследование проводили по следующей схеме.

I. Компостирование в буртах (традиционная технология): 1 — *ОСВ* + торф (1 : 2) — контроль, 2 — *ОСВ* + торф (1 : 2) + *Salmonella*, 3 — *ОСВ* + торф (1 : 2) + *Salmonella* + Бамил (25%), 4 — *ОСВ* + торф (1 : 2) + *Salmonella* + птичий помет (25%).

II. Интенсивное аэробное компостирование: 5 — *ОСВ* + торф (1 : 2) — контроль, 6 — *ОСВ* + торф (1 : 2) + *Salmonella*, 7 — *ОСВ* + торф (1 : 2) + *Salmonella* + Бамил (25%), 8 — *ОСВ* + торф (1 : 2) + *Salmonella* + птичий помет (25%).

Препараты *Salmonella* добавляли в качестве индикатора для оценки степени обеззараживания биокомпоста от патогенной микрофлоры.

Агрохимическая характеристика исходных компонентов компостных смесей приведена в табл. 1.

Традиционное компостирование проводили в буртах на площадке производственных испытаний ВНИИОУ, интенсивную аэробную ферментацию — в стационарной установке конструкции ВНИИОУ.

Пилотная опытно-производственная установка аэробной твердофазной переработки в интенсивном режиме представляет собой капитальное строение прямоугольной формы размерами 9×4 м и высотой 3 м из кирпичных стен и оцинкованных пола и крыши, в полу предусмотрена перфорация для поступления воздуха. Управление технологическим процессом ручное, аэрацию проводили в течение 4 ч/сут на протяжении 15 сут. Подачу воздуха проводили непрерывно посредством компрессора 2АФ мощностью 2.5 кВт с интенсивностью $4.0\text{--}4.5 \text{ м}^3/\text{т}/\text{мин}$.

Масса исходной компостной смеси для буртов составляла 1000 кг, в контейнерах — 13–15 кг в восьмикратной повторности.

Таблица 1. Химический состав исходных компонентов компостных смесей

Вид органического удобрения	Влаж-ность, %	Зола, %	Содержание общих, %			N-NO ₃ , мг/кг	N-NH ₄ , %	Подвижные		C, %	pH
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O			P ₂ O ₅	K ₂ O		
								мг/кг			
ОСВ + торф (контроль)	63.9	22.0	<u>0.78</u> 0.28	<u>0.46</u> 0.17	<u>0.14</u> 0.05	3.4	<u>0.069</u> 0.025	24.0	6.9	39.0	4.40
ОСВ + торф + Бамил	67.8	18.5	<u>0.90</u> 0.29	<u>0.74</u> 0.24	<u>0.15</u> 0.05	2.5	<u>0.093</u> 0.003	24.5	6.5	45.8	4.70
ОСВ + торф + птичий помет	66.8	26.0	<u>1.28</u> 0.42	<u>1.47</u> 0.49	<u>0.52</u> 0.17	1.3	<u>0.15</u> 0.05	24.9	20.5	37.0	6.27
Птичий помет	35.8	30.5	<u>1.43</u> 0.92	<u>3.19</u> 2.04	<u>1.52</u> 0.97	15.1	<u>0.30</u> 0.125	160	75.7	34.8	7.58
Торф	65.3	7.0	<u>0.74</u> 0.26	<u>0.7</u> 0.25	<u>0.1</u> 0.04	4.1	<u>0.058</u> 0.02	31.0	4.0	46.5	3.79
ОСВ	72.5	38.5	<u>1.63</u> 0.44	<u>2.45</u> 0.69	<u>0.38</u> 0.11	6.8	<u>0.2</u> 0.055	92.0	11.0	30.8	7.31

Примечание. Над чертой – на сухое вещество, под чертой – на сырое вещество.

Компоненты компостных смесей для буртов измельчали, перемешивали с помощью лопат, формировали бурт высотой 1.5 м, шириной 1.5 м треугольного сечения.

Компоненты компостных смесей для интенсивной аэрации измельчали, тщательно перемешивали и помещали в контейнеры из полистирола объемом 0.02–0.04 м³ с перфорированным днищем и стенками, затем контейнеры устанавливали в биоферментационную установку.

Замеры температуры в буртах проводили каждые сутки на глубине 30–50 см от поверхности, в ферментационной установке – в среднем слое смесей с помощью контактного цифрового термометра Hanna HI 98509 Checktemp.

До и после переработки определяли физико-химические свойства компостных смесей: pH – по ГОСТ 27979, влажность – по ГОСТ 26713, содержание органического вещества – по ГОСТ 27980, общий азот – по ГОСТ 26715, общий фосфор – по ГОСТ 26717, общий калий – по ГОСТ 26718, подвижные фосфор, калий – по ГОСТ 26204.

При изучении эффективности обеззараживания компостных смесей на основе ОСВ и торфа в буртах и камере использовали тест-объекты, которыми служили навески смесей массой 5 и 1 кг, помещенные в капроновые мешки. Тест-объекты были контаминированы суспензией паспортизированного штамма бактерий группы сальмонелл *Salmonella typhi* из расчета 4 тыс. микробных клеток/г. Тест-объекты закладывали в средние слои компостных смесей и затем по окончании переработки извлекали для проведения анализов. Санитарно-гигиенические характеристики (общее

микробное число, коли-титр, наличие энтеробактерий рода *Salmonella*) компостных смесей до и после переработки определяли общепринятыми методами [5]. Оценку степени эпидемиологической опасности нативных и обработанных компостных смесей проводили по СанПиН 2.1.3684, МР ФЦ/4022 от 24.12.2009, ГОСТ Р 55570, ГОСТ Р 54651, Регламенту ЕС 2019/1009, национальному стандарту Канады CAN/BNQ 0413-200 [6–11] в соответствии с указаниями и правилами [12–14]. Численность, выживаемость санитарно-показательных микроорганизмов проводили согласно общепринятым методикам с последующим их посевом на питательных средах. При определении общего микробного числа использовали мясопептонный агар, коли-титра – среду Кесслера, титра анаэробов – среду Вильсона–Блера, сальмонелл – среду Висмут сульфит агар, БГКП – среду Эндо. Для оценки эффективности обеззараживания компостных смесей на основе ОСВ и торфа пробы нативных и инфицированных компостных смесей отбирали до постановки опыта и после его окончания: в буртах – через 1.5 мес., в установке – через 15 сут.

Содержание валовых и подвижных тяжелых металлов (ТМ) определяли методом пламенной атомной абсорбции согласно ГОСТ Р 53218-2008 [15], СанПиН 2.1.7.573-96 [16], СанПиН 1.2.3685-21 [17], МУК 4.1.1471-03 [18].

Суммарную фитотоксичность биокомпостов определяли по степени подавления роста корней проростков редиса согласно ГОСТ Р ИСО 18763-2019 [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования получены данные наблюдения за температурным режимом в процессе компостирования, динамики изменения физической массы, содержания органического вещества, основных биогенных элементов и ТМ, санитарно-гигиенических характеристик в компостных смесях и биокомпостах.

Установлено, что в компостных смесях при компостировании в буртах в течение 45 сут наибольшая температура в смеси контрольного варианта составила 32.8°C, при использовании микробного удобрения Бамил температура в смеси повышалась до 35°C, при применении птичьего помета — до 52°C (рис. 1).

В опыте с интенсивной непрерывной аэрацией в течение 4 ч наибольшая температура смесей при переработке составила 55.8°C в варианте с птичьим пометом. При использовании микробного удобрения Бамил температура в смеси повышалась до 42.9°C, в контрольном варианте наибольшая температура смеси составила 32.3°C. Добавление в компостную смесь птичьего помета

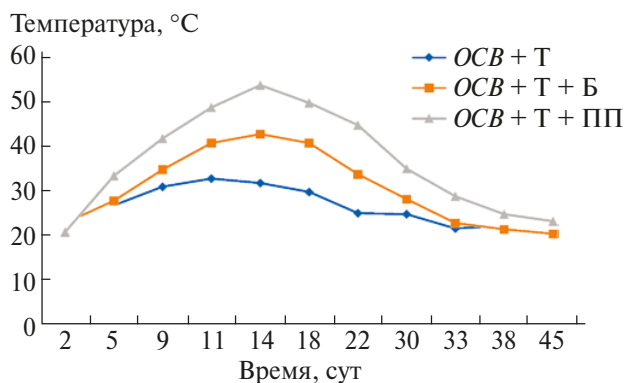


Рис. 1. Изменение температуры при компостировании в буртах.

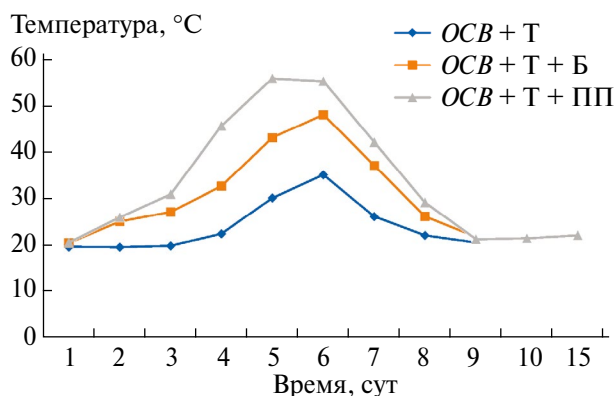


Рис. 2. Изменение температуры при компостировании в ферментационной камере.

способствовало более быстрому разогреву и более длительному прохождению термофазы (рис. 2).

Основными показателями качества и безопасности органических удобрений, биокомпостов являются содержание в них органического вещества, питательных элементов, в том числе в подвижной форме, санитарно-гигиенические и токсикологические характеристики.

Изменения физико-химических свойств компостных смесей, происходящие в ходе их аэробной переработки в буртах и в интенсивном режиме, показаны в табл. 2 и 3.

В компостных смесях в буртах снижение содержания влаги составило от 6.35 до 16.5% в зависимости от варианта. Наибольшее снижение влажности зафиксировано в компостных смесях на основе *OCB*, торфа и птичьего помета, что можно объяснить большей интенсивностью их биотермической переработки. В процессе аэробной переработки в интенсивном режиме отмечены потери массы компостных смесей, размеры которых зависели от их состава. Наибольшие потери массы компостных смесей отмечены при их аэробной переработке в буртах (–18%), при интенсивной переработке они составили 12%.

Аэробная переработка в буртах сопровождалась снижением содержания органического вещества на 16–30, общего азота — на 14–24 и аммонийного — на 0.051–0.073 мг N/кг, подвижного фосфора на 48–67 мг/кг. Валовое содержание фосфора и калия не изменялось, повышалось содержание подвижного калия на 8.3–24.5 мг/кг. Аэробная переработка в буртах обусловила снижение кислотности компостных смесей с pH 4.4–6.0 до 5.15–6.3 ед. (табл. 2).

Аналогичные изменения физико-химических свойств отмечены в компостных смесях при интенсивной 4-часовой аэрации. В сравнении с традиционной технологией использование аэробной твердофазной переработки в ферментационной камере в интенсивном режиме сопровождалось меньшими потерями органического вещества (12–20%), общего (11–15%) и аммиачного (0.027–0.056 мг/кг) азота, подвижного фосфора (35–47 мг/кг) (табл. 3). Валовое содержание фосфора и калия также не изменялось, повышалось содержание подвижного калия (на 10.8–31.0 мг/кг). Отмечено незначительное снижение (на 2.8–5.4%) содержания влаги. После переработки в ферментационной камере в компостных смесях всех вариантов опыта отмечено снижение кислотности с pH 4.4–6.0 до 4.5–6.27 ед.

Согласно результатам санитарно-гигиенического исследования, в компостных смесях на основе *OCB*, торфа, Бамила, птичьего помета не были обнаружены бактерии рода *Salmonella*, являющиеся основным критерием наличия патогенных

Таблица 2. Влияние 45-суточной традиционной аэробной переработки в буртах на физико-химические свойства компостных смесей на основе *ОСВ* и торфа

Показатель	Величина	Вариант			
		<i>ОСВ</i> + торф	<i>ОСВ</i> + торф + <i>Salmonella</i>	<i>ОСВ</i> + торф + Бамил + <i>Salmonella</i>	<i>ОСВ</i> + торф + помет + <i>Salmonella</i>
$C_{орг}, \%$	Исходная	42.0	39.0	45.3	48.0
	Конечная	35.3	32.8	34.3	33.6
	+/-, %	-16.0	-16.0	-24.0	-30.0
$N_{вал}, \%$	Исходная	1.48	1.46	1.52	1.72
	Конечная	1.27	1.26	1.49	1.31
	+/-, %	-14.0	-14.0	-18.0	-24.0
$N-NH_4, \text{мг/кг}$	Исходная	0.094	0.096	0.098	0.1033
	Конечная	0.047	0.048	0.035	0.024
	+/-, мг/кг	-0.051	-0.048	-0.063	-0.073
$N-NO_3, \text{мг/кг}$	Исходная	3.4	3.0	2.5	1.31
	Конечная	35.6	34.9	36.6	41.4
	+/-, мг/кг	+32.2	+31.9	+34.1	+40.1
$P_2O_5_{вал}, \%$	Исходная	1.15	1.14	1.20	1.42
	Конечная	1.13	1.12	1.15	1.36
	+/-, %	-2.0	-2.0	-4.0	-4.10
$P_2O_5_{подв}, \text{мг/кг}$	Исходная	240	242	245	259
	Конечная	192	194	191	192
	+/-, мг/кг	-48	-48	-54	-67
$K_2O_{вал}, \%$	Исходная	0.21	0.19	0.25	0.26
	Конечная	0.20	0.183	0.24	0.25
	+/-, %	-4.8	-3.5	-2.5	-4.0
$K_2O_{подв}, \text{мг/кг}$	Исходная	59.0	60.0	66.0	72.0
	Конечная	67.3	69.6	87.1	96.5
	+/-, мг/кг	+8.3	+9.6	+21.1	+24.5
рН	Исходная	4.4	4.4	4.7	6.0
	Конечная	5.15	5.2	6.0	6.3
Влажность, %	Исходная	63.9	63.8	67.8	66.8
	15 сут	57.5	58.0	56.9	50.3
Убыль физической массы, %	Всего	-12.8	-12.1	-14.1	-18.0

микроорганизмов в компостных смесях, органических удобрениях. Вместе с тем данные компостные смеси характеризовались крайне высокой микробной численностью (табл. 4, 5).

В 1 г компостов микробная численность превышала десятки миллионов, содержание бактерий группы кишечных палочек, анаэробных клостридий – десятки тысяч. Учитывая существующие санитарные и гигиенические правила, согласно которым органические удобрения должны соответствовать требованиям, предъявляемым к чистой почве сельскохозяйственных угодий, селитебных и рекреационных территорий [20], данные компостные смеси по степени эпидемиологической опасности, по показателям коли-титра, титра анаэробных клостридий (0.0001) оценивались как “чрезвычайно опасные” [21]. Данные компостные смеси не соответствовали требованиям Регламента ЕС №2019/1009, национального стандарта Канады CAN/BNQ 0413-200 [10, 11], согласно которым содержание бактерий группы кишечных палочек в компостах не должно превышать 1000 микробных клеток/г.

Тест-объекты на основе указанных компостных смесей и контаминированные суспензией бактерий *Salmonella typhi* из расчета 4 тыс. микробных клеток/г также оценивались как “чрезвычайно опасные”.

Таблица 3. Влияние интенсивной 15-суточной аэробной переработки в ферментационной камере на изменение физико-химических свойств компостных смесей на основе *OCB* и торфа

Показатель	Величина	Варианты			
		<i>OCB</i> + торф	<i>OCB</i> + торф + <i>Salmonella</i>	<i>OCB</i> + торф + Бамил + <i>Salmonella</i>	<i>OCB</i> + торф + помет + <i>Salmonella</i>
$C_{орг}$, %	Исходная	41.6	42.0	46.3	49.0
	Конечная	39.0	39.5	39.3	37.0
	+/-, %	-12.0	-12.0	-16.0	-20.0
$N_{вал}$, %	Исходная	1.46	1.46	1.54	1.71
	Конечная	1.30	1.30	1.32	1.45
	+/-, %	-11.0	-11.0	-14.0	-15.0
$N-NH_4$, мг/кг	Исходная	0.091	0.098	0.098	0.1024
	Конечная	0.064	0.065	0.054	0.046
	+/-, мг/кг	-0.027	-0.033	-0.044	-0.056
$N-NO_3$, мг/кг	Исходная	3.4	3.4	2.5	1.31
	Конечная	34.4	34.9	35.9	41.0
	+/-, мг/кг	+31.0	+31.5	+33.4	+39.7
$P_2O_5_{вал}$, %	Исходная	1.42	1.42	1.24	1.44
	Конечная	1.38	1.38	1.20	1.38
	+/-, %	-2.4	-2.4	-3.2	-4.0
$P_2O_5_{подв}$, мг/кг	Исходная	236	244	249	260
	Конечная	201	205	209	213
	+/-, мг/кг	-35	-41	-40	-47
$K_2O_{вал}$, %	Исходная	0.21	0.21	0.25	0.28
	Конечная	0.20	0.20	0.24	0.28
	+/-, %	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
$K_2O_{подв}$, мг/кг	Исходная	60.0	58.0	68.0	78.0
	Конечная	70.8	69.6	89.1	109.0
	+/-, мг/кг	+10.8	+11.6	+21.1	+31.0
рН	Исходная	4.4	4.4	4.7	6.0
	Конечная	4.5	4.8	6.0	6.3
Влажность, %	Исходная	63.9	63.9	67.8	66.8
	15 сут	60.7	66.1	62.4	64.0
Убыль физической массы, %	Всего	-10.2	-10.2	-8.6	-11.7

Как показали результаты исследований, традиционное аэробное компостирование в буртах в течение 1.5 мес. с трехкратной перебивкой не позволила обеспечить высокотемпературную переработку всех видов компостных смесей, их гарантированную санацию. Наибольшие температурные показатели (52°C) отмечены лишь при переработке компостной смеси на основе *OCB*, торфа и птичьего помета. Данная компостная смесь из категории “сильно загрязненная, чрезвычайно опасная” после переработки в буртах оценивалась как “слабо загрязненная, относительно опасная”. Аэробная переработка в буртах при данной температуре не обеспечила обеззараживание компостной смеси на

основе *OCB*, торфа и птичьего помета: в 1 г смеси отмечено наличие бактерий *Salmonella typhi* на уровне нескольких десятков микробных клеток. После переработки в буртах все остальные виды компостных смесей оценивались как “загрязненные, опасные” с высоким уровнем их контаминации бактериями *Salmonella typhi*.

Согласно результатам исследования, применение интенсивной аэробной переработки в стационарной установке в течение 15 сут не обеспечило активизацию биотермических процессов в компостных смесях на основе *OCB*, торфа, Бамила. Максимальная температура при их переработке не превысила 55°C. В соответствии с СанПиН 2.1.3684-21,

Таблица 4. Влияние традиционной аэробной переработки (в буртах) на эпидемиологическую безопасность компостных смесей на основе *ОСВ* и торфа

Показатель эпидемиологической опасности	Виды компостных смесей, биокомпостов							
	Исходные компостные смеси				Компостные смеси после переработки			
	температура до опыта, °С				максимальная температура переработки, °С			
	18–20				32.4	32.8	35.0	52.0
	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 (контроль)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i>	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + Бамил (25%)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 (контроль)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i>	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + Бамил (25%)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)
Общее микробное число, млн/г	19.5	20.0	26.0	25.0	18.6	19.4	24.2	24.4
Коли-титр, г	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.001	0.001	0.001	0.01
Титр анаэробов, г	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.001	0.001	0.001	0.01
Наличие сальмонелл (КОЕ), тыс./г	0.2	2.6	2.4	3.4	0.1	1.8	0.1	0.1

Таблица 5. Влияние интенсивной аэробной переработки (в установке) на эпидемиологическую безопасность компостных смесей на основе *ОСВ* и торфа

Показатель эпидемиологической опасности	Виды компостных смесей, биокомпостов							
	Исходные компостные смеси				Компостные смеси после переработки			
	температура до опыта, °С				максимальная температура переработки, °С			
	18–20				32.3	18–20	42.9	18–20
	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 (контроль)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i>	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + Бамил (25%)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 (контроль)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i>	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + Бамил (25%)	<i>ОСВ</i> + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)
Общее микробное число, млн/г	19.5	20.0	26.0	26.0	15.6	15.8	16.2	15.8
Коли-титр, г	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.1
Титр анаэробов, г	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.1
Наличие сальмонелл (КОЕ), тыс./г	0.2	2.6	2.4	3.4	0.1	1.8	0.1	Отсутствие

указанные компостные смеси после их интенсивной аэрации оставались “загрязненными, опасными” с высокой их контаминацией бактериями *Salmonella typhi*, группы кишечной палочки, анаэробных клостридий (табл. 5).

Эффективная высокотемпературная переработка в установках интенсивной аэрации отмечена лишь при использовании компостной смеси на основе *ОСВ*, торфа и птичьего помета. Переработка в интенсивном режиме при температурах, превышающих 50°С, с максимумом 55.8°С на протяжении 48 ч обеспечила надежное обеззараживание компостной смеси. Полученный биокомпост на основе *ОСВ*, торфа и птичьего помета соответствовал требованиям безопасности: содержание бактерий группы кишечной палочки, анаэробных

Таблица 6. Влияние традиционной аэробной переработки (в буртах) на токсикологическую безопасность компостных смесей на основе ОСВ, торфа, птичьего помета

Показатель токсикологической опасности (допустимая погрешность измерения)	Норма, мг/кг	Исходные компостные смеси				Компостные смеси после переработки					Различия содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов, +/- %	
		температура до постановки опыта, °С				максимальная температура переработки, °С						
		18–20				32.4	32.8	35.0	52.0			
		ОСВ + торф 1 : 2 (кон-троль)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> Бамил (25%)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)	Сред-нее	ОСВ + торф 1 : 2 (кон-троль)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i>	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + Бамил (25%)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)	Сред-нее		
Cd (±33%)	ОДК 0.5–2.0	0.27	0.31	0.24	0.33	0.29	0.26	0.32	0.24	0.34	0.29	0
Cu (±21%)	33–132	57.71	58.2	66.4	58.8	60.28	48.4	60.8	56.2	58.8	56.05	–7.0
Zn (±33%)	55–220	30.16	26.2	38.4	32.2	31.74	24.4	36.6	34.8	29.6	31.35	–1.2
Pb (±25%)	32–130	5.25	5.46	6.02	4.96	5.42	4.18	5.62	6.06	4.26	5.03	–7.2
Hg (±33%)	2.1	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	
	ПДК	Валовое содержание ТМ, мг/кг										
Cd (±33%)	≤0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu (±23%)	≤3.0	0.05	0.046	0.058	0.06	0.054	0.056	0.052	0.065	0.067	0.06	+11.1
Zn (±21%)	≤23	11.2	9.9	12.6	10.8	11.1	12.1	10.7	13.6	11.7	12.0	+8.0
Pb (±35%)	≤6.0	0.22	0.19	0.26	0.21	0.22	0.25	0.22	0.3	0.24	0.25	+14.0
Hg (±33%)	≤1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 7. Влияние интенсивной аэробной переработки (в установке) на токсикологическую безопасность биокомпостов на основе ОСВ, торфа, птичьего помета

Показатель токсикологической опасности (допустимая погрешность измерения)	Норма, мг/кг	Исходные компостные смеси				Компостные смеси после переработки				Различия содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов, +/– %		
		Температура до постановки опыта, °С				Максимальная температура переработки, °С						
		18–20				32.3	32.2	42.9	55.8			
		ОСВ + торф 1 : 2 (контроль)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> Бамил (25%)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)	Среднее	ОСВ + торф 1 : 2 (контроль)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i>	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> Бамил (25%)	ОСВ + торф 1 : 2 + <i>Salmonella</i> + птичий помет (25%)		Среднее	
ОДК 0.5–2.0 33–132 55–220 32–130 2.1 ПДК	Cd (±33%)	0.27	0.31	0.24	0.33	0.29	0.19	0.32	0.26	0.3	–7	
	Cu (±21%)	57.71	58.2	66.4	58.8	60.28	49.6	58.6	64.1	59.6	–3.8	
	Zn (±33%)	30.16	26.2	38.4	32.2	31.74	28.4	34.4	36.4	29.6	–1.4	
	Pb (±25%)	5.25	5.46	6.02	4.96	5.42	5.48	4.26	5.9	5.14	–4.0	
	Hg (±33%)	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	0	
	ПДК	Содержание подвижных форм, мг/кг										
		Cd (±33%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Cu (±23%)	0.05	0.046	0.058	0.06	0.054	0.07	0.063	0.08	0.083	+38
		Zn (±21%)	11.2	9.9	12.6	10.8	11.13	14.3	12.7	16.1	13.82	+28
		Pb (±35%)	0.22	0.19	0.26	0.21	0.22	0.54	0.47	0.64	0.51	+145
Hg (±33%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

кlostридий не превышало 1000 микробных клеток/г, бактерии *Salmonella typhi* отсутствовали.

Согласно результатам исследования, традиционная аэробная переработка в буртах при температурах 32–52°C не оказала влияния на содержание валовых и подвижных форм ТМ в компостных смесях на основе *ОСВ* и торфа. Различия в содержании кадмия, меди, цинка, свинца, ртути в компостных смесях до и после их переработки не превышали погрешности измерений (табл. 6).

В условиях интенсивной аэробной переработки при температурах 32.0–55.8°C содержание ТМ в компостных смесях имело тенденцию к снижению. Однако данные изменения были крайне незначительными и не превышали ошибки измерений. Наиболее очевидным было повышение содержания в компостных смесях подвижных форм меди, цинка, свинца, соответственно на 15, 7, 110% с учетом ошибки измерения (табл. 7).

Анализ на общую токсичность по биотесту с применением экспресс-метода показал, что компостные смеси всех вариантов опыта не являлись токсичными для растений (табл. 8, 9).

Проведена оценка эффективности производства органических удобрений на основе *ОСВ*, торфа, птичьего помета посредством ускоренного

и традиционного компостирования, показавшая преимущество интенсивной аэрации при компостировании в ферментационной камере компостной смеси на основе торфа, *ОСВ* и птичьего помета, в результате чего был получен биокомпост, соответствующий требованиям отечественных и зарубежных нормативов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что компостные смеси на основе осадка сточных вод (*ОСВ*) и торфа характеризуются крайне низкой способностью к биотермической переработке как в условиях традиционного компостирования в буртах, так и в ферментационных установках интенсивной аэрации, что, вероятно, обусловлено инертностью органического вещества торфа, наличием в составе *ОСВ* веществ, подавляющих биоконверсионные процессы.

Традиционная и интенсивная переработки компостных смесей на основе *ОСВ*, торфа, биоудобрения Бамил в буртах, ферментационной установке не обеспечили высокотемпературное их обеззараживание и производство органических удобрений, соответствующих отечественным и зарубежным нормативным требованиям.

Таблица 8. Фитотоксичность компостных смесей после аэробной переработки в буртах (45-суточная переработка)

Вариант	Общее количество семян, шт.	Всхо- жость, %	Общая длина корней	Средняя длина од- ного корня	+/- к кон- тролю	к кон- тролю	Ток- сич- ность
				см		%	
Контроль (дистиллиро- ванная Н ₂ О)	50	85.0	130	2.9	—	100	—
<i>ОСВ</i> + торф	50	89.0	140	3.4	+0.5	117	—
<i>ОСВ</i> + торф + Бамил	50	89.0	179	3.8	+0.9	131	—
<i>ОСВ</i> + торф + птичий помет	50	91.0	182	4.1	+1.2	141	—

Таблица 9. Фитотоксичность компостных смесей после их активной аэрации в ферментационной камере

Вариант	Общее количество се- мян, шт.	Всхо- жость, %	Общая длина корней	Средняя длина од- ного корня	+/- к кон- тролю	к кон- тролю	Ток- сич- ность
				см		%	
Контроль (дистиллиро- ванная Н ₂ О)	50	85.0	130	2.9	—	100	—
<i>ОСВ</i> + торф	50	90.0	142	3.3	+0.4	114	—
<i>ОСВ</i> + торф + Бамил	50	92.0	184	3.9	+1.0	135	—
<i>ОСВ</i> + торф + птичий помет	50	90.0	146	4.2	+1.3	145	—

Традиционная и интенсивная переработки в буртах и в ферментационной установке сопровождались потерями в компостных смесях органического вещества, общего и аммонийного азота. Более высокие их потери в буртах, вероятно, были обусловлены большей длительностью переработки, пролонгацией биотермических процессов в мезофильном режиме при температурах 25–30°C.

Применение птичьего помета в условиях интенсивной аэрации в ферментационной установке способствовало активации биотермических процессов. Длительная переработка компостной смеси при температурах, превышающих 55°C, обеспечила ее гарантированное обеззараживание и производство биокомпостов, соответствующих требованиям ГОСТ Р 55570, ГОСТ Р 54651.

Традиционная аэробная переработка в буртах не оказала влияния на содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов в компостных смесях. В условиях интенсивной аэрации отмечено избирательное повышение содержания подвижных форм тяжелых металлов (меди, цинка, свинца) в компостных смесях, что не сопровождалось увеличением их токсичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курганова Е.В., Копейкина Л.И., Гюнтер Л.И., Беляева С.Д. Комплексная оценка осадков сточных вод // *Агрохим. вестн.* 1999. № 3. С. 38–40.
2. Носовская И.И., Соловьев Г.А., Егоров В.С. Влияние длительного систематического применения различных форм минеральных удобрений и навоза на накопление в почве и хозяйственный баланс кадмия, свинца, никеля и хрома // *Агрохимия*. 2001. Т. 1. С. 82–91.
3. Wang X. Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials // *Bioresource technol.* 2015. V. 198. P. 395–402.
4. РД-АПК 1.10.15.02-17. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. М.: МСХ РФ, 2020. 180 с.
5. Методы анализов органических удобрений / Под ред. А.И. Еськова. М.: РСХА, ВНИПТИОУ, 2003. 552 с.
6. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. URL: <https://base.garant.ru/400289764/>
7. МР ФЦ/4022 от 24.12.2009. Метод. рекоменд. 4.1. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200087788>
8. ГОСТ Р 55570-2013 Удобрения органические. Биокомпосты. Технические условия. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55558/>
9. ГОСТ Р 54651-2011 Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 15 с.
10. Регламент Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2019/1009 от 5 июня 2019 г. “Об установлении правил размещения удобрений на рынке ЕС и об изменении Регламентов (ЕС) 1069/2009 и (ЕС) 1107/2009, а также об отмене Регламента (ЕС) 2003/2003”. URL: <https://base.garant.ru/74313554/>
11. Нормативные требования к компостам // CBio.ru. URL: <http://cbio.ru/page/50/id/3958/htm>
12. Инструкция по лабораторному контролю очистных сооружений на животноводческих комплексах, утв. МСХ СССР 17.11.1982 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200043585>
13. МУК 4.2.3261-15 Методические указания. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Определение количества микроорганизмов в пищевых продуктах и объектах окружающей среды методом наиболее вероятного числа с применением автоматического экспресс-анализатора. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200126316>
14. Ветеринарно-санитарные правила подготовки к использованию в качестве органических удобрений навоза, помета и стоков при инфекционных и инвазионных болезнях животных и птиц, утв. Департаментом ветеринарии Минсельхозпрод России, 1997 г. URL: <https://fsvps.gov.ru/files/veterinarno-sanitarnye-pravila-podg/>
15. ГОСТ Р 53218.2008 Удобрения органические. Атомно-абсорбционный метод определения содержания тяжелых металлов. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/583/4293829025.pdf>
16. СанПиН 2.1.7.573-96 Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293825/4293825376.pdf>
17. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://normativ.su/catalog/standart/1001/950531/>

18. МУК 4.1.1471-03 Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в почвах и твердых минеральных материалах.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034850>
19. ГОСТ Р ИСО 18763-2019 Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200166928>
20. Соколов М.С., Жариков Г.А., Соколова Л.М. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству агрохимикатов при их государственной регистрации // Агро XXI. 2003. № 1–6. С. 138–142.
21. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.
URL: <https://base.garant.ru/400289764/>

Environmentally Friendly Methods and Technologies of Bioconversion of Organic Wastes from Agro-Industrial Complex for Production of New Types of Organic Fertilizers

T. Yu. Anisimova^{a, #}, S. I. Tarasov^a

^a*All-Russian Scientific Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – branch of the Verkhnevolzhsky FASC, ul. Pryanishnikova 2, s. Vyatkins, Sudogodsky district, Vladimir region 601390, Russia*

[#]*E-mail: anistan2009@mail.ru*

The effectiveness of the use of traditional and intensive technologies for the aerobic processing of compost mixtures based on sewage sludge (SS), peat and activators of biothermal processes was studied. It was found that the recycling of waste in clamps using traditional technology did not provide high-temperature sanitation of compost mixtures. Intensive aerobic processing in fermentation chambers activated biothermal processes, ensured reliable disinfection of the compost mixture, which included bird droppings, soil, peat. The production of biocompost met the requirements of GOST R 55570, GOST R 54651, EU Regulation No. 2019/1009, the National standard of Canada CAN/BNQ 0413-200. In comparison with processing in clamps, intensive aeration carried out in an extremely short time was accompanied by lower losses in compost mixtures of organic matter, nitrogen (by an average of 10%), an increase in the content of mobile potassium, selective accumulation of mobile forms of heavy metals (copper, zinc, lead), which did not affect phytotoxicity of biocompost.

Keywords: bird droppings, peat, sewage sludge, microbial fertilizers, compost mixtures, accelerated composting, temperature regimes, biocompost.

УДК 632.122.1:546.56:633.11“321”:631.461

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ К ТОКСИЧНОСТИ МЕДИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РОСТСТимулирующих РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ МЕТАЛЛОМ ПОЧВЕ[§]

© 2024 г. В. П. Шабает^{1,*}, В. Е. Остроумов¹¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: vpsh@rambler.ru

В вегетационном опыте исследовано влияние применения ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост растений яровой пшеницы при искусственном загрязнении агросерой почвы медью в повышенной концентрации. Установлено повышение устойчивости растений к токсическому действию металла при внесении бактерий. Определены элементный химический состав растений и накопление Cu и биофильных элементов N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn и Mn в вегетативной массе и корнях. Положительное действие бактерий на рост растений при загрязнении почвы Cu обусловлено увеличением поступления в растения питательных элементов из почвы, содержания и накопления металла в корнях, что свидетельствовало об ответной протекторной реакции растений на загрязнение почвы Cu. Бактерии увеличили вынос Cu вегетативными органами растений из загрязненной почвы – усилили фитоэкстракцию без изменений реакции почвенной среды.

Ключевые слова: бактерии *Pseudomonas*, *Triticum aestivum* L., Cu(NO₃)₂·3H₂O, агросерая почва, биомасса, химический состав растений.

DOI: 10.31857/S0002188124090087, **EDN:** CCOENF

ВВЕДЕНИЕ

Медь (Cu) является одним из биологически значимых и необходимых элементов для растений [1], однако при повышенных концентрациях может оказывать токсическое действие [2–4]. В избыточных концентрациях Cu негативно влияет на рост растений, ингибирует фотосинтез и физиологические процессы в растениях и уменьшает урожай [2]. Фитотоксичность загрязненной Cu почвы, которая, как правило, приводит к нарушению физиолого-биохимических процессов в растениях, проявляется в снижении количества и качества величины биомассы растений [2–4]. Влияние загрязнения почвы Cu на растения и биохимические показатели растений зависело от дозы внесенного металла, вида растения и типа почвы [3, 4]. Избыточное содержание в почве доступных соединений тяжелых металлов (ТМ), оказывая негативное влияние на основные физиолого-биохимические

процессы в растениях, может приводить в том числе к нарушению поступления в них биофильных элементов [5–7].

Для восстановления загрязненных ТМ почв используют процесс биоремедиации, который включает в себя применение микроорганизмов, растений и ассоциированных с растениями микроорганизмов [8, 9]. Биоремедиация является экономически выгодным и эффективным методом восстановления почв [9–11]. Применение стимулирующих рост растений ризосферных бактерий играет важную роль в повышении толерантности растений к токсическому действию повышенных концентраций в почве ТМ [12]. Кроме того, процесс фиторемедиации, основанный на применении растений, является одним из лучших способов удаления загрязнителей, в том числе ТМ из почвы, эффективность которого усиливается при совместном использовании растений с ризобактериями [12]. Бактерии, принадлежащие к роду *Pseudomonas*, привлекают особое внимание из-за их огромных возможностей по усилению роста и развития растений как в нормальных, так и стрессовых условиях, в том числе при загрязнении почв

[§] Работа выполнена в рамках госзадания “Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно измененных почвах”, АААА-А18-118013190180-9 и ААА-А18-118013190181-6.

ТМ [13, 14]. Сообщают, что *Pseudomonas* обладают высокой устойчивостью к металлам и способностью к биоремедиации, в том числе в ассоциациях с различными видами растений [8]. Установлены значительная стимуляция роста растений подсолнечника и увеличение поглощения Си вегетативной биомассой и корнями после инокуляции бактерией *P. lurida* штаммом ЕОО26 на фоне загрязнения почвы $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ [15]. Однако в настоящее время по-прежнему недостаточно изучены механизмы детоксикации ТМ в ризосфере при внесении эффективных ризосферных бактерий. Установлено, что стимулирование роста растений при загрязнении почвы Си при применении бактерий рода *Pseudomonas* происходит в том числе вследствие улучшения минерального питания растений [5–7]. Исследований влияния вышеупомянутых бактерий на рост, минеральное питание растений при загрязнении почвы Си проведено относительно недостаточно.

Цель работы – изучение влияния ростостимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост растений яровой пшеницы и элементный химический состав растений, включая содержание в них Си, при загрязнении почвы металлом в повышенной концентрации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Растения яровой пшеницы *T. aestivum* L. сорта Злата (селекция Московского НИЦ “Немчиновка”) выращивали на агросерой почве юга Московской обл. в вегетационном опыте при искусственном загрязнении почвы водорастворимым соединением Си. В сосудах, содержащих 0.8 кг почвы, выращивали по 9 растений до фазы выхода в трубку в течение 27 сут. В контрольном варианте растения выращивали без внесения Си и бактерий, в другом варианте – с внесением Си без бактерий, в остальных вариантах – на фоне загрязнения почвы Си с внесением каждой бактерии. В вариантах с загрязнением Си вносили 300 мг/кг в виде $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ квалификации “хч” (Реахим, Россия). Это соответствовало 2.3 ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) для данного типа почв [16]. С этой солью было внесено 106 мг N/сосуд, поэтому в контрольном варианте (без внесения $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и бактерий) применяли азот в виде NH_4NO_3 в такой же дозе, какая была использована в загрязненных вариантах. Таким образом, доза азота была выровнена и одинакова во всех вариантах опыта. Растения во всех вариантах выращивали на фоне внесения РК-удобрений в виде однозамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия по 106 мг д.в./сосуд, исходя из соотношения N : P : K = 1 : 1 : 1. Все соли были внесены за 10 сут до посева семян. В работе испытывали влияние бактерий,

стимулирующих рост и повышающих урожай различных культурных: бактерии *P. fluorescens* штамм 20, бактерии *P. fluorescens* штамм 21 и бактерии *P. putida* штамм 23 на накопление биомассы растениями, содержание в них Си и других биогенных элементов [17]. При посеве стерилизованные, пророщенные семена раскладывали на почву, инокулировали водными суспензиями чистых культур бактерий в водопроводной воде из расчета 10^8 клеток/растение и засыпали 3-см слоем почвы. В вариантах без внесения бактерий применяли аналогичным образом адекватное количество автоклавированных бактериальных суспензий. В опыте была использована пахотная, среднесуглинистая агросерая почва (Luvic Retic Greyzem-ic Phaeozems (Loamic), слой 0–20 см), на которой в предшествующий год выращивали ячмень. Почва имела следующие показатели: pH_{KCl} 6.14, $\text{C}_{\text{орг}}$ – 0.95%, $\text{N}_{\text{вал}}$ – 0.15%, обменные основания Ca – 11.06, Mg – 1.52, K – 0.45 м/моль(+), подвижные P_2O_5 и K_2O (0.2 н. HCl) – 7.37 и 11.2 мг/100 г почвы соответственно. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{вал}}$ в почве определяли на анализаторе vario EL cube 19.10-0000 (Германия), pH_{KCl} – на pH-метре pH 325-B (WTW, Германия). Влажность почвы в сосудах в течение вегетационного периода поддерживали поливами на уровне $\geq 60\%$ ПВ (21 мас.%). Повторность опыта четырехкратная.

Вегетативную массу растений убирали в фазе трубкования, корни отмывали от почвы водопроводной, а затем промывали дистиллированной водой. Растительный материал сушили при 70°C и взвешивали. Вегетативную массу и корни (по 0.5 г) озоляли в смеси концентрированных кислот $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 = 2 : 1$ и анализировали на содержание Си и P, K, Ca, Mg, Fe, Mn и Zn. Содержание Си и других зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP-OES 5110 (Agilent, США). Калий определяли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP (BWB, Великобритания), pH – на приборе pH 325-B (WTW, Германия). После сжигания растительного материала (0.1 г) в разбавленной серной кислоте (1 : 2) с катализатором ($\text{K}_2\text{SO}_4 : \text{Zn} : \text{Se} : \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 100 : 24 : 2 : 0.2$) определяли содержание в растениях валового азота феноловым методом. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При загрязнении почвы Си установлено ингибирование роста яровой пшеницы в фазе выхода в трубку (табл. 1).

Это выражалось в уменьшении массы вегетативных органов и целых растений на 24–26% относительно контроля – варианта без загрязнения металлом и внесения бактерий. Масса корней в условиях Си-стресса уменьшилась в еще большей степени – на 33%. Применение всех бактерий уменьшало токсическое действие металла на растения. При внесении бактерий вегетативная масса растений, подвергнутых Си-стрессу, была на 13–16% больше в сравнении с вариантом с загрязнением почвы металлом без внесения бактерий. Бактерии при загрязнении Си также способствовали лучшему росту корневой системы – масса корней загрязненных растений в вариантах со всеми бактериями увеличилась на 20–24%. При применении бактерий вегетативная масса растений достигала 86–88% в сравнении с незагрязненными инокулированными растениями – контролем, а корневая масса составляла 80–84%.

В табл. 2 представлено содержание Си в растениях. Загрязнение Си почвы как без, так и при внесении бактерий существенно, до полутора раз увеличилось значения этого показателя в вегетативной массе.

При загрязнении почвы Си его содержание в корневой системе увеличилось в значительно большей степени, чем в вегетативной массе. В варианте без внесения бактерий этот показатель увеличился в 17 раз, при внесении бактерий – в 18–19 раз по сравнению с контролем. Относительно варианта с загрязнением Си без бактерий содержание металла в корнях при инокуляции

P. fluorescens 20 увеличилось на 14, при применении *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 – в виде тенденции – на 10–11%. В корнях вне зависимости от внесения бактерий содержалось более чем на порядок больше Си, чем в надземной биомассе.

Загрязнение почвы Си без внесения бактерий не оказывало влияния на потребление или вынос металла (в мкг/сосуд) вегетативной массой из почвы относительно контроля (табл. 3).

Применение бактерий в загрязненных условиях увеличило этот показатель для вегетативной массы растений на 21–30%, в наибольшей степени в варианте с *P. fluorescens* 21 в сравнении с вариантом с загрязнением металлом без бактерий. Таким образом, внесение бактерий усилило фитоэкстракцию – очистку загрязненной почвы. При загрязнении почвы Си наиболее значительно увеличился вынос металла корневой системой: в варианте без бактерий – в 11 раз, в вариантах с бактериями – в 14–15 раз относительно контроля. Под влиянием бактерий вынос Си корнями в загрязненных условиях увеличился на 32–39%, аналогичные закономерности отмечены и для целых растений: соответственно 4- и 6-кратное увеличение и увеличение на 32–36%. Потребление Си корнями было более чем на порядок больше в сравнении с вегетативной биомассой вследствие значительно большего содержания металла в корневой системе.

Таблица 1. Биомасса растений яровой пшеницы в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни	Целое растение
	сухое вещество, г/сосуд		
Без Си и внесения бактерий – контроль	2.65	0.61	3.26
Си без внесения бактерий	2.01	0.41	2.42
Си + <i>P. fluorescens</i> 20	2.32	0.50	2.82
Си + <i>P. fluorescens</i> 21	2.28	0.49	2.77
Си + <i>P. putida</i> 23	2.33	0.51	2.84
НСП ₀₅	0.26	0.08	0.34

Таблица 2. Содержание Си в растениях в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни
	содержание Си, мг/кг растительного материала	
Без Си и внесения бактерий – контроль	11	24
Си без внесения бактерий	15	399
Си + <i>P. fluorescens</i> 20	15	456
Си + <i>P. fluorescens</i> 21	17	441
Си + <i>P. putida</i> 23	15	440

Примечание. Ошибки определения содержания Си не превышали 15%.

Таблица 3. Потребление Cu растениями в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни	Целое растение
	потребление Cu, мкг/сосуд		
Без Cu и внесения бактерий – контроль	29	15	143
Cu без внесения бактерий	30	164	194
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	35	228	263
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	39	216	2555
Cu + <i>P. putida</i> 23	35	224	259
HCP ₀₅	4	31	40

В табл. 4 представлены данные по содержанию биофильных элементов в растениях в фазе трубкования после завершения опыта.

Загрязнение почвы Cu вне зависимости от внесения бактерий оказало влияние на содержание отдельных элементов в растениях, что свидетельствовало о влиянии повышенной концентрации Cu на метаболические процессы в растениях. В загрязненных условиях без внесения бактерий относительно контрольного варианта в вегетативной массе уменьшилось содержание N и P, напротив, увеличилось содержание K и Ca и не обнаружено значимых изменений этого показателя для остальных элементов. В корнях загрязненных неинкубированных растений эти зависимости сохранялись, кроме значительного уменьшения содержания в них K, в отличие от вегетативной массы. В загрязненных растениях вне зависимости от внесения бактерий уменьшилось содержание фосфора как в вегетативной массе, так и в корнях. Отмечено проявление антагонизма меди и фосфора, что, вероятно, было связано со свойством избыточных концентраций Cu ингибировать в растениях активность фермента фосфатазы, определяющей доступность фосфора растениям [18]. Увеличение концентрации K и Ca в растениях в загрязненных вариантах могло быть связано с возрастанием подвижности этих элементов в почве при внесении в почву высокой дозы Cu, а также значимым при этом уменьшением массы растений и возможным нарушением механизмов поглощения ими элементов. Внесение всех бактерий при загрязнении почвы Cu по сравнению с вариантом без бактериальных инокуляций в загрязненных условиях не оказало существенного влияния на содержание в вегетативных органах и корнях практически всех изученных биофильных элементов, за исключением достоверного увеличения этого показателя для K в обеих частях растений.

При загрязнении почвы Cu без применения бактерий установлено значительное уменьшение поглощения из почвы или накопления вегетативной массой и целыми растениями практически всех исследованных элементов, за исключением Ca и K,

для которых этот показатель не был подвергнут значительным изменениям (табл. 5). В корнях в условиях Cu-стресса без применения бактерий зафиксировано уменьшение накопления всех элементов. Внесение данных бактерий в загрязненных условиях значительно увеличило потребление всех биофильных элементов растениями в сравнении с вариантом загрязнения Cu без применения бактерий. Эта закономерность была обнаружена как для вегетативной массы, так и для корневой системы. Уменьшение токсического действия Cu и увеличение при этом биомассы инокулированных бактериями растений (табл. 1) несомненно было связано с увеличением потребления биофильных элементов растениями из почвы – улучшением их минерального питания. В нашем исследовании бактерии не обеспечили увеличения потребления питательных элементов загрязненными металлом растениями до уровня в контрольном варианте. Следует отметить, что в корнях во всех вариантах опыта накапливалось примерно на порядок больше Fe, чем в вегетативной массе, что, вероятно, было обусловлено биологическими особенностями яровой пшеницы. Аналогичная закономерность была ранее установлена для этой культуры в фазе трубкования [7]. Увеличение потребления биофильных элементов растениями из загрязненной почвы при внесении всех бактерий происходило без существенных изменений в растениях содержания в целом практически всех биофильных элементов вследствие стимуляции роста растений и увеличения растительной биомассы. Стимуляция роста растений под влиянием бактерий рода *Pseudomonas* происходит в том числе вследствие продуцирования ими физиологически активных веществ – фитогормонов, в частности, индолилуксусной кислоты [19], что также было обнаружено нами в предыдущих исследованиях [20].

При загрязнении почвы Cu в вариантах с внесением бактерий после удаления растений в фазе трубкования по сравнению с вариантом с загрязнением почвы без внесения бактерий не установлено значимых изменений реакции почвенной среды (табл. 6), которая, как известно, оказывает

Таблица 4. Содержание биофильных элементов в растениях в фазе трубкования

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	%					мг/кг		
Вегетативная масса								
Без Cu и внесения бактерий – контроль	4.21	0.51	3.76	0.92	0.27	113	54	33
Cu без внесения бактерий	3.90	0.40	4.49	1.23	0.26	106	57	26
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	3.99	0.40	4.94	1.19	0.27	112	57	25
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	4.21	0.42	4.99	1.24	0.28	110	58	28
Cu + <i>P. putida</i> 23	4.01	0.38	4.83	1.18	0.27	105	54	25
Корни								
Без Cu и внесения бактерий – контроль	2.74	0.46	1.74	1.10	0.51	0.58	187	89
Cu без внесения бактерий	2.14	0.35	1.19	1.56	0.55	0.50	176	70
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	2.14	0.36	1.33	1.63	0.62	0.60	201	75
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	2.30	0.39	1.51	1.37	0.58	0.55	195	72
Cu + <i>P. putida</i> 23	2.25	0.38	1.35	1.47	0.50	0.57	189	77

Примечания. 1. Содержание Fe в корнях дано в %. 2. Средние из четырех повторностей опыта. Ошибки определений макро- и микроэлементов в вариантах опыта не превышали соответственно 5 и 15 %.

Таблица 5. Потребление биофильных элементов растениями в фазе трубкования

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	мг/сосуд				мкг/сосуд			
Вегетативная масса								
Без Cu и внесения бактерий — контроль	112	14	100	24	715	300	143	88
Cu без внесения бактерий	78	8	90	25	522	213	115	52
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	93	9	115	28	626	260	132	58
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	96	10	114	28	638	251	132	64
Cu + <i>P. putida</i> 23	94	9	113	28	629	245	126	58
<i>HCP</i> ₀₅	12	1	20	3	89	30	10	6
Корни								
Без Cu и внесения бактерий — контроль	17	3	11	7	311	3580	114	54
Cu без внесения бактерий	9	1	5	6	226	2050	72	29
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	11	2	7	8	310	3000	101	38
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	11	2	7	7	284	2700	96	35
Cu + <i>P. putida</i> 23	12	2	7	8	255	2910	96	39
<i>HCP</i> ₀₅	2	1	1	1	25	512	17	7
Целое растение								
Без Cu и внесения бактерий — контроль	129	17	111	31	1070	3880	257	142
Cu без внесения бактерий	87	9	95	31	748	2260	187	81
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	104	11	122	36	936	3260	233	96
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	107	12	121	35	922	2950	228	99
Cu + <i>P. putida</i> 23	108	11	120	35	884	3150	222	97
<i>HCP</i> ₀₅	14	2	15	4	110	460	34	13

Таблица 6. Реакция почвенной среды после выращивания растений (фаза трубкования)

Вариант	pH _{KCl} почвенной суспензии
Без Cu и внесения бактерий – контроль	6.14 ± 0.02
Cu без внесения бактерий	6.17 ± 0.02
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	6.19 ± 0.07
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	6.14 ± 0.07
Cu + <i>P. putida</i> 23	6.20 ± 0.05

Примечание. Средние 4-х повторностей опыта ± отклонение от среднего.

значительное влияние на подвижность химических элементов в почве.

Загрязнение почвы Cu без бактериальных инокуляций также не оказывало значимого влияния на данный показатель. Следовательно, увеличение аккумуляции Cu в растениях – усиление фитоэкстракции под влиянием бактерий – происходило без существенных изменений реакции почвенной среды и, вероятно, было обусловлено продуцируемыми бактериями органическими экзометаболитами – сидерофорами, свойственными флуоресцирующим видам *Pseudomonas* [14, 19, 21]. Увеличение поступления Cu в растения при внесении ризосферных бактерий, вероятно, было связано с увеличением биодоступности металла в почве вследствие образования бактериальных сидерофоров.

ВЫВОДЫ

1. Внесение ростостимулирующих ризосферных бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 в искусственно загрязненную Cu агросерую почву в дозе 300 мг/кг почвы уменьшило фитотоксичность Cu в фазе трубкования, стимулировало рост растений яровой пшеницы и увеличило массу вегетативных органов и корней. Применение бактерий не устраняло полностью токсическое действие на растения металла, внесенного в повышенной концентрации.

2. Внесение бактерий в загрязненную Cu почву значительно увеличило потребление, или вынос, металла вегетативной массой растений из почвы – усилило фитоэкстракцию в максимальной степени при применении *P. fluorescens* 21. Загрязнение почвы Cu вне зависимости от бактерий увеличило концентрацию металла в вегетативной массе растений.

3. Повышение устойчивости растений к токсическому действию Cu при внесении бактерий было обусловлено улучшением минерального питания растений – увеличением потребления вегетативной массой и корневой системой из загрязненной почвы макроэлементов N, P, K, Ca и Mg, Fe и микроэлементов Mn и Zn и содержания и накопления Cu в корнях. Это свидетельствовало об ответной протекторной реакции растений на загрязнение почвы Cu.

4. Увеличение потребления изученных биофильных элементов растениями яровой пшеницы из загрязненной почвы при внесении бактерий происходило вследствие стимуляции роста и увеличения растительной биомассы, без существенных изменений в целом содержания практически всех элементов в растениях, за исключением содержания K.

5. Загрязнение почвы Cu без внесения бактерий уменьшило потребление растениями большинства биофильных элементов и ингибировало рост растений.

6. Внесение бактерий в загрязненных условиях не сопровождалось значимыми изменениями реакции почвенной среды.

Авторы благодарят ЦКП ИФХиБПП РАН за выполнение химических анализов почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: СО РАН, 2012. 220 с.
2. Демидчик В.В., Соколик А.И., Юрин В.М. Токсичность избытка меди и толерантность к нему растений // Усп. совр. биол. 2001. Т. 121. № 5. С. 511–525.
3. Цыгвинцев П.Н., Гончарова Л.И., Рачкова В.М. Ответная реакция ячменя в онтогенезе на загрязнение почв медью // Усп. совр. естествознания. 2018. № 11. С. 305–310.
4. Гончарова Л.И., Цыгвинцев П.Н., Манин К.В. Реакция различных культур на загрязнение почвы медью // Агрохимия. 2018. № 4. С. 88–94. DOI: 10.7868/S0002188118040129
5. Шабает В.П. Почвенно-агрохимические аспекты ремедиации загрязненной свинцом почвы при внесении стимулирующих рост растений ризосферных бактерий // Почвоведение. 2012. № 5. С. 601–611.
6. Шабает В.П., Бочарникова Е.А., Остроумов В.Е. Ремедиация загрязненной кадмием почвы при применении стимулирующих рост растений ризобактерий и природного цеолита // Почвоведение. 2020. № 6. С. 738–750. DOI: 10.31857/S0032180X20060118

7. Шабает В.П., Остроумов В.Е. Почвенно-агрохимические аспекты ремедиации загрязненной никелем почвы при применении ростстимулирующих ризосферных бактерий // Почвоведение. 2023. № 2. С. 226–239.
DOI: 10.31857/S0032180X22600925
8. Saha L., Tiwari J., Baudh K., Ma Y. Recent developments in microbe–plant–based bioremediation for tackling heavy metal-polluted soils. Review article // Front. Microbiol. Sec. Microbiotechnol. 2021. V. 12. Dec 23:12:731723.
DOI: 10.3389/fmicb.2021.731723
9. Ojha S., Jaiswal S., Thakur P., Mishra S.K. Bioremediation techniques for heavy metal and metalloid removal from polluted lands: a review // Inter. J. Sci. Technol. 2023. V. 20. P. 10591–10612.
DOI: 10.1007/s13762-022-04502-3
10. Singh S.N., Goyal S.K., Singh S.R. Bioremediation of heavy metals polluted soils and their effect on plants // Agriways. 2015. V. 3. № 1. P. 19–24.
11. Singh P.K. Effect of soil polluted by heavy metals: Effect on plants, bioremediation and adaptive evolution in plants // Plant Responses to Soil Pollution / Eds. Singh P., Singh S.K., Prasad S.M. 2020. P. 89–102.
DOI: 10.1007/978-981-15-4964-9_5
12. Nadeem N., Asif R., Ayyub S., Salman S., Shafique F., Ali Q., Malik A. Role of rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals. Review Article // Biol. Clinic. Sci. Res. J. (Biol. Clin. Sci. Res. J.). 2020. V. 35. P. 1–5.
DOI: 10.54112/bcsrj.v2020i1.35
13. Nadeem S., Naveed M., Ayyub M., Khan M.Y., Ahmad M., Zahir Z.A. Potential, limitations and future prospects of *Pseudomonas* spp. for sustainable agriculture and environment: A Review // Soil Environ. 2016. V. 35. № 2. P. 106–145.
14. Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review // Inter. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 2017. V. 6. № 7. P. 1335–1344.
DOI: 10.20546/ijcmas.2017.602.160
15. Kumar A., Tripti C., Voropaeva O., Maleva M., Panikovskaya K., Borisova G., Rajkumar M., Bruno L.B. Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas purida* strain EOO26 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus* // Chemosphere. 2021. V. 266. 128983.
DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128983
16. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2042-06. М.: Фед. центр гигиены и эпидемиол. Роспотребнадзора, 2006. 11 с.
17. Шабает В.П. Микробиологическая азотфиксация и рост растений при внесении ризосферных микроорганизмов и минеральных удобрений // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. М.: Наука, 2006. С. 195–211.
18. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 548 p.
DOI: 10.1201/b10158
19. Ullah A., Heng S., Munis M.F.H., Fahad S., Yang X. Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: A review // Environ. Exp. Bot. 2015. V. 117. P. 28–40.
20. Олюнина Л.Н., Шабает В.П. Продукция индолил-3-уксусной ризосферными бактериями рода *Pseudomonas* в процессе роста // Микробиология. 1996. Т. 65. № 6. С. 813–817.
21. Seraj F., Rahman T. Heavy metals, metalloids, their toxic effect and living systems // Am.J. Plant Sci. 2018. V. 9. № 13. P. 2626–2643.
DOI: 10.4236/ajps.2018.913191

Increasing of Spring Wheat Plant Resistance to Copper Toxicity by Application of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Metal-Contaminated Soil

V. P. Shabayev^{a, #}, V. E. Ostroumov^a

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

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

Effects of plant growth-promoting rhizobacteria of the *Pseudomonas* genus application on growth of spring wheat plants was studied in pot experiment on agrogrey soil artificially contaminated with Cu in increased concentration. Increasing of plants resistance to metal toxicity by application of bacteria was found. Chemical composition of plants and uptake of Cu and biophilic elements N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn and Mn by shoots and roots were determined. Positive effect of bacteria on plant growth in contamination of soil with Cu is due to increase in nutrient uptake by plants from soil, concentration and accumulation of metal in roots that indicates protective response reaction of plants to soil contamination with Cu. Bacteria increased Cu uptake by plant shoots from contaminated soil – enhanced phytoextraction without changes in soil medium reaction.

Keywords: bacteria *Pseudomonas*, *T. aestivum* L., $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, agrogrey soil, chemical composition of plants.

УДК 631.417.1:631.433.3

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМИССИИ CO₂[§]

© 2024 г. И. Н. Шарков^{1,*}, А. С. Чумбаев¹, В. А. Андроханов¹¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

*E-mail: humus3@yandex.ru

Повышенный интерес в настоящее время к количественной оценке дыхания почвы во многом обусловлен исследованиями роли различных наземных экосистем в изменении в атмосфере концентрации важнейшего парникового газа – CO₂. В обзоре рассмотрены методические аспекты определения фактической эмиссии CO₂ из почв с помощью камерного и абсорбционного методов, а также использования полученных данных для оценки складывающегося в почвах баланса углерода. Успешная разработка данной темы позволит оперативно получать ответ на главный вопрос этой злободневной экологической проблемы: чем является почва той или иной экосистемы для атмосферного CO₂ – нетто-источником или нетто-стоком? В статье проведен анализ результатов работ, посвященных сравнительному определению эмиссии CO₂ из почв данными методами. Показано, что распространенное мнение о получении абсорбционным методом заниженных данных зачастую основывается на исследованиях, в которых были нарушены базовые принципы этого метода. Сделан вывод о необходимости проведения углубленных сравнительных исследований по определению среднесуточных показателей эмиссии CO₂ из почвы камерным и абсорбционным методами. Признано, что, независимо от метода, главной проблемой использования данных продуцирования CO₂ для оценки баланса углерода в почве является адекватное разделение общего дыхания на гетеротрофную и автотрофную составляющие, соотношение между которыми изменяется в широких пределах в зависимости от состояния почвы и растительного покрова. Из-за несовершенства и трудоемкости существующих методов это разделение может обуславливать значительные ошибки в определении годовой минерализации органического вещества почвы. Для их снижения рассмотрен подход к определению минерализационных потерь CO₂ в парующихся почвах. Он естественен для почв агроценозов, но как методический прием, вероятно, может использоваться и в природных травяных экосистемах. Уменьшение ошибок может обеспечиваться благодаря тому, что различия в фактической минерализации органического вещества в парующихся и занятых растениями почвах кратно меньше, чем изменение соотношения между гетеротрофной и автотрофной составляющими дыхания почвы в различных биогеоценозах.

Ключевые слова: дыхание почвы, камерный метод, абсорбционный метод, баланс углерода в почве.

DOI: 10.31857/S0002188124090095, **EDN:** CCHBES

ВВЕДЕНИЕ

Эмиссия углекислого газа из почвы (дыхание почвы) является следствием происходящих в ней биологических процессов, связанных с разложением микроорганизмами органического вещества и жизнедеятельностью корней растений. Скорость эмиссии CO₂ издавна считается наиболее общим показателем биологической активности почвы и в последние десятилетия широко используется в почвенно-агрохимических и экологических исследованиях для оценки потоков и баланса углерода в естественных и антропогенно преобразованных экосистемах [1–7].

Согласно современным представлениям, общее дыхание почвы включает 3 основные составляющие: 1 – дыхание гетеротрофных микроорганизмов и почвенной фауны, 2 – дыхание автотрофов, 3 – дыхание ризосферных микроорганизмов [8–10]. Первая из них характеризует аэробные и анаэробные процессы минерализации собственно органического вещества почвы (**SOM**), т.е. гумуса и растительных остатков разной степени разложения. Эту составляющую иногда называют базальным дыханием, ее определяют в отсутствие живых корней растений и без добавления в почву питательных веществ [10–12]. Основным продуцентом CO₂ 2-й составляющей являются корни растений, использующие для своей

[§] Работа выполнена в рамках госзадания 122111000005-7.

жизнедеятельности текущие продукты фотосинтеза, транспортируемые по стеблю в почву. Часть этих продуктов в виде корневых выделений и отмирающих корневых волосков служит пищей для ризосферных микроорганизмов, представляющих 3-ю составляющую дыхания почвы. По справедливому замечанию [13], углекислый газ, который генерируется ризосферными микроорганизмами, следует также считать “автотрофным”, поскольку его происхождение, как и CO_2 живых корней, обусловлено текущей фотосинтетической деятельностью растений. По обобщенным данным [10], вклад ризосферных микроорганизмов в эмиссию CO_2 из почвы может быть довольно большим и превышать собственно корневое дыхание в 1.5 раза.

Таким образом, по источникам происхождения выделяющийся из почвы CO_2 , по большому счету, можно разделить на 2 главные составляющие: 1 – органическое вещество почвы, и 2 – текущие продукты фотосинтеза растений, обеспечивающие жизнедеятельность корней и ризосферных микроорганизмов.

При оценке баланса углерода в почве в расходную часть уравнения должно включать только CO_2 , который выделяется вследствие минерализации *SOM*. Углекислый газ, продуцируемый корнями растений и ризосферными микроорганизмами, имеет другой источник – CO_2 атмосферы. Включение его в расходную часть данного уравнения будет необоснованно завышать минерализационные потери *SOM*. Экспериментальное разделение общего дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие представляет главную проблему, возникающую при использовании показателя эмиссии CO_2 для оценки баланса углерода в почве. Поиск путей ее решения – одна из основных причин, которая побуждает исследователей разрабатывать методики для количественной оценки этих составляющих в общем дыхании почвы [13–19].

В настоящем обзоре освещена проблема использования показателя эмиссии CO_2 для оценки баланса углерода в почвах. Для почв биогеоценозов и агроценозов методические подходы могут различаться. Дело в том, что в отличие от естественных ценозов, где почва и растительный покров неразделимы, почва в агроценозах используется в полях севооборотов, каждое из которых с определенной периодичностью обычно поддерживается в парующем состоянии в течение всего вегетационного периода. Если измерять дыхание почвы в таком поле, то решение данной проблемы упрощается, поскольку практически весь выделяющийся CO_2 является продуктом минерализации *SOM*. Однако в почве без растений складываются особые условия для деятельности почвенных микроорганизмов, что затрудняет перенос полученных данных на другие (с растениями) поля севооборота. Этот аспект проблемы также рассмотрен в обзоре.

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДАМ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ CO_2 ИЗ ПОЧВЫ

Можно обозначить несколько требований к методу, чтобы полученные с его помощью данные эмиссии CO_2 из почвы можно было использовать для оценки баланса углерода в системе “почва–растительность–атмосфера” за длительный период – месяц, сезон или год. Во-первых, метод должен быть количественным, т.е. обеспечивать измерение фактической скорости потока CO_2 из почвы. Во-вторых, в процессе измерения не должны существенно изменяться факторы, влияющие на биологическую активность почвы. В противном случае фактическая скорость эмиссии CO_2 может отличаться от скорости продуцирования CO_2 , характерной в данное время для естественного (не нарушенного) состояния почвы. Наиболее важно, чтобы под влиянием процедуры измерения, особенно при длительных (несколько часов) экспозициях, существенно не изменялась температура почвы, поскольку она оказывает наиболее сильное влияние на активность почвенных микроорганизмов. Как показали результаты исследований [20–23], повышение температуры почвы на 1°C в диапазоне $5\text{--}30^\circ\text{C}$ интенсифицирует продуцирование ею CO_2 примерно на 7% (при $Q_{10} = 2$). В-третьих, поскольку в течение суток дыхание почвы, как правило, достаточно динамично [8, 24–27], метод должен позволять измерять (или рассчитывать) среднесуточную скорость эмиссии CO_2 из почвы, в том числе в холодные периоды, когда температура воздуха может опускаться $<0^\circ\text{C}$. Проводя измерения среднесуточной скорости с заданной частотой (например, 1 раз в неделю), можно путем линейного интерполирования рассчитывать суммарные за период наблюдения потери углерода из почвы в виде CO_2 [28, 29]. Наконец, в-четвертых, учитывая весьма высокую пространственную вариабельность скорости продуцирования CO_2 почвой, метод должен позволять одновременно вести измерения в различных вариантах опыта или площадках с достаточной повторностью.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ CO_2 ИЗ ПОЧВЫ

До настоящего времени не разработано общепризнанного стандартного метода определения дыхания почвы в полевых условиях. Многие десятилетия для этой цели используют в основном 2 группы методов, довольно давно получивших названия обогащения и абсорбции [1, 30]. В настоящее время метод обогащения чаще называют методом закрытых камер либо просто – камерным методом [23, 24, 31]. Суть его заключается в том, что камеру, чаще всего в форме цилиндра, врезают на определенную глубину в почву и на период экспозиции закрывают крышкой. Диффундирующий из почвы CO_2 накапливается

в надпочвенном пространстве камеры и по изменению концентрации газа, определяемой в настоящее время чаще всего с помощью портативных инфракрасных газоанализаторов, рассчитывают скорость его эмиссии. Иногда в процессе измерения с помощью миниатюрного насоса воздух прокачивают между камерой и газоанализатором либо просто пропускают через надпочвенную часть камеры, такой метод называют динамическим камерным методом [13, 32, 33]. Значительный толчок развитию камерного метода дало появление на рынке компактных высокоточных инфракрасных газоанализаторов [34], позволивших проводить измерения дыхания почвы при очень малых экспозициях — 1–2 мин, фиксируя посекундные изменения концентрации CO_2 в воздухе камеры [32, 35–37]. Благодаря таким газоанализаторам (например, LI COR 8100, США) со встроенными специальными программами появилась возможность рассчитывать скорость эмиссии углекислого газа из почвы, используя линейный интервал изменения его концентрации в воздухе камеры. Этим, по сути дела, был преодолен основной недостаток традиционного камерного метода — замедление скорости диффузии CO_2 из почвы по мере обогащения им надпочвенного пространства камеры. Налаженное зарубежными фирмами производство стандартного оборудования сделало камерный метод наиболее используемым в настоящее время для определения дыхания почвы в полевых условиях [38–42]. Тем не менее, разработка данного метода продолжается и поныне, в том числе с целью более глубокого понимания механизмов возникновения ошибок, обусловленных искажением естественного потока CO_2 из почвы в процессе измерения [23, 36, 42, 43].

В абсорбционном методе проблема накопления CO_2 в камере, которую по традиции будем называть сосудом-изолятором, или кратко — изолятором [44], решается путем использования поглотителя газа, которым чаще всего является раствор щелочи. При измерении в полевых условиях сосуд-изолятор врезают на небольшую глубину в почву, на ее поверхность помещают чашечку с раствором щелочи, и на период экспозиции изолятор закрывают крышкой. После экспозиции остаток щелочи в лаборатории оттитровывают кислотой и с учетом холостого определения рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 . Титрование может быть либо ручным, с использованием индикатора фенолфталеина, либо автоматическим, с помощью потенциометрического титратора. Количество поглощенного CO_2 можно также определять кондуктометрическим методом по изменению электропроводности раствора щелочи, но при этом требуется высокоточный контроль его температуры [37]. В России абсорбционный метод стал широко известным после появления методики определения биологической активности почвы по Штатнову [44, 45]. В целом этот метод отличается

простотой, использованием недорогого лабораторного оборудования, возможностью проведения определений с достаточной повторностью, что сделало его весьма популярным среди исследователей и объектом непрекращающегося по сей день совершенствования [1, 28, 30, 32, 33, 37, 46, 47].

К сожалению, ни камерный, ни абсорбционный методы полностью не удовлетворяют выше обозначенным требованиям. Можно полагать, что камерный метод при использовании современных инфракрасных газоанализаторов наиболее точно измеряет фактическую скорость эмиссии CO_2 из почвы в данный момент времени, поскольку в течение непродолжительных экспозиций (1–2 мин), когда камера закрыта крышкой, вряд ли могут существенно изменяться факторы, влияющие на биологическую активность почвы. Однако этим методом затруднительно определять среднесуточную скорость продуцирования CO_2 почвой (чтобы рассчитывать суммарные потери углерода за длительный период), а также одновременно вести наблюдения за эмиссией CO_2 при большом числе вариантов и повторностей. Для расчета на основе камерного метода среднесуточной скорости продуцирования CO_2 рекомендуется проводить измерения в определенные часы суток [24, 39, 48–50] или вносить поправки, учитывающие зависимость эмиссии CO_2 в течение суток от температуры почвы или воздуха [51, 52]. Разумеется, наиболее правильным решением является непосредственное экспериментальное определение внутрисуточной динамики дыхания почвы либо в ручном режиме [33], либо с помощью автоматических систем измерения [35].

Часть методик, разработанных на основе абсорбционного метода, рассчитана на проведение определений в том числе и при 24-часовой экспозиции, что позволяет рассчитывать месячную и сезонную эмиссию CO_2 из почвы, проводя измерения с определенной частотой, обычно не чаще 1 раза в неделю [28, 46, 53, 54]. При этом следует подчеркнуть одно важное преимущество абсорбционного метода, заключающееся в том, что один сотрудник может одновременно измерять среднесуточную скорость эмиссии CO_2 на различных почвенных фонах, используя 40–50 сосудов. Это позволяет проводить определения дыхания почвы в одно и то же время на многих площадках (вариантах опыта) при достаточной повторности. Однако этот метод нельзя использовать для измерения дыхания почвы при отрицательных температурах воздуха из-за возможного замерзания раствора щелочи. Поэтому при оценке баланса углерода в почве в целом за год эмиссию CO_2 в холодный период (ноябрь–апрель) следует определять либо камерным методом, либо рассчитывать на основе уравнений [25, 40], описывающих зависимость дыхания почвы от температуры.

У абсорбционного метода существует и другая проблема. Дело в том, что фактически этим методом измеряется не скорость продуцирования (образования) углекислого газа в почве, а скорость его поглощения раствором щелочи. Условием соответствия получаемых данных фактическому образованию CO_2 в почве является обеспечение в течение экспозиции равновесия потоков продуцирования и поглощения CO_2 , что в сущности равнозначно сохранению в сосуде-изоляторе естественного градиента концентрации CO_2 в системе “почвенный воздух–надпочвенный воздух” [23, 55]. Выполнение этого условия осложняется по нескольким причинам. Во-первых, для установления равновесия потоков в сосуде-изоляторе требуется определенное время, названное переходным периодом [55]. Он тем продолжительнее, чем больше объем надземной части изолятора и меньше поглотительная поверхность раствора щелочи. Задача сводится к подбору таких параметров сосуда-изолятора и поглотителя, при которых продолжительность этого периода в сравнении с экспозицией будет пренебрежимо малой. Во-вторых, под влиянием сосуда-изолятора может изменяться температура почвы [23, 55, 56], что, как уже отмечено, может оказывать влияние на скорость образования CO_2 . Наконец, в-третьих, практически сразу после начала измерения способность раствора щелочи поглощать углекислый газ начинает постепенно уменьшаться, что может приводить к его накоплению в надпочвенной части изолятора, т.е. занижению результатов, в том числе и за счет снижения скорости диффузии CO_2 из почвы [23, 36, 54, 57, 58].

Факт постепенного замедления скорости поглощения углекислого газа раствором щелочи хорошо

иллюстрируется при неограниченном к нему притоке CO_2 из воздуха (рис. 1).

Видно, что это замедление наблюдается на всем протяжении суточного периода и более выражено при меньших концентрациях раствора щелочи. Например, по отношению к экспозиции 0–3 ч скорость поглощения CO_2 0.8 н. NaOH в период 12–24 ч составила только 73, 0.4 н. NaOH – 61%. Следовательно, для измерения фактической эмиссии CO_2 в широком диапазоне биологической активности почвы диаметр сосуда-изолятора и экспозиция, определяющие количество диффундирующего CO_2 , должны определенным образом соответствовать параметрам поглотителя – поверхности, концентрации и объему раствора щелочи.

Таким образом, хотя некоторые модификации абсорбционного метода рассчитаны на определение среднесуточной скорости продуцирования CO_2 почвой, при этом возникают вопросы о соответствии получаемых данных фактическому дыханию почвы. Ответы на них можно получить только при проведении специальных исследований. Определенный интерес в этом отношении представляет аналитическое сравнение результатов измерения с данными других методов.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

На основе камерного и абсорбционного методов предложено немало методик (модификаций) определения продуцирования CO_2 почвой, поэтому, говоря о сравнении методов, следует иметь в виду, что на самом деле сравниваются различные их модификации. Это важно, поскольку существуют, на наш взгляд, не вполне удачные методики, и они не должны ассоциироваться с методом в целом.

Непосредственное сравнение результатов камерного и абсорбционного методов по скорости эмиссии CO_2 из почвы может быть затруднено из-за разницы в продолжительности экспозиции: в первом из них, как уже отмечено, она составляет от десятков секунд до нескольких минут, во втором – от 2–3 ч до 24 ч. Однако это затруднение легко преодолевается, если полученные данные использовать для оценки эмиссии углерода либо за сутки, либо за какой-либо период – месяц, сезон и т.д., и методы сравнивать между собой по этой суммарной эмиссии.

Наиболее часто в литературе встречается мнение, что данные, полученные абсорбционным методом, занижены [33, 46, 53, 59], значительно реже – завышены [32] либо соответствуют показателям камерного метода [37]. Также подчеркивают [27, 33, 36, 60], что заниженные показатели обычно регистрируются при повышенных уровнях дыхания почвы.

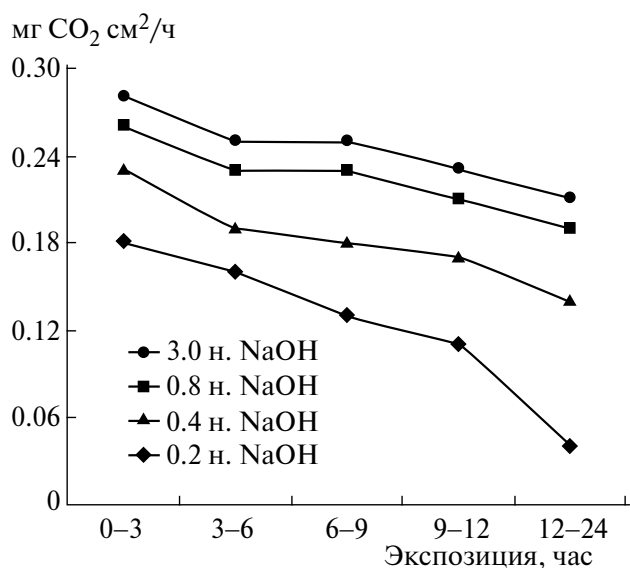


Рис. 1. Динамика поглощения CO_2 из воздуха растворами щелочи разной концентрации [57].

Результаты многих исследований свидетельствуют о том, что основная причина получения абсорбционным методом заниженных данных связана с неполным поглощением CO_2 раствором щелочи [23, 28, 54, 61–63]. Способность щелочи поглощать CO_2 при неизменных концентрации и объеме раствора определяется активной поверхностью последнего, или кратко – площадью поглотителя. Для обеспечения полноты абсорбции CO_2 , в особенности при повышенной интенсивности дыхания почвы, рекомендуется, чтобы площадь поглотителя находилась в пределах 20–25% от площади изоляции – поверхности почвы, накрываемой сосудом-изолятором [37, 53, 64, 65]. Также на основе анализа многих модификаций абсорбционного метода рекомендовано использовать 0.5–1.0 М растворы щелочи (NaOH или KOH), причем ее расход за экспозицию не должен превышать 35–40% [23, 61].

Сказанное позволяет более предметно анализировать причины различий данных, полученных разными методами при сравнительных исследованиях. В частности, в работе [33] авторы сравнивали абсорбционный и динамический камерный методы, причем в последнем воздух не циркулировал между камерой и газоанализатором, а его пропускали с небольшой скоростью через надземную часть камеры. Определения проводили в штате Флорида (США) на слабо дренированной песчаной почве. В феврале, при сравнительно низкой скорости эмиссии CO_2 из почвы ($\approx 200 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$), результаты обоих методов были близкими. Однако при повышении биологической активности почвы в весенне-летний период результаты абсорбционного метода оказались меньше, чем камерного, примерно в 2 раза (табл. 1).

По мнению самих авторов, эти различия могли быть обусловлены дополнительным выделением CO_2 из почвенного воздуха в камерном методе под влиянием движения воздуха через надпочвенное пространство камеры. Однако обращает на себя внимание не вполне удачная, по нашему мнению, модификация абсорбционного метода, которую использовали авторы. Во-первых, площадь поглотителя составляла всего лишь 9.6% от накрываемой сосудом площади поверхности почвы. Во-вторых, использовали слишком большой сосуд-изолятор (12.5 л), причем объем его надземной части в процессе измерения

составлял 9.2 л против 0.4–1.0 л в большинстве других модификаций абсорбционного метода. Можно полагать, что при низкой интенсивности дыхания почвы ($\approx 200 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$) концентрация CO_2 в надпочвенной части изолятора примерно соответствовала равновесной концентрации, при которой потоки “выделения CO_2 из почвы” и “поглощения CO_2 раствором щелочи” были уравновешены (оба метода показали близкие результаты). При увеличении интенсивности дыхания (табл. 1) в весенне-летний период в 3.2–4.3 раза (судя по камерному методу) для уравнивания этих потоков равновесная концентрация CO_2 в надпочвенной части сосуда-изолятора должна повыситься, как минимум, во столько же раз. По нашему мнению, это и явилось основной причиной занижения результатов. Во-первых, для достижения такой концентрации CO_2 в сосуде требуется определенное время, причем из-за достаточно большого объема изолятора оно оказалось, по-видимому, существенным для применявшейся авторами не слишком большой экспозиции – 6 ч. Во-вторых, кратное увеличение концентрации CO_2 в надпочвенном воздухе изолятора, безусловно, снизило скорость диффузии газа, о чем свидетельствовали исследования других авторов [58, 66].

В аналогичном исследовании [46] также сравнивали результаты, полученные динамическим камерным и абсорбционным методами. При этом площадь поглотителя – 2.0 М раствора NaOH в последнем составляла всего лишь 4% от площади почвы, накрытой изолятором. Столь маленькая поглотительная способность абсорбента CO_2 явилась, по-видимому, основной причиной получения данной модификацией заниженных данных, причем как при низкой, так и повышенной интенсивности дыхания почвы. Вполне ожидаемо, что при такой малой площади поглотителя абсолютные и относительные различия между методами увеличивались при повышении биологической активности почвы, например: камерный метод – 158, 475 и 790 $\text{мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$, абсорбционный – 100, 200 и 316 $\text{мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ соответственно.

В работе [37] абсорбционный метод сравнивали с динамическим камерным методом, причем у последнего камера функционировала в автоматическом режиме, измеряя поток CO_2 из почвы каждые 20 мин при экспозиции 2 мин. Площадь поглотителя

Таблица 1. Сравнительное определение эмиссии CO_2 из почвы камерным и абсорбционным методами, $\text{мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ [33]

Срок определения	Камерный метод	Абсорбционный метод	Абсорбционный метод по отношению к камерному, %
24 февраля	238	257	108
17 мая	854	374	43
16 июня	648	357	55
14 июля	864	423	49

в использованной модификации абсорбционного метода составляла 19% от площади изоляции почвы. Оба метода показали близкие результаты, однако при повышенной скорости эмиссии CO_2 из почвы ($670 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$) и экспозиции 24 ч абсорбционный метод показал занижение результата примерно на 11%. Авторы предположили, что увеличение площади поглотителя позволит уменьшить эту разницу.

О полноте поглощения CO_2 раствором щелочи можно судить не только на основании сравнения данных абсорбционного и камерного методов. В работе [28] это сделано на основании сопоставления результатов дыхания почвы, полученных при экспозиции 0–24 ч и в сумме при экспозициях 0–8 ч, 8–16 ч, 16–24 ч. В качестве изолятора использовали тонкостенную дюралюминиевую трубу с внутренним диаметром 10 см и высотой 15 см, заглубленную в почву на 5 см. Поглотителем CO_2 являлись 10 мл 1 н. раствора NaOH в бюксе диаметром 5 см, т.е. площадь поглотителя составляла 25% от площади изоляции почвы. Определения проводили после внесения в почву измельченных растительных остатков. Со временем, вследствие их частичной минерализации, интенсивность дыхания почвы уменьшалась, что позволило провести измерения при разных скоростях эмиссии CO_2 . В начале измерения суммарное поглощение CO_2 раствором щелочи при экспозиции 0–24 ч было примерно в 2 раза меньше суммы показателей, зарегистрированных при 0–8, 8–16 и 16–24 ч (рис. 2).

В дальнейшем различия сглаживались, и, начиная с интенсивности дыхания $\approx 220 \text{ мг CO}_2/24 \text{ ч}$, когда было израсходовано $\approx 50\%$ щелочи, исчезали.

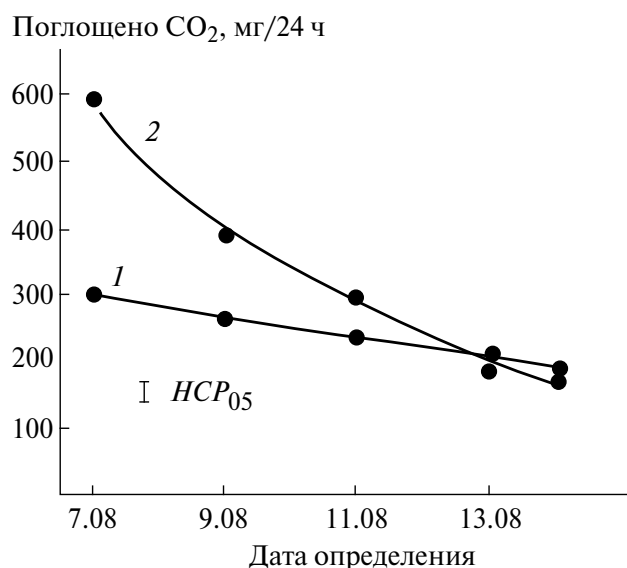


Рис. 2. Динамика поглощения CO_2 10 мл 1 н. NaOH при определении дыхания почвы при экспозиции 0–24 ч (1) и в сумме при экспозициях 0–8, 8–16 и 16–24 ч (2) [28].

Следовательно, величина 220 мг CO_2 характеризует верхний предел интенсивности продуцирования CO_2 , которую можно измерить при 24-часовой экспозиции, применяя в качестве поглотителя 10 мл 1 н. NaOH в бюксе диаметром 5 см. При диаметре сосуда-изолятора 10 см это соответствует скорости эмиссии $1150 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. Если скорость эмиссии больше, измерения рекомендуется проводить при 2-х последовательных экспозициях, например, 0–12 и 12–24 ч, для замены бюкса с раствором щелочи после разгерметизации изолятора требуется не более 10–15 с.

Однако не следует полагать, что проблема получения фактических показателей скорости эмиссии CO_2 из почвы абсорбционным методом кроется только в использовании достаточно большой площади поглотителя. В работе [32] измерения дыхания почвы проводили с помощью 25 мл раствора 1 н. КОН, который для повышения площади абсорбции был нанесен на пористый материал – губку. Результат оказался примерно на 30% больше в сравнении с камерным методом, что авторы объяснили повышением активности микроорганизмов вследствие понижения под влиянием поглотителя исходной концентрации CO_2 в воздухе камеры до 20–250 ppm.

Также требует более детального прояснения вопрос о влиянии на эмиссию CO_2 изменений температуры почвы и воздуха под изолятором. В целом для биологически активного слоя почвы, например 0–25 см, изменение температуры почвы в процессе экспозиции, по-видимому, будет не столь значительным, чтобы существенно повлиять на деятельность почвенных микроорганизмов. Было показано [55], что при суточной экспозиции в солнечные дни температура почвы на глубине 10 см под влиянием тонкостенного дюралюминиевого сосуда повышалась на $0.5\text{--}1.5^\circ\text{C}$. Однако ночью почва под сосудом охлаждалась быстрее, поэтому ее среднесуточная температура либо не изменялась, либо повышалась на 0.5°C , что гипотетически может интенсифицировать продуцирование почвой CO_2 не более чем на 5%. Однако показано [23], что температура воздуха в надпочвенной части сосуда-изолятора, в зависимости от материала его изготовления, может повышаться значительно сильнее – на $15\text{--}27^\circ\text{C}$, что может нарушать диффузию CO_2 из почвы за счет увеличения давления. Иногда для его компенсации в камерах используют специальные вентиляционные трубки [43]. Полагаем, что требуются дополнительные исследования, чтобы прояснить вопрос о необходимости таких трубок для сосудов-изоляторов в случае измерения дыхания почвы при суточной экспозиции.

Таким образом, оценивая ту или иную модификацию абсорбционного метода, необходимо вначале выяснить, способна ли она обеспечить полное улавливание CO_2 , который может выделяться из почвы в данных условиях. Далее следует понять, насколько сильно при этом будет нарушен естественный

градиент концентрации CO_2 в системе “почвенный воздух—надпочвенный воздух”. Как уже отмечали, этого нарушения трудно избежать, поскольку невозможно заранее предсказать, при какой концентрации CO_2 в надпочвенной части изолятора будут уравновешены потоки “выделения CO_2 из почвы—поглощения CO_2 щелочью”. Однако хорошо то, что при правильно подобранных параметрах (площадь изоляции почвы, объем, концентрация и площадь поверхности раствора щелочи, объем надпочвенной части изолятора) и обоснованной процедуре измерения (экспозиция, глубина врезания изолятора в почву) нарушенный градиент концентрации CO_2 способен частично или полностью восстанавливаться за счет соответствующего изменения концентрации CO_2 в почвенном воздухе. Для этого требуется определенное время — переходный период, и важно, чтобы его продолжительность была возможно меньшей в сравнении с экспозицией.

Проведенные разными исследователями определения дыхания почвы позволяют в первом приближении обозначить оптимальные параметры изолятора (внутренний диаметр 10 см, высота 15 см, врезание в почву на глубину 5–7 см) и поглотителя (1 н. раствор NaOH или KOH , объем 10 мл, внутренний диаметр бюкса 5.0–5.5 см, расход щелочи не более 50%) для измерения при суточной экспозиции скорости эмиссии до 1100 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. На наш взгляд, необходимы дополнительные исследования, чтобы выяснить, насколько полученные при таких параметрах сосуда-изолятора и поглотителя данные будут соответствовать фактической скорости эмиссии CO_2 из почвы. Также следует иметь в виду, что сравнение данных абсорбционного и камерного методов необходимо проводить либо по среднесуточной скорости эмиссии CO_2 из почвы, либо по суммарным потерям углекислого газа в целом за какой-либо период.

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ

Традиционно баланс органического углерода в почвах агроценозов определяют по изменению его запасов в верхнем слое на делянках многолетних полевых опытов или производственных полях, которые длительное время подвергали различным агротехнологическим воздействиям [67–70]. Этот метод считается наиболее надежным, хотя он и не лишен недостатков. Основной из них заключается в том, что требуется слишком продолжительный период (как правило, более 10 лет) наблюдения, чтобы произошедшие в почве изменения в содержании $\text{C}_{\text{орг}}$ могли быть подтверждены с помощью методов математической статистики. Например, статистическая обработка данных анализов многолетних опытов, проведенных на Долгопрудной опытной станции, показала [71], что достоверными были лишь те различия в содержании $\text{C}_{\text{орг}}$ между вариантами, которые

составляли не менее 13% от количества элемента в почве. Понятно, что для почв биогеоценозов, обычно функционирующих в режимах близких к стационарному, такой подход неприемлем.

С этой точки зрения метод оценки баланса $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве, основанный на сопоставлении ежегодных потерь $\text{C}-\text{CO}_2$ из SOM и прихода углерода в почву в виде надземной и подземной растительной биомассы, является более привлекательным, поскольку потенциально позволяет определять направленность изменения запаса $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве всего лишь за один год. Метод основан на допущении [72], что бездефицитный баланс углерода в почве обеспечивается при равенстве среднегодовых величин поступления элемента в почву с надземной и подземной растительной массой и его потерь в виде CO_2 вследствие процессов минерализации SOM .

Однако использование этого метода таит в себе немалые сложности. Главная из них, как уже отмечали, заключается в вычленении в общем дыхании почвы гетеротрофной составляющей, т.е. минерализационных потерь SOM в виде CO_2 . Пока методы разделения общего дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие весьма несовершенные и трудоемкие [17–19, 73], и, по сути дела, само это разделение равнозначно проведению специального исследования. К тому же следует учитывать, что соотношение между автотрофным и гетеротрофным дыханием почвы изменяется в течение года, и для определения средней его величины в той или иной экосистеме необходимо проводить оценку хотя бы 3 раза в год, что весьма сложно. Экспертное же определение доли гетеротрофной составляющей в общем дыхании чревато значительными ошибками, поскольку, как показывают результаты исследований [14, 73], вклад дыхания корней в эмиссию CO_2 из почвы может изменяться в очень широких пределах — от 10 до 90%.

Не менее сложно дать точную оценку и среднегодового прихода углерода в почву. Создаваемая в экосистемах чистая первичная продукция (NPP) в виде надземной и подземной биомассы поступает в почву либо частично (агроценозы), либо полностью (биогеоценозы). По мнению специалистов [72], при определении NPP на одних и тех же площадках травяной экосистемы существующие методы могут давать 2–3-кратные различия. Поэтому подход к оценке баланса углерода на основании сравнения среднегодовых величин прихода элемента в почву и эмиссии $\text{C}-\text{CO}_2$ из SOM хотя и является оперативным, но при сегодняшнем уровне разработанности методик, к сожалению, может приводить к значительным ошибкам.

Однако эти ошибки можно уменьшить, а сам метод заметно упростить, если среднегодовую минерализацию SOM оценивать в паровом поле, исключив

таким образом необходимость разделения общего дыхания почвы на автотрофную и гетеротрофную составляющие. Как уже отмечали, наличие паровых полей в структуре пашни вполне естественно для большинства почв агроценозов. Однако возникает вопрос: насколько среднегодовые масштабы минерализации органического вещества в паровом поле отличаются от таковых в почве под растениями. Давно установлено, что средняя температура почвы в паровом поле на 1–2°C выше, чем в почве под растениями [74], что, как уже отмечалось, при $Q_{10} = 2$ может интенсифицировать процесс минерализации на 7–14%. Можно полагать, что различия во влажности между парующейся и занятой растениями почвой будут менее заметно сказываться на масштабах минерализации *SOM*. Дело в том, что почва под растениями более сильно и чаще иссушается, и, разумеется, это должно способствовать торможению процесса минерализации. Однако, согласно эффекту Бирча [46], после увлажнения почва выделяет тем больше CO_2 , чем сильнее была иссушена, и это должно сглаживать различия в минерализации *SOM* в пару и под покровом растений. Прямые 3-летние наблюдения за минерализацией меченной ^{14}C пшеничной соломы показали [76], что в занятой растениями почве процесс разложения проходил менее интенсивно, чем в почве пара, причем в первый год различие составило 17.3, во 2-й – 14.0, в 3-й – 12.0% (рис. 3).

Таким образом, ориентировочно можно принять, что количество минерализующегося *SOM* в почве под покровом растений на 10–15% меньше, чем в парующейся почве. Можно полагать, что, используя такую поправку для определения минерализации *SOM* под растениями, мы потенциально рискуем сделать ошибку значительно меньшую, чем при экспертном либо экспериментальном разделении общего

дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие.

О складывающемся в почве балансе углерода удобно судить на основании определения на парующейся площадке дозы растительного вещества (органического удобрения), обеспечивающей поддержание в почве бездефицитного баланса элемента [76]. Эта доза сравнивается с фактическим количеством органического вещества, которое поступает в почву в условиях агроценоза, и делается вывод о складывающемся в ней балансе углерода. Коротко процедура определения дозы удобрения сводится к следующему. Весной, сразу после достижения парующейся почвой физической спелости, на микроделянках размером 30 × 30 (см) в почву вносят возрастающие дозы измельченного органического удобрения (растительного материала), например, из расчета 3.0, 6.0 и 9.0 т воздушно-сухого вещества/га. В центр каждой микроделянки, в том числе без внесения материала, врезают сосуд-изолятор (рис. 4) и путем определения 1 раз в неделю среднесуточной скорости продуцирования CO_2 почвой рассчитывают суммарную за теплый период (май–октябрь) эмиссию CO_2 из почвы.

Она включает минерализационные потери собственно органического вещества почвы и внесенного удобрения (растительного вещества), а также учитывает возможное изменение под влиянием последнего минерализационно-иммобилизационных процессов (priming effect). Доза органического материала, обеспечивающая в почве бездефицитный баланс углерода, находится с помощью графика. Для его построения по осям абсцисс и ординат в одинаковом масштабе откладывают соответственно приход углерода в почву и его расход (эмиссию) за период наблюдения. Затем проводят биссектрису координатного угла. Точка ее пересечения с графиком соответствует дозе удобрения, при которой в почве

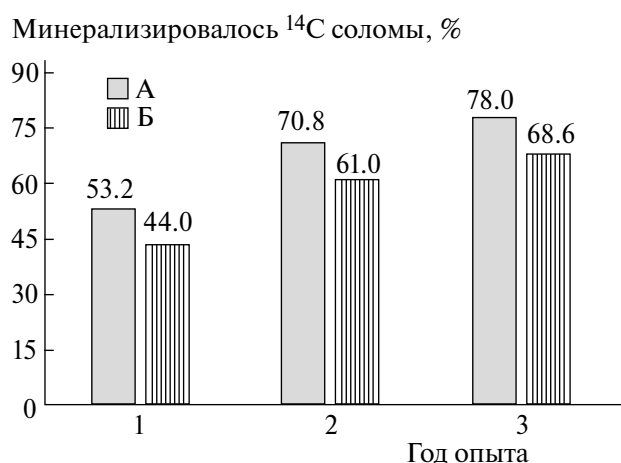


Рис. 3. Сравнительное определение степени минерализации меченной ^{14}C пшеничной соломы в парующейся (А) и занятой растениями (Б) почве [76].



Рис. 4. Общий вид площадки для определения эмиссии CO_2 парующейся почвой на микроделянках (сосуды-изоляторы со снятыми крышками в промежутках между измерениями) [76].

обеспечивается бездефицитный баланс углерода. При поступлении в почву органического вещества в количествах меньших или больших этой дозы в почве будет складываться, соответственно, отрицательный или положительный баланс $C_{орг}$.

Подход к определению на парующейся площадке минерализационных потерь углерода и доз органических удобрений (растительных остатков), обеспечивающих поддержание в почве бездефицитного баланса SOM , может рассматриваться в качестве более простой альтернативы традиционному методу, основанному на вычленении тем или иным способом гетеротрофной составляющей из общей эмиссии CO_2 из почвы. В качестве методического приема этот подход, по-видимому, можно использовать и в естественных травяных биогеоценозах, поддерживая площадки в парующемся состоянии на протяжении всего вегетационного периода путем систематического (1–2 раза в неделю) удаления (срезания) надземной части растений. Конечно, для этого необходимо решить ряд методических вопросов, в частности, установить, как быстро происходит отмирание корневой системы в травяных биоценозах при прекращении нисходящего потока ассимилянтов вследствие удаления надземной части растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных материалов показывает, что для успешного использования показателя эмиссии CO_2 в расчетах баланса углерода в почве предстоит решить ряд достаточно сложных методических задач. Прежде всего, необходимо доработать наиболее часто используемые камерный и абсорбционный методы до уровней, позволяющих определять фактическую среднесуточную скорость эмиссии CO_2 почвой. Движение в этом направлении должно привести к появлению общепризнанных модификаций методов, обеспечивающих получение одинаковых (близких) результатов. Также требуется совершенствование методов количественного разделения общего дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие, без чего невозможно по показателю эмиссии CO_2 оценивать годовые масштабы минерализации органического вещества почвы. В результате этого совершенствования должна появиться достаточно простая методика, позволяющая оценивать в различных биогеоценозах среднегодовые соотношения между этими составляющими. Возможно, что значительный нереализованный методический потенциал для решения этой задачи кроется в использовании для определения дыхания почвы площадок без растительного покрова, эмиссия CO_2 на которых всецело определяется деятельностью микробного комплекса почвы, минерализующего SOM .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Б.Н. Газовый режим почвы. М.: Агропромиздат, 1988. 104 с.
2. Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
3. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
4. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Жиенгалиев А.Т., Кудяров В.Н. Углеродный бюджет степных экосистем России // Докл. АН. 2019. Т. 485. С. 732–735.
5. Кудяров В.Н. Влияние удобрений и системы земледелия на секвестрацию углерода в почвах // Агрохимия. 2022. № 12. С. 79–96.
6. Шарков И.Н., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2.
7. Чимитдоржиева Г.Д. Пути секвестрации углерода при землепользовании (обзор литературы) // Сибир. экол. журн. 2023. № 3. С. 238–252.
8. Кудяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658.
9. Kelting D.L., Burger J.A., Edwards G.S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils // Soil Biol. Biochem. 1998. V. 30. № 7. P. 961–968.
10. Кузиков Я.В., Ларионова А.А. Вклад ризомикробного и корневого дыхания в эмиссию CO_2 из почвы (обзор) // Почвоведение. 2006. № 7. С. 842–854.
11. Creamer R.E., Schulte R.P.O., Stone D., Gal A., Krogh P.H., Lo Papa G., Murray Pérès P.J.G., Foerster B., Rutgers M., Sousa J.P., Winding A. Measuring basal soil respiration across Europe: do incubation temperature and incubation period matter? // Ecol. Indic. 2014. V. 36. P. 409–418.
12. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудяров В.Н. Эмиссия CO_2 , микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
13. Ryan M.G., Law B.E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration // Biogeochemistry. 2005. V. 73. № 1. P. 3–27.
14. Hanson P.G., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial contribution to soil respiration: A review of methods and observations // Biogeochemistry. 2000. V. 48. № 1. P. 115–146.

15. Сапронов Д.В., Кузяков Я.В. Разделение корневого и микробного дыхания: сравнение трех методов // Почвоведение. 2007. № 7. С. 862–872.
16. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Васенев В.И., Саржанов Д.А. Микробное дыхание почвы в полевых и лабораторных условиях // Агрофизика. 2016. № 4. С. 17–23.
17. Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Шмитт М., Лопес де Гереню В.О., Бан М. Экспериментальная оценка вклада дыхания корней растений в эмиссию углекислого газа из почвы // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1479–1488.
18. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Бобрик А.А., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р. Оценка вклада корневого и микробного дыхания в общий поток CO₂ из торфяных почв и подзолов севера Западной Сибири методом интеграции компонентов // Почвоведение. 2019. № 2. С. 234–245.
19. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р., Бобрик А.А., Тархов М.О. Автотрофное и гетеротрофное дыхание почв криолитозоны: оценка вкладов и методические подходы (на примере почв севера Западной Сибири) // Сибир. экол. журн. 2019. № 6. С. 654–667.
20. Громова М.С., Матвиенко А.И., Макаров М.И., Ченг Ш.К., Меняйло О.В. Температурная чувствительность (Q₁₀) базального дыхания как функция количества доступного углеродного субстрата, температуры и влажности // Почвоведение. 2020. № 3. С. 366–371.
21. Ларионова А.А., Квиткина А.К., Евдокимов И.В., Быховец С.С., Стулин А.Ф. Влияние температуры на интенсивность разложения лабильного и устойчивого органического вещества агрочернозема // Почвоведение. 2013. № 7. С. 803–803.
22. Meyer N., Welp G., Amelung W. Effect of sieving and sample storage on soil respiration and its temperature sensitivity (Q₁₀) in mineral soils from Germany // Biol. Fertil. Soils. 2019. V. 55. № 8. P. 825–832.
23. Rochette P., Hutchinson G.L. Measurement of soil respiration in situ: chamber techniques // Micrometeorol. Agric. Syst. Agron. Monograph. 2005. № 47. P. 247–286.
24. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO₂ с поверхности олиготрофной торфяной почвы // Метеорол. и гидрол. 2011. № 6. С. 84–93.
25. Иванов А.В., Замолотчиков Д.Г., Сало М.А., Кондратова А.В., Пилецкая О.А., Брянин С.В. Дыхание почв лесных экосистем юга Дальнего Востока // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1023–1033.
26. Саржанов Д.А., Васенев В.И., Сотникова Ю.Л., Тембо А., Васенев И.И., Валентини Р. Краткосрочная динамика и пространственная неоднородность эмиссии CO₂ почвами естественных и городских экосистем Центрально-Черноземного региона // Почвоведение. 2015. № 4. С. 469–478.
27. Yang J., Huang J.H., Zhan X.M., Li X., Du L.H., Li L.H. The diurnal dynamic patterns of soil respiration for different plant communities in the agropastoral ecotone with reference to different measuring methods // Chin. J. Plant Ecol. 2004. V. 28. № 3. P. 318–325.
28. Шарков И.Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. 1987. № 1. С. 127–133.
29. Шарков И.Н., Шенелев А.Г., Мишина П.В. Продуцирование CO₂ пашней на черноземе выщелоченном в условиях центральной лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2013. № 5. С. 51–57.
30. Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // Bot. Rev. 1977. V. 43. № 4. P. 449–528.
31. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурин В.А., Кудяров В.Н. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1220–1236.
32. Bekku Y., Koizumi H., Oikawa T., Iwaki H. Examination of four methods for measuring soil respiration // Appl. Soil Ecol. 1997. V. 5. № 3. P. 247–254.
33. Cropper W.P., Ewel K.C., Raich J.W. The measurement of soil CO₂ evolution in situ // Pedobiologia. 1985. V. 28. № 1. P. 35–40.
34. Муравьева Е.А., Кулакова Е.С. Обзор приборной базы по контролю парниковых газов // Нанотехнол. в строительстве. 2022. Т. 14. С. 62–69.
35. Дюкарев Е.А., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Киселев М.В., Филиппов И.В., Дмитриченко А.А., Лапина Е.Д. Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными экосистемами территории лицензионных участков Салымской группы месторождений Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа // Сибир. экол. журн. 2022. № 6. С. 728–741.
36. Davidson E.A., Savage K., Verchot L.V., Navarro R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration // Agric. Forest Meteorol. 2002. V. 113. № 1. P. 21–37.
37. Schiedung H., Bauke S., Bornemann L., Welp G., Borchard N., Amelung W. A simple method for in-situ assessment of soil respiration using alkali absorption // Appl. Soil Ecol. 2016. V. 106. P. 33–36.
38. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Тимофеева М.В., Чуванов С.В., Тархов М.О., Исаева А.В. Эмиссия CO₂ почвами экотонной зоны севера Западной Сибири // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1034–1048.
39. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А., Аблеева В.А. Температурная чувствительность дыхания почв

- луговых ценозов в зоне умеренно-континентального климата: анализ данных 25-летнего мониторинга // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1059–1076.
40. Осипов А.Ф. Эмиссия CO₂ с поверхности почвы на 10-летней вырубке среднетаежного сосняка черничного на европейском Северо-Востоке России // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1049–1058.
 41. Суховеева О.Э., Карелин Д.В., Золотухин А.Н., Почикалов А.В. Дыхание почвы в аграрных и природных экосистемах европейской территории России // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1077–1088.
 42. Maier M., Weber T.K., Fiedler J., Fuss R., Glatzel S., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Schäfer K., Weymann D., Hagemann U. Introduction of a guideline for measurements of greenhouse gas fluxes from soils using non-steady-state chambers // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2022. V. 185. № 4. P. 447–461.
 43. Hutchinson G.L., Livingston G.P. Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere // Eur. J. Soil Sci. 2001. V. 52. № 4. P. 675–682.
 44. Мина В.Н., Макаров Б.Н., Мацкевич В.Б., Штатнов В.И. Методы изучения воздушного режима почв при стационарных исследованиях // Почвоведение. 1963. № 6. С. 48–57.
 45. Штатнов В.И. К методике определения биологической активности почвы // Докл. ВАСХНИЛ. 1952. Вып. 6. С. 27–30.
 46. Knoepp J.D., Vose J.M. Quantitative comparison of *in situ* soil CO₂ flux measurement methods. Resch. Pap. SRS-28. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 2002. 11 p.
 47. Minderman G., Vulto I.C. Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil // Pedobiologia. 1973. V. 13. № 2. P. 73–80.
 48. Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Сапронов Д.В., Мякшина Т.Н., Кудеяров В.Н. Оценка эмиссии диоксида углерода из пахотных серых лесных почв // Агрохимия. 2002. № 9. С. 52–57.
 49. Ларионова А.А., Розанова Л.Н. Суточная, сезонная и годовая динамика выделения CO₂ из почвы. Дыхание почвы. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1993. С. 59–68.
 50. Меняйло О.В., Матвиенко А.И., Степанов А.Л., Макаров М.И. Определение потока CO₂ из почв: роль глубины колец // Экология. 2015. № 2. С. 120–124.
 51. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Влияние факторов среды на эмиссию CO₂ с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение. 2012. № 6. С. 658–658.
 52. Parkin T.B., Kaspar T.C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2003. V. 67. № 6. P. 1763–1772.
 53. Coleman D.C. Soil carbon balance in a successional grassland // Oikos. 1973. V. 24. P. 195–199.
 54. Gupta S.R., Singh J.S. Effect of alkali concentration, volume and absorption area on the measurement of soil respiration in a tropical sward // Pedobiologia. 1977. V. 17. P. 233–239.
 55. Sharkov I.N. Determination of the rate of soil CO₂ production by the absorption method // Soviet Soil Sci. 1984. V. 16. № 3. P. 102–111.
 56. Matthias A.D., Blackmer A.M., Bremner J.M. A simple chamber technique for field measurement of emissions of nitrous oxide from soils // J. Environ. Qual. 1980. V. 9. № 2. P. 251–256.
 57. Шарков И.Н. Исследование параметров раствора щелочи как абсорбента CO₂ при определении дыхания почвы // Почвоведение. 1983. № 1. С. 132–138.
 58. McDermit D.K., Xu L., Madsen R., Demetriades-Shah T., Garcia R., Furtaw M. Feedback of ambient air CO₂ concentration on soil CO₂ efflux // Geophys. Res. Abstr. 2007. V. 9. P. 10613.
 59. Kucera C.L., Kirkham D.R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri // Ecology. 1971. V. 52. № 5. P. 912–915.
 60. Jensen L.S., Mueller T., Tate K.R., Ross D.J., Magid J., Nielsen N.E. Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration *in situ*: A comparison of two chamber methods // Soil Biol. Biochem. 1996. V. 28. № 10–11. P. 1297–1306.
 61. Иванникова Л.А. Применение абсорбционного метода для определения естественного потока CO₂ из почвы // Почвоведение. 1992. № 6. С. 133–139.
 62. Freijer J.I., Bouten W. A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution: experiments and simulation // Plant and Soil. 1991. V. 135. № 1. P. 133–142.
 63. Kirita H. Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. II. Effect of the size of the apparatus on CO₂-absorption rates // Jap. J. Ecol. 1971. V. 21. P. 37–42.
 64. Anderson J.P.E. Soil respiration // Methods of soil analysis. P. 2. Chemical and microbiological properties / Ed. Page A.L. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1982. P. 837–871.
 65. Mina V.N. Comparison of methods for determining the intensity of soil respiration // Sov. Soil Sci. 1962. V. 10. P. 1188–1192.
 66. Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. CO₂ Emission from oligotrophic peatland soil of Western Siberia // Environ. Dynamic. Global Climate Change. 2010. V. 1. № 2. P. 7.
 67. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536.

68. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Ерегин А.В., Шарапова Н.Р., Демидов Д.В. Углерод-секвестрирующая оценка различных систем удобрения и определение эмиссии N_2O в длительном полевом опыте // Плодородие. 2022. № 6. С. 73–77.
69. Prokopyeva K., Romanenkov V., Sidorenkova N., Pavlova V., Siptits S., Krasilnikov P. The Effect of crop rotation and cultivation history on predicted carbon sequestration in soils of two experimental fields in the Moscow region, Russia // Agronomy. 2021. V. 11. P. 226.
70. Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Change in the net primary production and carbon stock recovery in fallow soils // Euras. Soil Sci. 2022. V. 55. P. 501–510.
71. Щерба С.В., Юдин Ф.А. Методика полевого опыта с удобрениями // Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. С. 526–584.
72. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н.В., Тишков А.А., Ти Т., Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыс Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
73. Subke J.A., Ingleton I., Cotrufo M.F. Trends and methodological impacts in soil CO_2 efflux partitioning: A metaanalytical review // Global Change Biol. 2006. V. 12. P. 921–943.
74. Шульгин А.М. Температурный режим почвы. Л.: Гимиз, 1957. 242 с.
75. Birch H.F. The effect of drying on humus decomposition and nitrogen availability // Plant and Soil. 1958. V. 10. P. 9–31.
76. Шарков И.Н. Изучение минерализации и баланса органического вещества в почвах агроценозов // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия—ВНИПТИОУ, 2005. С. 359–376.

Estimation of Soil Carbon Balance Based on CO_2 Emission Determination

I. N. Sharkov^{a,#}, A. S. Chumbaev^a, V. A. Androkhanov^a

^aInstitute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
prosp. Lavrenteva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia

[#]E-mail: humus3@yandex.ru

The increased interest nowadays in quantitative assessment of soil respiration is largely due to studies of the role of various terrestrial ecosystems in changing the concentration of the most important greenhouse gas, CO_2 , in the atmosphere. The review considers methodological aspects of determining the actual CO_2 emission from soils using chamber and absorption methods, as well as the use of the obtained data to assess the carbon balance in soils. Successful development of this topic will allow to promptly get an answer to the main question of this pressing environmental issue: what is the soil of this or that ecosystem for atmospheric CO_2 – a net source or a net sink? The article analyzes the results of works devoted to comparative determination of CO_2 emission from soils by these methods. It is shown that the widespread opinion about obtaining underreported data by absorption method is often based on studies in which the basic principles of the method were violated. It is concluded that it is necessary to carry out in-depth comparative studies on determination of average daily indicators of CO_2 emission from soil by chamber and absorption methods. It is recognized that, regardless of the method, the main problem in using CO_2 production data to estimate soil C balance is the adequate partitioning of total respiration into heterotrophic and autotrophic components, the ratio between which varies widely depending on soil and vegetation conditions. Due to imperfection and labor intensity of existing methods, this division can cause significant errors in determining the annual mineralization of soil organic matter. To reduce them, the approach to determination of mineralization losses of CO_2 in bare fallow soils is considered. It is natural for soils of agrocenoses, but as a methodological technique can probably be used in natural grass ecosystems as well. Reduction of errors can be ensured due to the fact that differences in actual mineralization of organic matter in bare fallow and plant-occupied soils are several times less than changes in the ratio between heterotrophic and autotrophic components of soil respiration in different biogeocenoses.

Keywords: soil respiration, chamber method, absorption method, soil carbon balance.

УДК 631.8:631.559:633.854.54

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ МАСЛИЧНОГО ЛЬНА

© 2024 г. А. В. Ивойлов*

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
430005 Саранск, ул. Большевикская, 68, Россия

*E-mail: ivoilov.av@mail.ru

Приведен обзор отечественной и иностранной литературы о влиянии удобрений на урожайность и качество продукции масличного льна (*Linum usitatissimum* L. ssp. *intermedium*). Показано, что применение удобрений является эффективным способом повышения семенной продуктивности льна. Результативность действия удобрений на величину урожая и масличность семян зависит от множества причин: метеорологических условий в период вегетации растений, доз удобрений, сроков и приемов их внесения, способов обработки почвы, сортовых особенностей и т.п. В первом минимуме для формирования прибавки урожая семян масличного льна выступает азот. Оптимальные его дозы зависят от условий внешней среды и соответствуют N30–60. При этом наилучшая окупаемость 1 кг внесенного азота достигается при дозе не более 30 кг д.в./га. Применение удобрений неоднозначно, в зависимости от конкретных условий выращивания влияет на содержание растительного жира в семенах, снижая или увеличивая его концентрацию. В то же время применение удобрений в большинстве случаев приводит к увеличению сбора масла с единицы площади. Приведена база данных выноса основных элементов питания (N, P₂O₅, K₂O) масличным льном. Рассчитаны средние показатели и доверительные интервалы затрат элементов питания на единицу основной продукции: для азота они составили 34.8 кг/т (30.5–39.2 кг/т), фосфора – 13.0 (11.4–14.5) и калия – 29.9 кг/т (25.8–33.9 кг/т). Их можно использовать в качестве нормативных показателей при расчете доз удобрений на планируемый урожай.

Ключевые слова: масличный лен (*Linum usitatissimum* L. ssp. *intermedium*), удобрения, урожайность, масличность семян, относительный вынос элементов питания.

DOI: 10.31857/S0002188124090105, **EDN:** CCFSGD

ВВЕДЕНИЕ

Лен обыкновенный (*Linum usitatissimum* L.) – одна из распространенных в мире технических культур комплексного использования: 95–98% массы льняного растения (волокно, семена, полова и треста) имеет практическое применение [1–3]. Наибольшая доля мировых посевов льна приходится на производство льносемян для пищевых, фармацевтических и технических целей, меньшая – для получения лубяных волокон [4]. По данным ФАО, в 2019 г. в мире лен-долгунец выращивали на площади почти 260 тыс. га, а масличный лен занимал 3.2 млн га [5].

Мировой опыт земледелия свидетельствует, что условия минерального питания и применение удобрений и других средств химизации – ключевые факторы, которые оказывают существенное влияние на величину и качество урожая возделываемых культур, позволяют в полной мере реализовывать их генетический потенциал [6].

Цель обзора – обобщение отечественных и иностранных публикаций о влиянии средств химизации

сельского хозяйства на урожайность и качество продукции масличного льна.

КРАТКАЯ БОТАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НЕКОТОРЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАСЛИЧНОГО ЛЬНА

Род Лен (*Linum* L.) относится к одному из 10 родов семейства Льновые (Linaceae DC. ex Perleb) порядка Мальпигиецветные (Malpighiales Mart.) и насчитывает в разных системах свыше 200 видов, разделенных в зависимости от числа хромосом, морфологии цветков и межвидовой совместимости на 5 секций: *Linum*, *Linastrum*, *Cathartolinum*, *Dasylinum* и *Syllinum* [1, 7–9]. Культурный лен *Linum usitatissimum* – лен обыкновенный (с лат. *usitatissimum* переводится как полезнейший или употребительный) имеет 30 диплоидных хромосом и помещен вместе с предполагаемыми прародителями *L. angustifolium* (лен узколиственный) и *L. bienne* (лен двулетний или зимний) в секцию *Linum* [10].

Родиной льна культурного принято считать Ближний Восток и Среднюю Азию, а также южную часть Средиземноморского побережья [11–14]. Имеются свидетельства об использовании культурного льна в неолитических культурах в качестве источника волокна. Самые ранние его находки датируются 8700–7000 гг. до н.э. [15]. Льняное волокно было обнаружено на доисторических стоянках в Израиле и Сирии [16–18]. В эпоху бронзового и железного веков человек возделывал лен практически по всей Европе, Центральной и Южной Азии, в Северной Африке и Закавказье [19]. Лен выращивали в Египте между 4500 и 4000 гг. до н.э. и он достиг Швейцарии примерно к 3000 г. до н.э.; несколько позже его выращивали в Англии, в местечке Виллиум-Хилл (William Hill) [20].

Культурный лен отличается большим полиморфизмом, из-за чего его внутривидовая систематика с позиции ботаники не до конца разработана: одни и те же формы некоторые ученые считают разновидностями, другие – подвидами, третьи – самостоятельными видами [5, 21]. В России чаще всего применяют классификацию Сизова [22]. Согласно ей, культивируемый лен подразделяется на 5 разновидностей (долгунцы, межеумки, кудряши, крупносемянные и полуозимые). Используют также классификацию Черноморской–Станкевича, в соответствии с которой выделенные Сизовым разновидности переходят в разряд подвидов: долгунцы – *L. usitatissimum* ssp. *usitatissimum*, межеумки – *L. usitatissimum* ssp. *intermedium* Czernom., кудряши – *L. usitatissimum* ssp. *humile* (L.) Czernom., крупносемянные – *L. usitatissimum* ssp. *latifolium* Stankev., полуозимые (двулетние) – *L. usitatissimum* ssp. *bienne* (Mill.) Stankev. [23]. В условиях производства обычно применяют упрощенную классификацию Эллады [12], по которой культивируемый лен подразделяют на 3 типа: лен-долгунец – одностебельный, высотой 70–140 см, с компактным соцветием, прядильного направления использования; лен-кудряш – многостебельный, высотой 20–50 см, с большим числом коробочек, масличного направления использования; лен-межеумок – одно- или двустебельный, высотой 50–80 см, с большим числом коробочек, масличного направления применения, используемый также для получения волокна низкого качества [5]. Под названием масличный лен для получения маслосемян возделывают лен-межеумок и лен-кудряш.

Лен относится к растениям-космополитам с широкой экологической пластичностью, которая обусловлена в основном коротким периодом вегетации. Многочисленными фенологическими наблюдениями установлено, что его растения проходят фазы вегетации и созревают одновременно с ячменем и пшеницей яровой [24]. Ареал возделывания масличного льна значительно шире ареала льна-долгунца и охватывает различные климатические зоны от юга Индии, Эфиопии и Кении, Аргентины до Северного

полярного круга на северо-западе России и северных провинций Канады. Его выращивают также в Европе, Африке, Австралии [1, 25]. В России масличный лен издавна возделывают не только в южных районах (Северный Кавказ), но и в Центральном Черноземье, Поволжье, на Алтае, в Западной и Восточной Сибири [26].

Масличный лен (кудряш и межеумок) относится к группе растений, не очень требовательных к тепловому режиму. Семена льна начинают прорастать при температуре почвы 3–4°C, а всходы появляются при 4–6°C. Воздействие заморозков на лен более опасно в фазах проростков и семядолей (появления всходов). В этот период при понижении температуры до –4°C начинается повреждение всходов. С конца фазы “елочки” морозостойкость заметно повышается: сформировавшиеся растения переносят понижение температуры до –6°C [27]. Для полного развития масличного льна и созревания семян требуется 1600–1800° тепла с продолжительностью безморозного периода 80–90 сут [2].

Масличный лен относится к растениям-мезофитам, которые приспособлены к произрастанию на почвах с достаточным, но не избыточным увлажнением. По сравнению с долгунцами он менее требователен к влаге. Засуху первой половины вегетации до цветения переносит практически без большого ущерба для урожая семян [28]. Корневая система масличного льна, по сравнению со многими другими полевыми культурами, относительно малоразвита, но обладает высокой всасывающей способностью. Она постоянно растет вглубь и использует влагу из глубоких слоев почвы [29–31]. Благодаря этому масличный лен отличается высокой засухоустойчивостью, способностью расти и давать урожай семян и на полупустынных территориях [32].

Масличный лен можно успешно возделывать на почвах любого типа и гранулометрического состава, но наиболее благоприятны для него среднесуглинистые черноземные и темно-каштановые почвы [32, 33]. Принято считать, что для него оптимальна слабокислая реакция почвенного раствора [34–36]. В то же время имеются сведения, что масличный лен можно успешно возделывать на нейтральных и щелочных почвах [37].

Лен относится к растениям так называемого длинного дня, цветение которых индуцируется “длинным днем” [32, 33]. Оптимальной для масличного льна является продолжительность дня 18 ч. Она обеспечивает не только сокращение периода вегетации растений, но и максимальный урожай семян [38].

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ МАСЛИЧНОГО ЛЬНА

Вопрос о влиянии удобрений и других средств химизации растениеводства на величину и качество

урожаю масличного льна не является новым. Его периодически освещали и продолжают освещать в отечественной и зарубежной научной литературе в связи с появлением новых сортов масличного льна, усовершенствованием элементов технологии и расширением ареала его возделывания.

Несмотря на высокую пластичность и способность формировать урожай семян на разных типах и подтипах почв, масличный лен при определенных условиях положительно отзывается на применение удобрений. Недостаток питательных веществ в почве оказывает отрицательное влияние не только на урожайность семян, но и на содержание в них масла. Для получения высоких урожаев семян важно с первых фаз вегетации обеспечить растения масличного льна питательными веществами в достаточном количестве, т.к. потребности в них в это время велики, а корневая система растений недостаточно развита [28, 32, 33].

Одним из основных питательных элементов, влияющих на урожайность семян льна и их качество, является азот. По данным Церлинг, им растения льна должны быть обеспечены в полной мере с фазы всходов, т.к. имеется тесная зависимость между массой коробочек, образованных к концу вегетации, и содержанием азота в надземной части растений льна к фазе “елочка” [39, 40]. В работе [41] также советуют вносить азотные удобрения под масличный лен по возможности раньше для образования дополнительных стеблей от основания главного стебля. Установлено, что на растениях льна ветвей формируется тем больше, чем меньше степень подавления роста боковых почек апикальным доминированием, обусловленным конкуренцией между верхушечной и боковыми почками за питательные вещества, главным образом за азот [42–44]. В то же время, по мнению [28], масличный лен в первый период жизни не предъявляет больших требований к азотному питанию, поскольку основное количество элемента он поглощает с фазы “елочка” до цветения. Критическим периодом по отношению к азоту считается время от фазы “елочки” до цветения.

Дефицит фосфора не только в начале вегетации, но и в последующие периоды роста и развития льна снижает урожай семян [28]. Условия калийного питания влияют на сбор маслосемян не только в течение первых недель роста, но и в значительной степени с фазы бутонизации [28, 39, 45].

Регулирование минерального питания масличного льна возможно за счет применения удобрений, посева после лучших предшественников, совершенствования системы обработки почвы, очищения поля от сорной растительности, соблюдения оптимальных норм посева [46].

В последние годы в связи с расширением площадей посева масличного льна в различных регионах Российской Федерации появилось множество

публикаций об эффективности применения удобрений и других средств химизации при его возделывании на семена. Они свидетельствуют, что результативность действия удобрений зависит от множества причин: метеорологических условий в период вегетации растений, доз удобрений, сроков и приемов их внесения, способов обработки почвы, сортовых особенностей.

О важной роли метеорологических условий периода вегетации растений в формировании величины урожая и эффективности действия удобрений свидетельствуют, например, данные исследований Санкт-Петербургского ГАУ. Установлено, что на дерново-карбонатной выщелоченной среднесуглинистой почве с очень высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия внесение N30, N60 и N90 на фоне P40K60 увеличивало в среднем за 3 года сбор семян масличного льна сорта Северный на 0.17, 0.24 и 0.22 т/га соответственно, сортов ЛМ 98 и Norlin — на 0.09, 0.23, 0.02 и 0.34, 0.28 и 0.13 т/га. Лучшую оплату урожаем семян 1 кг д.в. удобрений обеспечивало внесение N30. Отмечено, что семенная продуктивность льна в большей степени зависела от метеорологических условий периода вегетации (доля влияния составила 86%), чем от доз удобрений [47–49]. Аналогичная закономерность отмечена в опытах на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом в условиях неустойчивого увлажнения Краснодарского края и на серой лесной почве в условиях Свердловской обл. [50, 51].

Эффективность применения удобрений под масличный лен в условиях северной лесостепи Тюменской обл. на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом также в значительной мере зависела от складывающихся метеорологических условий периода вегетации. При благоприятном режиме увлажнения прибавка урожайности семян льна сорта Август от внесения N60P16K16 и N90P25K25 составила 0.29 и 0.56 т/га соответственно, у сорта Легур она от применения этих доз была одинаковой — 0.44 т/га. При недостаточном выпадении осадков использование удобрений было неэффективным: сбор семян увеличился всего на 0.02–0.05 т/га, что было в пределах ошибки опыта [52].

На черноземе выщелоченном Ставропольской возвышенности внесение минеральных удобрений под предпосевную культивацию достоверно повышало урожайность семян льна сорта ВНИИМК 630 в среднем за 3 года в зависимости от дозы на 0.35–0.62 т/га. Максимальный сбор маслосемян обеспечил вариант с применением N90P60K20. Установлено, что отзывчивость льна на внесение удобрений также определялась метеорологическими условиями периода вегетации. Хуже всего растения льна на применение удобрений отзывались в засушливом 2010 г., когда разница между удобренными

вариантами и неудобренным контролем составляла 0.25–0.57 т/га в зависимости от дозы удобрений, тогда как в более благоприятном по увлажнению 2008 г. и менее экстремальном по температурному режиму 2009 г. – 0.033–0.60 и 0.44–0.90 т/га соответственно [53, 54].

Данные полевых опытов по оценке влияния удобрений на урожайность семян масличного льна в различных регионах России свидетельствуют о неоднозначной их эффективности, обусловленной, кроме удобрений и погоды, разными сопутствующими факторами роста и развития растений. При этом результативность действия удобрений не всегда была обусловлена типом почвы.

Дерново-подзолистые почвы. В исследованиях Всероссийского НИИ льна на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в условиях Центрального Нечерноземья выявлена высокая эффективность применения традиционных (АЗФК, смесей N_{aa} , P_{cd} и K_x) и новых (азотно-фосфорно-калийное удобрение с бором ОАО «ФосАгро-Череповец», Сивид-Комплекс и др.) удобрений под масличный лен сорта ЛМ 98. Прибавки урожайности семян от внесения удобрений в зависимости от дозы и марки удобрения составили 0.13–0.47 т/га (13–48% к неудобренному контролю), льносоломы – 0.50–1.49 т/га (24–70%). Наибольшая семенная продуктивность льна (1.45 т/га в среднем за 4 года) отмечена при внесении $N45P60K90$ [55]. В опыте на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с высоким содержанием фосфатов, средним – калия и бора внесение $N45P45K45$ (0.3 т АЗФК/га) в среднем за 4 года увеличивало сбор семян льна позднеспелого сорта ЛМ 98 на 0.17 т/га (17% к неудобренному контролю), раннеспелого сорта Уральский – на 0.26 т/га (на 23%), а применение $N45P74K45B3$ (новое НРК-удобрение с бором в дозе 0.3 т/га) – на 0.34 т/га (35%) и 0.23 т/га (37%) соответственно [56].

В исследованиях Ижевской ГСХА на дерново-среднеподзолистой среднесуглинистой почве масличный лен сортов ВНИИМК 620 и Северный одинаково реагировал на внесение $N20-40$. Прибавка урожая семян от применения удобрений была невысокой и составила 0.10 т/га, или 11% к неудобренному контролю [57].

В условиях Республики Беларусь на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве Института льна с высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия внесение $N_{м}60P40K80$ и $N_{са}60P40K80$ повысило урожайность семян масличного льна сорта Илим по сравнению с неудобренным контролем в среднем на 0.40 и 0.51 т/га, или на 31 и 40% соответственно. Использование микроэлементов (В, Zn, Fe) совместно с базовой дозой макроэлементов дополнительно повышало урожайность семян на 0.11–0.16 т/га, или на 8–12%. Такое сочетание макро- и микроэлементов обеспечивало не только повышение урожайности

маслосемян, но и выход льняного масла больше на 0.21 т/га, или на 38% [58].

Серые лесные почвы. В исследованиях Рязанского ГАТУ на серой лесной среднесуглинистой почве изучали эффективность удобрений на масличном льне сорта Санлин в зависимости от нормы высева семян. Выявлено, что внесение удобрений увеличивало сбор семян льна на 0.08–0.27 т/га. Наибольший сбор семян за 3 года исследования (2.15 т/га) отмечен при внесении $N90P60K60$ при норме высева 8 млн всхожих семян/га [59].

На серой лесной слабокислой суглинистой почве в условиях Ярославской обл. со средним содержанием подвижных форм фосфора и низким – обменного калия внесение различных доз и соотношений фосфорно-калийных удобрений на фоне $N50$ увеличивало сбор семян масличного льна сорта Исток в среднем за 2 года исследования на 0.14–0.41 т/га, сорта Северный – на 0.13–0.29 т/га. Выявлено, что сорт льна Исток лучше отзывался на внесение фосфорно-калийных удобрений по сравнению с сортом Северный. Наибольшая в опыте оплата 1 кг д.в. РК-удобрений прибавкой урожая семян отмечена у сорта Исток (2.38 кг семян/кг д.в.) от применения $P30K50$, у сорта Северный (2.12 кг) – $P30K35$ [60].

На темно-серой лесной почве в условиях Рязанской обл. при внесении под культивацию $N60P60K60$ и $N90P60K60$ в форме N_{aa} , K_x , АФ под лен сорта Санлин урожайность семян возрастала в среднем за 5 лет исследования на 0.08 и 0.10 т/га соответственно [61].

В исследованиях Института сельского хозяйства Карпатского региона на серой лесной поверхностно-оглеенной почве в условиях Западной Лесостепи Украины внесение $N60P30K60$ увеличивало урожайность масличного льна сорта Водограй в среднем за 3 года на 1.24 т/га по сравнению с неудобренным контролем (1.46 т/га), или на 85% [62].

Черноземы. На черноземе выщелоченном в условиях Кабардино-Балкарии выявлена высокая отзывчивость масличного льна на применение минеральных удобрений. Например, внесение $N30$, $N60$, $N90$ и $N120$ отдельно и на фосфорно-калийном фоне ($P60K30$) увеличивало сбор семян сорта льна Ручеек по сравнению с неудобренным вариантом на 0.39, 0.63, 0.62 и 0.56 т/га, по сравнению с фосфорно-калийным фоном – на 0.27, 0.51, 0.50 и 0.44 т/га соответственно. Аналогичная закономерность отмечена и у сортов масличного льна ВНИИМК 620 и ВНИИМК 630: повышение дозы азота выше $N60$ не способствовало росту урожайности семян. Прибавки от внесения азота на фоне фосфорно-калийного удобрения у сорта ВНИИМК 620 по сравнению с неудобренным вариантом варьировали в пределах 0.34–0.55 т/га, у сорта ВНИИМК 630 – в границах 0.36–0.70 т/га [63–65].

В исследованиях Всероссийского НИИ масличных культур на черноземе выщелоченном (Краснодарский край) в условиях неустойчивого увлажнения и на черноземе обыкновенном (Ростовская обл.) в условиях недостаточного увлажнения применение как N60 и N60P30K30 под культивацию, так и N30 в фазе “елочки” вразброс незначительно увеличивало сбор семян масличного льна в среднем за годы исследования на 0.11, 0.11 и 0.06 т/га соответственно при урожае в контроле 1.72 т/га [66]. В другом опыте того же института на черноземе выщелоченном внесение перед посевом под культивацию N60P30K30 и N60 увеличивало сбор семян масличного льна сорта ВНИИМК 620 в среднем за 3 года исследования на 0.11 и 0.09 т/га, или на 6 и 5% соответственно [50].

На черноземе выщелоченном среднегумусном тяжелосуглинистом с высоким содержанием подвижного фосфора и повышенным — обменного калия в условиях Пензенской обл. внесение N15P15K15, N30P30K30 и N60P60K60 увеличивало сбор семян льна сорта Исток в среднем за 3 года на 0.12, 0.24 и 0.40 т/га соответственно при урожае в неудобренном контроле 1.46 т/га. Внесение удобрений увеличивало также выход льносоломы на 1.08, 1.25 и 1.72 т/га, или на 17, 19 и 27% соответственно [67].

В опытах Башкирского ГАУ на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом внесение N30P60K45 достоверно увеличивало сбор семян масличного льна на 0.19, последствие 10 т/га навоза КРС — на 0.31, применение N30P60K45 на навозном фоне — на 0.60 т/га [68]. В исследованиях Татарского НИИСХ внесение N30, N30P30K30, N45P45K45 и N60P60K60 обеспечивало достоверный прирост урожайности семян масличного льна к неудобренному контролю (1.38 т/га) на 0.16, 0.22, 0.28 и 0.30 т/га соответственно [69].

В условиях Южного Зауралья (Курганская обл.) на черноземе выщелоченном с низким содержанием азота и фосфора внесение N32P32K32 в форме АЗФК увеличивало сбор семян масличного льна сорта Северный в среднем за 3 года исследования на 1.29 т/га, или на 62% [70].

В опыте на черноземе выщелоченном маломощном среднегумусном тяжелосуглинистом в условиях Тюменской обл. установлено, что наибольшую урожайность различные сорта масличного льна формировали на повышенном фоне удобрений (N90P25K25) с нормой высева 9 млн всхожих семян/га. Среди сравниваемых сортов наиболее продуктивными были сорта Август и Исилюльский: прибавки урожайности семян к неудобренному контролю составили 0.25–0.47 и 0.50–0.64 т/га соответственно [71].

На черноземе выщелоченном среднемощном малогумусном среднесуглинистом в условиях Алтайского края припосевное внесение АЗФК в дозах 60, 90 и 150 кг/га и N_{aa} в дозах 30 и 60 кг/га в физической

массе повышало сбор семян масличного льна сорта Северный на 0.13–0.24 т/га, или на 10–19%. Дополнительное опрыскивание растений льна в фазе “елочки” раствором препарата Интермаг Профи Олеистые (1 л/га) увеличивало сбор семян на 0.03–0.13 т/га. При этом отмечено снижение эффективности внекорневой подкормки по мере увеличения дозы удобрения при посеве: на неудобренном фоне внекорневая подкормка препаратом увеличивала сбор семян льна на 0.13 т/га, на фоне с припосевным внесением АЗФК в дозах 60, 90 и 150 кг/га — на 0.11, 0.07 и 0.04 т/га соответственно [72]. В другом опыте припосевное внесение сеялкой “Джон Дир 530” N30 в форме N_{aa} увеличивало сбор семян льна сорта Северный в среднем за 2 года на 0.15 т/га, или на 16%, применение N16P16K16 в форме АЗФК — на 0.12 т/га (на 13%), использование N41P24K24 (АЗФК + N_{aa}) — на 0.24 т/га (на 26%) [73]. В опыте по изучению эффективности внесения под культивацию различных видов жидких и твердых минеральных азотных удобрений (КАС-28, КАС-23 + S, N_{aa}, N_a) на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом с высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия установлено, что применение азота в дозах от 21 до 64.5 кг д.в./га обеспечивало прибавку урожайности семян масличного льна в размере 0.07–0.40 т/га с оплатой от 3.3 до 7.8 кг семян/кг д.в. азота. Лучший результат получен при внесении под культивацию КАС-32 (N64.5) 150 л/га [74]. В другом опыте оценили эффективность припосевного внесения разных доз КАС-32, Na и ДАФК (10 : 26 : 26). Выявлено, что самая высокая урожайность семян (2.23 т/га) отмечена при совместном внесении КАС-32 (50 кг/га), Na (50 кг/га) и ДАФК (80 кг/га): прибавка к неудобренному контролю составила 0.80 т/га, или 56%, с оплатой 10.5 кг семян/кг д.в. удобрений. Также эффективным было применение ДАФК (N8P21K21), что увеличило сбор семян льна на 0.56 т/га, или на 39% к неудобренному контролю, с оплатой 11.2 кг семян/кг д.в. удобрений [75].

На черноземе обыкновенном тяжелосуглинистом в условиях степной зоны Западной Сибири (Омская обл.) масличный лен положительно реагировал на предпосевное внесение минеральных удобрений: в среднем за 2 года исследования прибавки урожая от применения удобрений составили от 0.24 до 0.84 т/га. Наибольший сбор семян льна обеспечили варианты N60P90, N60P30K30 и N60P60 [76].

В исследованиях Сибирской опытной станции Всероссийского НИИ масличных культур на черноземе обыкновенном тяжелосуглинистом оценили сортовую отзывчивость различных сортов масличного льна (Легур, Исилюльский, Северный, Сокол, № 22768) на внесение возрастающих доз минеральных удобрений (N30P60K60, N60P90K90 и N90P120K120). Установлено, что минеральные удобрения оказывали существенное влияние

на урожайность семян и сбор масла льна. Наиболее отзывчивыми на внесение удобрений были сорт Сокол (дополнительный сбор семян к неудобренному контролю в среднем за годы исследования составил 0.27–0.43 т/га) и № 22768 (дополнительный сбор 0.22–0.37 т/га). Максимальная в опыте прибавка урожая семян (0.43 т/га с оплатой 1 кг д.в. NPK, равной 1.30 кг льносемян) отмечена у сорта Сокол при внесении N90P120K120 [77].

В условиях Алтайского края на черноземе обыкновенном среднесуглинистом с высокой обеспеченностью подвижными формами фосфора и калия припосевное внесение минеральных удобрений увеличивало сбор семян льна сорта Северный в зависимости от дозы на 0.05–0.30 т/га, или на 5–32%. Максимальную прибавку урожайности обеспечивало применение N32P14K14 (90 кг АЗФК/га + 50 кг N_{aa}/га) [78].

На черноземе обыкновенном тяжелосуглинистом в условиях Запорожской обл. установлено, что наибольшую урожайность семян масличного льна сорта Орфей (2.05–2.08 т/га) и Водограй (1.92–1.94 т/га) формировали при внесении N50P50K50: прибавка к неудобренному контролю равнялась 0.28–0.30 и 0.33–0.36 т/га соответственно. Прирост урожайности льна масличного сорта Водограй от применения сидерата составил 0.10–0.13 т/га, а сорта Орфей – 0.05–0.06 т/га [79].

На черноземе южном маломощном малогумусном Алтайского края со средним содержанием подвижных форм фосфора и калия припосевное внесение N28P39K39 в форме ДАФК повысило урожайность семян льна в среднем на 0.20 т/га, или на 19% [80].

На черноземе южном карбонатном в условиях Республики Казахстан масличный лен лучше отзывался на внесение минеральных удобрений на фоне нулевой обработки почвы по сравнению с традиционной отвальной. Прибавки урожайности льносемян в среднем за 3 года исследования составили на фоне традиционной отвальной обработки почвы 0.07 т/га, или 9%, на фоне нулевой – 0.14 т/га, или 17% [81].

Каштановые почвы. На темно-каштановой среднечесучей малогумусной почве сухой степи Алтайского края изучали эффективность припосевного внесения удобрений при разных сроках сева льна-межеумка. Установлено, что внесение N12 и N24 в форме N_{aa} в ранний (1-й) срок сева увеличивало урожайность семян на 0.11 и 0.26 т/га, во 2-й срок – на 0.26 и 0.25 т/га соответственно. Внесение N12P12K12 и N16P16K16 в форме АЗФК увеличивало сбор семян соответственно дозам при 1-м сроке сева на 0.14 и 0.18 т/га, при 2-м сроке – на 0.10 и 0.13 т/га [82].

Имеются сведения о положительной реакции масличного льна повышением его семенной продуктивности на применение органоминеральных и бактериальных удобрений. Например, в условиях

Калужской обл. на дерново-подзолистой супесчаной почве оценили действие органоминеральных удобрений (ОМУ) и обезвоженного осадка сточных вод (ООСВ) при возделывании масличного льна сорта Исток. Установлено, что в среднем за 3 года исследования их применение способствовало увеличению высоты растений к моменту уборки с 40.1 до 54.3–57.8 см, площади листовой поверхности – с 12.5 до 14.7–16.0 тыс. м²/га, повышению сбора семян – с 0.80 до 1.09–1.27 т/га, или на 36–59% к неудобренному контролю. Применение ОМУ снижало переход кадмия, никеля, свинца из почвы в растения, повышало содержание белка и микроэлементов в семенах льна [83].

В исследованиях Донского ГАУ в условиях Ростовской обл. на черноземе южном со средним содержанием подвижных форм фосфора и повышенным – калия было изучено влияние минеральных, бактериальных удобрений и их совместного применения на урожайность семян масличного льна сорта ВНИИМК 620. Установлено, что уровень урожайности по годам и эффективность удобрений зависели от условий увлажнения в период вегетации льна. Внесение N30P30 и N30P30K30 достоверно увеличивало в среднем за 3 года сбор семян льна на 0.38 и 0.39 т/га, или на 37 и 38% соответственно. Внесение бактериальных препаратов (Агрофил, препарат 1771, Мизорин) в чистом виде было менее эффективным по сравнению с применением минеральных удобрений: прибавки урожая семян равнялись 0.16–0.23 т/га. Совместное внесение минеральных и бактериальных удобрений не приводило к повышению семенной продуктивности льна: прирост урожая от совместного применения был равен 0.09–0.14 т/га, или на 9–14% меньше, чем от одностороннего внесения минеральных удобрений. Внесение минеральных удобрений оказывало положительное влияние на масличность семян льна. Максимальный сбор масла в опыте (191 кг/га) в среднем за 3 года был получен при внесении N30P30K30 [84].

Лен относится к группе культур, чувствительных к дефициту бора, меди и цинка. На их недостаток лен реагирует слабым развитием и отставанием в росте [32, 85, 86]. Известно, что при дефиците бора отмирают точки роста побегов льна уже во время появления 2-й пары настоящих листьев [87–90]. Недостаток цинка приводит к подавлению роста, отмиранию верхушечных меристем, усыханию главного стебля [32]. При дефиците меди у льна наблюдают подавление роста междоузлий и формирования репродуктивных органов [88].

В исследованиях Института почвоведения и агрохимии (Республика Беларусь) на дерново-подзолистой супесчаной почве с низкой обеспеченностью микроэлементами на фоне минеральных удобрений (N60P60K120) внесение микроудобрений

МикроСтим-Цинк, Бор в дозе $B0.1Zn0.16$ и МикроСтим-Цинк, Медь в дозе $Zn0.1Cu0.03$ в некорневые подкормки масличного льна повышали урожайность семян на 0.77 и 0.72 т/га. На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве со средней обеспеченностью микроэлементами на фоне внесения $N60P60K120$ внесение жидких микроудобрений МикроСил в некорневую подкормку масличного льна в фазе “елочка” способствовало повышению сбора льносемян до 1.73–1.88 т/га при урожайности в фоновом варианте 1.43 т/га [91].

В опытах РУП “Институт льна” (Республика Беларусь) на дерново-подзолистой почве применение азота дробно с микроудобрениями (B, Zn) способствовало созданию дополнительного урожая семян льна сорта Илим на 0.04–0.14 т/га, или на 2–9% [92].

В опыте на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве полевой станции РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева 2-кратное опрыскивание посевов масличного льна сорта Северный препаратами Хелатон Экстра и Хелат Zn с интервалом 10 сут в фазе “елочки” увеличивало урожайность семян на 0.12 и 0.24 т/га соответственно [93, 94].

Эффективны и внекорневые подкормки вегетирующих растений масличного льна растворами удобрений. Например, в исследованиях Института сельского хозяйства Карпатского региона в условиях Западной Лесостепи Украины на серой лесной поверхностно оглеенной почве внекорневая подкормка растений масличного льна сорта Водограй карбамидом, сульфатом магния и препаратом Нутривант плюс масличный по 2 кг/га дважды (в фазе “елочки” и бутонизации) на фоне полного удобрения ($N60P30K60$) способствовало увеличению сбора маслосемян на 0.41 т/га, или 15% [95].

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в первом минимуме для формирования прибавки урожая семян масличного льна выступает азот. Оптимальные его дозы зависят от условий внешней среды и соответствуют дозам $N30$ – 60 . При этом наилучшая окупаемость 1 кг внесенного азота достигается при дозе не более 30 кг д.в./га. Этот вывод вполне согласуется с общероссийскими рекомендациями, в которых предлагают при низкой обеспеченности почвы элементами питания вносить $N60P60K60$, при средней обеспеченности – $N30P30K30$ или $N30P30$. Избыточное азотное питание масличного льна вызывает нерациональное потребление азота, фосфора и калия без увеличения урожайности основной продукции [96].

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА МАСЛИЧНОСТЬ СЕМЯН ЛЬНА

Семена масличного льна славятся богатым набором пищевых веществ, или иначе – нутриентов. Усредненный компонентный состав льняного семени: 21% – белки,

41% – жиры, 27% – клетчатка, 3% – витамины, минералы, фенольные соединения и др. [107, 108].

Наиболее важным показателем качества семян масличного льна выступает содержание в них масла, количество которого варьирует существенно. Например, по данным Минкевича, масличность семян составляет 42.3–44.5% [28], по сведениям Рыжеевой – 39–49% [109], в исследованиях Ярош с сотр. – 48–52% [110]. Имеются сведения, что масличность отдельных сортов масличного льна может достигать 54% [111].

Данные публикаций свидетельствуют, что масличность семян льна определяется многими факторами: особенностями сорта, погодными условиями периода вегетации растений, дозами и способами внесения удобрений и т.п. Например, в исследованиях Всероссийского НИИ масличных культур на черноземе выщелоченном (Краснодарский край) и на черноземе обыкновенном (Ростовская обл.) масличный лен сорта ВНИИМК 620 содержал на 2.4% больше масла в семенах, чем сорт Небесный (46.7 и 44.3% соответственно), при этом внесение удобрений способствовало его снижению на 0.7% [66]. В опытах в условиях Кабардино-Балкарии содержание растительного жира в семенах льна было больше у сорта ВНИИМК 630 (51.7%), чем у сортов Ручеек и ВНИИМК 620 (51.2 и 48.6% соответственно). Применение $P60K30$ увеличивало масличность семян сорта Ручеек на 1.2%, сортов ВНИИМК 620 и ВНИИМК 630 – на 0.9%. Внесение азота на РК-фоне снижало содержание масла в семенах по сравнению с контролем. Максимальная масличность семян всех сортов отмечена в варианте $N120P60K30$ [64].

Снижение масличности семян льна при внесении удобрений отмечали и другие авторы [48, 52, 57, 58, 71, 79, 112, 113, 116, 117, 118]. В то же время в исследовании [91] на дерново-подзолистой супесчаной почве внесение $N60P60K120Zn0.2$ повышало содержание масла в семенах на фоне разной обеспеченности почвы бором на 0.5–3.9%. Увеличение масличности семян от внесения минеральных удобрений отмечали и в прочих опытах [53–56, 61, 69, 73, 74, 82, 84, 99, 114, 115]. Встречаются публикации, в которых применение удобрений не влияло на масличность семян льна [49, 67, 77]. В то же время в большинстве случаев применение удобрений под масличный лен увеличивает сбор растительного жира с единицы площади в результате роста урожайности маслосемян.

ЗАТРАТЫ АЗОТА, ФОСФОРА И КАЛИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЯ СЕМЯН МАСЛИЧНОГО ЛЬНА

При разработке научно обоснованной системы удобрения с использованием расчетных методов определения доз и других балансовых расчетов

необходимы показатели относительного выноса основных элементов питания (N , P_2O_5 , K_2O) с единицей основной продукции. Такие данные для масличного льна имеют практическую значимость, но они не так уж многочисленны. Опубликованные сведения об относительном выносе элементов питания урожаем семян масличного льна представлены в табл. 1.

Приведенные данные свидетельствуют о резком варьировании показателей относительного выноса питательных веществ масличным льном. Например, минимальный вынос азота 1 т семян масличного льна (с учетом побочной продукции) составил ~16 кг/т (дерново-подзолистая почва, Удмуртская республика), а максимальное – 80 кг/т (черноземные

Таблица 1. Относительный вынос элементов питания урожаем семян масличного льна

Почва	Сорт	Потребление, кг/т семян			Источник	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
Центральное Нечерноземье (Тверская область)						
Дерново-подзолистая	ЛМ 98	33–47	14–19	36–61	[55]	
Удмуртская Республика						
Дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая	ВНИИМК 620	43.3–43.4	26.6–26.7	30.5–31.2	[57]	
	Северный	43.5–45.8	27.6–27.7	31.0–31.1		
Дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая (опыт 1)	ВНИИМК 620	31.8	10.1	29.6	[97]	
	Norlin	24.8	8.7	23.3		
	Воронежский	27.0	10.3	25.6		
	ЛМ 96	28.3	11.5	25.8		
	N3829	25.9	10.7	21.9		
	Atalante	32.8	11.5	27.4		
	Mo Eregor	27.7	9.6	23.3		
	ЛМ 92	25.3	9.9	20.9		
	Clark	31.0	10.4	22.9		
	Culbert	30.5	10.6	22.4		
	Barbara	26.0	9.3	23.1		
	Северный	25.1	9.0	23.3		
	ЛМ 98	34.3	11.5	25.3		
	Linda	30.0	9.8	25.5		
	Flanders	26.3	7.8	25.4		
	Дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая (опыт 2)	ВНИИМК 620	32.9	10.8	20.1	[97]
			32.3	10.5	20.4	
		38.9	10.7	25.6		
		36.8	13.5	26.1		
		38.3	13.6	23.6		
		36.4	11.9	25.4		
		40.0	13.4	26.0		
		38.7	12.6	22.9		
		38.0	13.1	28.7		
		36.7	11.2	23.9		
Дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая (опыт 3)	ВНИИМК 620	22.2	16.7	23.4	[97]	
		21.7	15.6	21.8		
		18.8	13.5	20.6		
		15.9	11.0	20.2		
Дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая (опыт 5)	ВНИИМК 620	28.9	13.6	27.3	[97, 98]	
		32.1	15.7	30.0		
		28.0	14.7	27.2		
		27.0	13.7	25.5		
		23.0	11.1	21.5		

Таблица 1. Окончание

Почва	Сорт	Потребление, кг/т семян			Источник
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая (опыт 4)	ВНИИМК 620	15.9	9.2	21.8	[97]
		25.8	13.2	24.1	
		18.8	10.2	26.4	
		20.7	11.8	24.5	
		19.0	11.6	20.7	
		18.3	10.3	20.5	
		26.0	12.9	22.9	
		25.6	13.4	23.6	
		24.1	11.5	21.9	
		23.0	13.6	22.4	
		19.1	11.3	21.5	
		17.1	10.2	20.9	
		21.0	11.0	22.4	
		25.7	13.3	23.8	
		21.4	10.8	24.2	
		21.8	12.7	23.4	
		19.0	11.5	21.1	
		17.7	10.3	20.7	
Республика Беларусь					
Дерново-подзолистая	Брестский	39.1—42.7	23.2—25.1	39.7—45.9	[99]
	—	42	16	38	[100]
Среднее Поволжье					
Черноземные и каштановые почвы	—	50—65	10—15	40—55	[101]
	Кинельский 2000	51—63	10—12	41—55	
Западная Сибирь (Омская область)					
Чернозем обыкновенный	Северный	42.5—53.4	9.0—10.6	69.9—94.3	[102]
Алтайский край					
Чернозем	Северный	55—72	8—9	26—40	[74]
Чернозем выщелоченный (лен после льна)	То же	30.3—39.3	7.1—8.6	18.6—24.1	[103]*
(лен после чистого пара)	—//—	39.2—66.3	7.5—9.5	21.6—39.8	[104]*
Чернозем обыкновенный	—//—	53—69	7—9	58—66	
Чернозем южный	—//—	41—59	17—25	26—51	[105]*
Северный Казахстан (Костанайская область)					
Черноземные и каштановые почвы	—	50—80	15—30	40—55	[106]

* Рассчитано автором настоящей статьи.

и каштановые почвы Северного Казахстана), т.е. они отличались между собой в 5 раз. Минимальный и максимальный показатель относительного выноса фосфора был равен 7.8 и 26.7 кг/т (разница в 3.5 раза), калия – 18.6 и 94.3 кг/т (5 раз) соответственно.

Рассчитаны средние показатели представленной выборки и доверительные интервалы. Для азота они составили 34.8 кг/т (30.5–39.2 кг/т), фосфора – 13.0

(11.4–14.5) и калия – 29.9 кг/т (25.8–33.9 кг/т). Их можно использовать в качестве нормативных показателей при расчете доз удобрений под масличный лен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесение удобрений является эффективным способом повышения семенной продуктивности льна.

Результативность действия удобрений на величину урожая и масличность семян зависит от множества причин: метеорологических условий в период вегетации растений, доз удобрений, сроков и приемов их внесения, способов обработки почвы, сортовых особенностей и т.п.

В первом минимуме для формирования прибавки урожая семян масличного льна выступает азот. Оптимальные его дозы зависят от условий внешней среды и соответствуют N30–60. При этом лучшая окупаемость 1 кг внесенного азота достигается при дозе не более 30 кг д.в./га.

Применение удобрений неоднозначно, зависит от конкретных условий выращивания, влияет на содержание растительного жира в семенах, снижая или увеличивая его концентрацию. В то же время применение удобрений в большинстве случаев приводит к увеличению сбора масла с единицы площади.

Приведена база данных относительного выноса основных элементов питания (N, P₂O₅, K₂O) масличным льном. Рассчитаны средние показатели и доверительные интервалы затрат элементов питания на единицу основной продукции: для азота они составили 34.8 кг/т (30.5–39.2 кг/т), фосфора – 13.0 (11.4–14.5) и калия – 29.9 кг/т (25.8–33.9 кг/т). Их можно использовать в качестве нормативных показателей при расчете доз удобрений на планируемый урожай при других балансовых расчетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hall L.M., Booker H., Siloto R.M.P., Jhala A.J., Wesekale R.J. Flax (*Linum usitatissimum* L.) // Industrial Oil Crops. 1st ed. / Ed. McKeon T.A., Hayes D.G., Hildebrand D.F., Weslake R.J. Amsterdam, [Netherlands]: Academic Press, AOCS Press, 2016. 453 p.
2. Turin E.N., Susskiy A.N., Stukalov R.S., Shestopalov M.V., Turina E.L., Ivanov V.Iu. *Linum usitatissimum* L. is the most important crop in Russia for the production of high-quality oil with low cost (review) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Iss. 640. P. 1–6.
3. Пестус М.В., Шинтарь И.М., Пестус П.В. Состояние и перспективы производства и переработки льна в условиях Гродненской области: монограф. Гродно: ГГАУ, 2011. 168 с.
4. Jhala A.J., Hall L.M. Flax (*Linum usitatissimum* L.): Current uses and future applications // Austral. J. Basic Appl. Sci. 2010. V. 4. № 9. P. 4304–4312.
5. Пороховинова Е.А., Кутузова С.Н., Павлов А.В., Слободкина А.А., Якушева Т.В., Брач Н.Б. Коллекция генетических ресурсов льна Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова // Письма в Вавилов. журн. генет. и селекции. 2021. № 7(2). С. 75–90.
6. Державин Л.М. Оптимизация научного обеспечения интегрированного применения удобрений в интенсивном земледелии // Агрохимия. 2007. № 7. С. 5–14.
7. Gill K.S. Flax. India, New Delhi: Indian Council of Agricultural Research, 1987. 386 p.
8. Зеленцов С.В., Зеленцов В.С., Мошненко Е.В., Рябенко Л.Г. Современные представления о филогенезе и таксономии рода *Linum* L. и льна обыкновенного (*Linum usitatissimum* L.) // Масличные культуры. Научн.-техн. бюл. ВНИИМК. 2016. Вып. 1(165). С. 106–121.
9. Nag S., Mitra J., Karmakar P.G. An overview on flax (*Linum usitatissimum* L.) and its genetic diversity // Inter. J. Agricult. Environ. Biotechnol. 2015. V. 8. № 4. P. 805–817.
10. Tutin T.G., Heywood V.H., Burges N.A., Murre D.M., Valentine D.H., Walters S.M., Webb D.M. Flora Europaea. V. 2: Rosaceae to umbelliferae. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1968. 455 p.
11. Tammes T. Mutation and evolution // Zeitschrift für Induktive Abstammungs- und Vererbungslehre. 1925. Band. 36. S. 417–426.
12. Эллади Е.В. *Linum usitatissimum* (L.) Vav. consp. nov. – Лен // Культурная флора СССР / Издается под общ. рук. акад. Вавилова Н.И.; под ред. проф. Вульф Е.В. V. Пряжильные. Часть I. М.–Л.: Гос. изд-во колхозной и совхозной лит., 1940. С. 109–207.
13. Helbaek H. Domestication of Food Plants in the Old World: Joint efforts by botanists and archeologists illuminate the obscure history of plant domestication // Science. 1959. V. 130(3372). P. 365–372.
14. Zeven A.C. Dictionary of cultivated plants and their centers of diversity, excluding ornamentals, forest trees and lower plants. Wageningen, The Netherlands: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1982. 263 p.
15. Harris S. Flax fibre: Innovation and change in the early Neolithic a technological and material perspective // Textil. Soc. Amer. Symp. Proceed. Los Angeles, USA, 2014. P. 913.
16. van Zeist W., Bakker-Heeres J.A.H. Evidence for flax cultivation before 600 b.c. // J. Archaeol. Sci. 1975. № 2. P. 215–219.
17. Zohary D., Hopf M., Weiss E. Domestication of plants in the Old World: the origin and spread of domesticated plants in south-west Asia, Europe, and the Mediterranean Basin. 4th ed. Oxford: Oxford University Press, 2012. P. 100–103.
18. Vaisey-Genser M., Morris D.H. History of the cultivation and uses of flax seed // Flax: The genus *Linum* / Eds. Muir A.D., Westcott N.D. Boca Raton, USA: CRC Press, 2003. P. 1–21.

19. Зеленцов С.В. История культуры льна в мире и России // Масл. культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2017. Вып. 1(169). С. 93–103.
20. Smith C.E. From Vavilov to the present – A review // Econom. Bot. 1969. V. 23. Iss. 1. P. 2–19.
21. Кутузова С.Н., Пороховинова Е.А., Пендинен Г.И. Происхождение и эволюция *Linum usitatissimum* L. // Тр. по прикл. бот., генет. и селекции. 2015. Т. 176. Вып. 4. С. 436–455.
22. Сизов А.И. Лен. М.–Л.: Сельхозгиз, 1955. 253 с.
23. Черноморская Н.М., Станкевич А.К. К вопросу о внутривидовой классификации льна обыкновенного (*Linum usitatissimum* L.) // Сб. научн. тр. по прикл. бот., генет. и селекции. 1987. Т. 113. С. 53–63.
24. ЩигOLEV А.А. Исследование темпов развития растений // Вопросы фенологии (сер. Географический сб.) / Под ред. Руденко А.И. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1957. Вып. 9. С. 160–172.
25. Купцов А.И. Введение в географию культурных растений. М.: Наука, 1975. 295 с.
26. Кишлян Н.В., Рожмина Т.А., Кудрявцева Л.П., Киселева Т.С. Изучение сортообразцов в коллекции масличного льна на устойчивость к почвенной кислотности // Масл. культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2010. Вып. 2(144–145). С. 107–112.
27. Справочник агронома по сельскохозяйственной метеорологии. Нечерноземная зона Европейской части России / Под ред. Грингофа И.Г. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 383–392.
28. Минкевич И.А. Лен масличный. М.: Сельхозгиз, 1957. 179 с.
29. Красовская И.В. Корневая система различных сортов льна // Тр. по прикл. бот., генет. и селекции. 1929. Т. 22. Вып. 1. С. 43–105.
30. Красовская И.В. Корневая система сельскохозяйственных растений при орошении // Пробл. ботаники. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1955. Вып. 2. С. 283–316.
31. Alessi J., Power J. F. Influence of row spacing, irrigation, and weeds on dryland flax yield, quality, and water use // Agron. J. 1970. V. 62. № 5. P. 635–637.
32. Дьяков А.Б. Физиология и экология льна. Краснодар, 2006. 214 с.
33. Буряков Ю.П., Ивановский В.К., Осипов П.Ф. Масличный лен. М.: Россельхозиздат, 1971. 110 с.
34. Ефимов В.Н., Донских И.Н., Царенко В.П. Система удобрения. М.: КолосС, 2003. 320 с.
35. Минеев В.Г. Агрохимия. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, КолосС, 2004. 720 с.
36. Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М., 2008. 340 с.
37. Bailey L.D., Grant C.A. Fertilizer phosphorus placement studies on calcareous and non-calcareous chernozemic soils: growth, P-uptake and yield of flax // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1989. V. 20. № 5/6. P. 635–654.
38. Singh B.N., Kooroor G.P., Choudhri R.S. The light factor in crop production // Proceed. National Acad. Sci. India. Section B – Biol. Sci. 1938. V. 7. № 3. P. 143–160.
39. Церлинг В.В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат, 1990. 235 с.
40. Церлинг В.В., Зинкевич А.С., Тихомирова В.Я. Химическая диагностика питания льна-долгунца // Вестн. с.-х. науки. 1975. № 5. С. 115–124.
41. Гро А. Практическое руководство по применению удобрений / Пер. с фр. Емельяновой Н.Е. и Ильчука Н.М.; Под ред. Петербургского А.В. М.: Колос, 1966. 351 с.
42. Gregory F.G., Veale J.A. A reassessment of the problem of apical dominance // 11st Symposia of the Society for Experimental Biology. 1957. P. 1–20.
43. McIntyre G.I. Mechanism of apical dominance in plants // Nature. 1964. V. 203. № 4950. P. 1190–1191.
44. McIntyre G.I. The correlative inhibition of bud and shoot growth in flax (*Linum usitatissimum*). Some factors affecting the pattern and degree of inhibition // Canad. J. Bot. 1975. V. 53. № 4. P. 390–402.
45. Гулякин И.В. Система применения удобрений. 2-е изд. М.: Колос, 1977. 240 с.
46. Бушнев А.С. Роль сортовых агротехник в реализации продуктивности масличных культур с учетом изменяющихся погодно-климатических условий // Масл. культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2011. Вып. 2(148–149). С. 61–67.
47. Носевич М.А., Абушинова Е.В. Особенности развития и урожайности льна масличного в зависимости от доз минеральных удобрений // Изв. СПбГАУ. 2016. № 42. С. 26–30.
48. Носевич М.А., Абушинова Е.В., Рошин В.И., Ведерников Д.Н. Влияние уровня минерального питания на урожайность, накопление и состав масла семян льна масличного в условиях Ленинградской области // Масл. культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2017. Вып. 2(170). С. 64–69.
49. Абушинова Е.В. Продуктивность семян льна масличного в зависимости от применения азотных удобрений на дерново-карбонатных почвах в условиях Ленинградской области: Дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2018. 142 с.
50. Мамырко Ю.В., Бушнев А.С. Изменение элементов структуры урожая льна масличного в зависимости от погодных условий, применения удобрений и нормы высева семян // Зерн. хоз-во России. 2020. № 1(67). С. 11–16.

51. Колотов А.П. Урожайность льна масличного на серых лесных почвах Среднего Урала // Вестн. КрасГАУ. 2021. № 5. С. 3–11.
52. Першаков А.Ю., Белкина Р.И., Сулейменова А.К. Отзывчивость сортов льна масличного на возрастающие нормы минеральных удобрений // Вестн. КрасГАУ. 2021. № 6. С. 11–17.
53. Кочкин А.С., Есаулко А.Н. Оптимизация минерального питания льна масличного на черноземе выщелоченном // Плодородие. 2010. № 2. С. 34–36.
54. Кочкин А.С. Влияние минеральных удобрений на урожайность льна масличного на черноземе выщелоченном: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Ставрополь, 2010. 24 с.
55. Сорокина О.Ю. Минеральное питание льна масличного при использовании традиционных и новых органоминеральных удобрений // Масл. культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2018. Вып. 3(175). С. 46–51.
56. Сорокина О.Ю. Эффективность минеральных и органоминеральных удобрений при возделывании льна масличного в условиях Центрального Нечерноземья // Плодородие. 2021. № 1. С. 7–9.
57. Галиев Р.Р. Приемы зяблевой обработки почвы, удобрения и инсектициды в технологии возделывания льна масличного в среднем Урале: Дис. ... канд. с.-х. наук. Ижевск, 2020. 181 с.
58. Голуб И.А., Санего Н.А. Эффективность применения минеральных форм удобрений на льне масличном // Земледел. и растениевод-во. 2020. № 5(132). С. 47–50.
59. Виноградов Д.В., Перегудов В.И., Артемова Н.А., Поляков О.В. Особенности формирования продуктивности льна масличного при разном уровне питания // Агрохим. вестн. 2010. № 3. С. 23–24.
60. Сычёв В.Г., Янишевский В.П., Янишевская О.Л. Влияние уровня минерального питания на величину и качество урожая льна масличного // Плодородие. 2011. № 6. С. 11–13.
61. Виноградов Д.В., Кунцевич А.А. Влияние норм высева и удобрений на продуктивность льна масличного // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 6. С. 182–186.
62. Ровна О.В. Продуктивність льону олійного залежно від позакореневого підживлення // Вісник Сумського нац. аграрного університету. Сер. «Агрономія і біологія». 2014. Вип. 9(28). С. 97–100.
63. Шамурзаев Р.И., Ханиев М.К. Продуктивность и качество семян льна масличного в зависимости от уровня минерального питания // Аграрн. наука. 2009. № 10. С. 17–19.
64. Шамурзаев Р.И. Научное обоснование повышения продуктивности и качества семян льна масличного в предгорье Кабардино-Балкарской Республики: Автореф. ... дис. канд. с.-х. наук. Краснодар, 2011. 23 с.
65. Ханиев И.М., Одижеев А.А., Атабиев А.Б. Продуктивность и качество семян сортов льна масличного в зависимости от уровня минерального питания // Актуальные и новые направления в селекции и семеноводстве сельскохозяйственных культур: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. (Владикавказ, 18 февраля 2017 г.). Владикавказ: Изд-во ГорскГАУ, 2017. С. 84–85.
66. Бушнев А.С., Горбаченко Ф.И., Картамышева Е.В., Лучкина Т.Н., Семеренко С.А., Подлесный С.П., Мамырко Ю.В. Совершенствование элементов технологии возделывания льна масличного в условиях южного региона Российской Федерации // Масл. культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2015. Вып. 2(162). С. 50–62.
67. Бражников В.Н., Бражникова О.Ф., Бражников Д.В., Данилов М.В. Влияние удобрений на продуктивность льна масличного сорта Исток // Изв. Самар. НЦ РАН. 2019. Т. 21. № 2. С. 68–72.
68. Курмашева Н.Г. Продуктивность льна масличного под влиянием навоза и минеральных удобрений // Рос. электр. журн. 2019. № 3(33). С. 200–208.
69. Гайнуллин П.М. Возродим масличный лен // Достиж. науки и техн. АПК. 2008. № 5. С. 37–38.
70. Порсев И.Н., Исаенко В.А., Кунцевич Н.А., Саломатина К.С. Определение эффективности минеральных удобрений на льне в условиях Южного Урала // Изв. высш. уч. завед. Урал. регион. 2018. № 3. С. 115–118.
71. Першаков А.Ю. Совершенствование технологии возделывания льна масличного в условиях Северного Завуралья: Дис. ... канд. с.-х. наук. Тюмень, 2022. 134 с.
72. Антонова О.И., Герлец Э.А. Действие листовых подкормок льна масличного на урожайность и качество семян по разным удобренным фонам в условиях умеренно засушливой колочной степи // Вестн. АлтайГАУ. 2012. № 12(98). С. 5–8.
73. Антонова О.И., Латарцев П.Ю. Эффективность припосевного внесения аммиачной селитры и азофоски под лен масличный при его повторном посеве // Вестн. АлтайГАУ. 2014. № 6(116). С. 5–10.
74. Латарцев П.Ю., Антонова О.И. Эффективность разных видов азотных удобрений под лен масличный в условиях колочной степи Алтайского края // Вестн. АлтайГАУ. 2020. № 10(192). С. 13–19.
75. Латарцев П.Ю., Антонова О.И. Эффективность припосевного внесения разных доз КАС-32, сульфата аммония и диаммофоски при возделывании льна масличного в умеренно-засушливой колочной степи // Вестн. АлтайГАУ. 2021. № 12(206). С. 11–16.
76. Шумская А.А., Ермохин Ю.И. Влияние азотных удобрений на урожайность льна масличного на обыкновенном черноземе степной зоны Полтавского района Омской области // Вестн. ОмскГАУ. 2015. № 3(19). С. 7–12.

77. *Храмцов И.Ф., Кузнецова Г.Н.* Сортовая отзывчивость льна масличного на минеральные удобрения // *Агрохимия*. 2004. № 10. С. 33–37.
78. *Антонова О.И., Черепанов С.Н.* Влияние припосевного внесения удобрений на урожайность семян, соломки льна масличного и показатели их качества по предшественнику пшеницы // *Вестн. АлтайГАУ*. 2014. № 5(115). С. 5–9.
79. *Ручка В.О., Таранець Т.О.* Сидерати – як альтернатива мінеральним добривам при вирощуванні олійного льону // *Науково-технічний бюл. Інституту олійних культур НААН*. 2016. № 23. С. 162–168.
80. *Чавкунькин С.М.* Эффективность диаммофоски и биологически активных веществ при возделывании льна межеумка на южных черноземах засушливой степи: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Барнаул, 2005. 21 с.
81. *Филонов В.М., Наздрачев Я.П., Мамыкин Е.В., Назаров П.Е.* Минимализация обработки почвы в зернопаровом севообороте и эффективность минеральных удобрений // *Sci. World*. 2017. V. I. № 10(50). С. 66–70.
82. *Черенков О.А.* Формирование продуктивности льна-межеумка под влиянием удобрений на фоне гербицидов при посеве в разные сроки на темно-каштановых почвах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Барнаул, 2009. 21 с.
83. *Белопухов С.Л., Сюняев Н.К., Сюняева О.И., Дмитриевская И.И.* Агроэкологическая оценка последствий органо-минеральных удобрений при выращивании масличного льна на легких дерново-подзолистых почвах // *Агрохимия*. 2015. № 6. С. 37–43.
84. *Турчин В.В., Нужнов И.В., Мухортова В.К.* Влияние минеральных удобрений и бактериальных препаратов на урожайность и качество семян льна масличного в условиях Ростовской области // *Вестн. МичуринскГАУ*. 2017. № 4. С. 19–24.
85. *Цыганов А.Р., Персикова Т.Ф., Реуцкая С.Ф.* Микроэлементы и микроудобрения: учеб. пособ. Минск: УМЦ МСХиП РБ, 1998. 122 с.
86. *Дридигер В.К., Есаулко А.Н., Дорожко Г.Р.* Лен масличный на Ставрополье. Ставрополь: Параграф, 2013. 148 с.
87. *Ратнер Е.И.* Питание растений и применение удобрений. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1965. 223 с.
88. *Магницкий К.* Диагностика потребности растений в удобрениях. М.: Моск. рабочий, 1972. 272 с.
89. *Школьник М.Я., Маевская А.Н.* Различия в чувствительности к борному дефициту разных таксонов и их причины // *Бот. журн.* 1977. Т. 62. № 10. С. 1528–1540.
90. *Школьник М.Я., Крупникова Т.А., Смирнов Ю.С.* Активность полифенолоксидазы и чувствительность к недостатку бора у однодольных и двудольных растений // *Физиология растений*. 1981. Т. 28. Вып. 2. С. 391–397.
91. *Пукалова Е.Н.* Влияние различных форм и доз микроудобрений на урожайность и качество семян льна масличного на дерново-подзолистых почвах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 2018. 22 с.
92. *Санего Н.А.* Влияние дробного внесения азота и микроудобрений на семенную продуктивность льна масличного // *Земледел. и селекц. в Беларуси*. 2022. № 58. С. 118–124.
93. *Жарких О.А., Дмитриевская И.И., Белопухов С.Л.* Применение новых хелатных препаратов на льне масличном // *Изв. ТСХА*. 2021. Вып. 4. С. 30–40.
94. *Жарких О.А.* Влияние новых хелатных препаратов на урожайность и качество продукции льна в условиях Центрального района Нечерноземной зоны России: Дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2022. 142 с.
95. *Ровна О.В.* Продуктивність льону олійного залежно від позакореневого підживлення // *Вісник Сумського національного аграрного університету. Сер. «Агрономія і біологія»*. 2014. Вип. 9(28). С. 97–100.
96. *Лукомец В.М., Бочкарев Н.И., Горлов С.Л., Тишков Н.М., Пивень В.Т., Бушнев А.С., Семеренко С.А., Дряхлов А.И., Дряхлов А.А., Шафоростов В.Д., Кривошлыков К.М., Мамырко Ю.В., Ревякин Е.Л.* Перспективная ресурсосберегающая технология производства льна масличного: Метод. рекоменд. М.: Росинформагротех, 2010. 52 с.
97. *Корепанова К.С.* Реакция льна масличного на абиотические условия и приемы посева в Среднем Предуралье: Дис. ... канд. с.-х. наук. Ижевск, 2016. 358 с.
98. *Гореева В.Н., Корепанова Е.В., Фатыхов И.Ш., Корепанова К.В.* Влияние предпосевной обработки семян и приемов посева на вынос азота, фосфора и калия с урожаем льна масличного ВНИИМК 620 в условиях Среднего Предуралья // *Перм. аграрн. вестн.* 2015. № 4(12). С. 13–20.
99. *Ходянков А.А., Гаврюшин И.Ю.* Влияние минеральных удобрений и брассиностероидов на продуктивность льна масличного и вынос элементов питания // *Почвовед. и агрохим.* 2013. № 1(50). С. 198–208.
100. *Прудников В.А., Евсеев П.А., Белов Д.А.* Влияние уровня азотного питания на содержание и потребление элементов питания растениями льна масличного по фазам развития // *Земледел. и защита раст.* 2014. № 1. С. 41–43.
101. *Санин А.А., Косых Л.А., Борисов В.В.* Технология возделывания льна масличного в зоне Среднего Поволжья: рекомендации. Кинель, 2014. 15 с.
102. *Кузнецова Г.Н.* Оптимизация минерального питания льна масличного в южной лесостепи Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Омск, 2004. 19 с.

103. *Латарцев П.Ю., Антонова О.И.* Особенности потребления основных элементов питания льном масличным в связи с внесением удобрений // Вестн. АлтайГАУ. 2021. № 10. С. 32–37.
104. *Антонова О.И., Черепанов С.Н.* Влияние припосевного внесения удобрений на урожайность семян, соломки льна масличного и показатели их качества по предшественнику пшеницы // Вестн. АлтайГАУ. 2014. № 5(115). С. 5–9.
105. *Антонова О.И., Чавкунькин С.М.* Влияние биологически активных веществ на вынос элементов питания в зависимости от дозы и способа применения на льне масличном // Вестн. АлтайГАУ. 2006. № 1(21). С. 8–11.
106. *Двуреченский В.И., Нугманов А.Б., Слабуш В.И., Мельников В.А., Сидорик И.В.* Рекомендации по возделыванию льна масличного в Костанайской области. Заречное, 2011. 15 с.
107. *Dzuvor C., Taylor J., Acquah C., Pan S., Agyei D.* Bio-processing of functional ingredients from flaxseed // *Molecules*. 2018. V. 23(10). № 2444. P. 2–18.
108. *Поморова Ю.Ю., Овсепян С.К., Серова Ю.М.* Химико-биологические свойства и потенциальная ценность семян масличного льна (обзор) // Масл. культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2023. Вып. 1(193). С. 73–84.
109. *Рыжеева О.И.* Лен масличный // Руководство по селекции и семеноводству масличных культур. М.: Колос, 1967. С. 121–172.
110. *Ярош Н.П., Мегорская О.М., Иванова О.Н.* Динамика жирных кислот свободных и связанных липидов в созревающих семенах льна масличного и долгунца // Тр. по прикл. бот., генет. и селекции. 1980. Т. 66. Вып. 3. С. 28–36.
111. *Ермаков А.И., Иконникова М.И., Луковникова Г.А., Ярош Н.П.* Итоги и перспективы биохимических исследований культурных растений // Тр. по прикл. бот., генет. и селекции. 1969. Т. 41. Вып. 1. С. 326–363.
112. *Ханиева И.М., Одижев А.А., Атабиев А.Б.* Продуктивность и качество семян сортов льна масличного в зависимости от уровня минерального питания // Актуальные и новые направления в селекции и семеноводстве сельскохозяйственных культур: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. юбилею проф. С.А. Бекузаровой (Владикавказ, 18 февраля 2017 г.). Владикавказ: Изд-во ГорскГАУ, 2017. С. 84–85.
113. *Антонова О.И., Толстых А.С., Стефанькин М.П.* Сравнительная эффективность влияния минеральных и органо-минеральных удобрений на продуктивность льна масличного в засушливых условиях // Вестн. АлтайГАУ. 2011. № 12. С. 20–23.
114. *Латарцев П.Ю.* Сравнительная оценка действия разных видов и доз минеральных удобрений на элементы структуры, урожайность и качество семян льна масличного // Вестн. АлтайГАУ. 2022. № 9(215). С. 5–11.
115. *Корнейкова Ю.С., Ходянков А.А.* Агрономическая и экономическая эффективности совместного применения минеральных удобрений и регуляторов роста растений на льне масличном // Почвовед. и агрохим. 2012. № 1(48). С. 99–109.
116. *Черенков О.А., Шевяков Р.В., Вьюнова Т.Н., Сурнина Ю.В.* Влияние азофоски на формирование основных показателей качества льна масличного (межеумка) в зоне засушливой степи // Вестн. АлтайГАУ. 2009. № 11(61). С. 20–23.
117. *Першаков А.Ю., Белкина Р.И., Сулейменова А.К.* Урожайность и качество семян сортов льна масличного под влиянием удобрений в условиях северной лесостепи Тюменской области // Вестн. МичуринскГАУ. 2021. № 4(67). С. 83–87.
118. *Хаустова С.А., Першаков А.Ю., Белкина Р.И.* Влияние удобрений на урожайность и содержание жира в семенах сортов льна масличного // Достижения молодежной науки для агропромышленного комплекса: сб. мат-лов LVI научн.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Тюмень, 14–18 марта 2022 г.). Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2022. С. 62–68.

Effect of Fertilizers on Productivity and the Quality of Oilseed Flax Products

A. V. Ivoilov[#]

*N.P. Ogarev National Research Mordovian State University,
Bolshevistskaya ul. 68, Saransk 430005, Russia*

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

A review of domestic and foreign literature on the effect of fertilizers on the yield and quality of oilseed flax products (*Linum usitatissimum* L. ssp. *intermedium*) is given. It is shown that the use of fertilizers is an effective way to increase the seed productivity of flax. The effectiveness of fertilizers on the yield and oil content of seeds depends on many reasons: meteorological conditions during plant vegetation, fertilizer dosage, timing and methods of their application, methods of soil treatment, varietal characteristics, etc. In the first minimum, nitrogen acts to form an increase in the yield of oilseed flax seeds. Its optimal doses depend on environmental conditions and correspond to N30–60. At the same time, the best payback of 1 kg of applied nitrogen is achieved at a dose of no more than 30 kg of a.s./ha. The use of fertilizers is ambiguous, depending on the specific growing conditions: it affects the content of vegetable fat in seeds, reducing or increasing its concentration. At the same time, the use of fertilizers in most cases leads to an increase in oil collection per unit area. The database of removal of the main elements of nutrition (N, P₂O₅, K₂O) by oilseed flax is presented. The average values and approximate intervals of the cost of nutrients per unit of basic production were calculated: for nitrogen they amounted to 34.8 kg/t (30.5–39.2 kg/t), phosphorus – 13.0 (11.4–14.5), and potassium – 29.9 kg/t (25.8–33.9 kg/t). They can be used as normative indicators when calculating fertilizer doses for the planned harvest.

Keywords: oilseed flax (*Linum usitatissimum* L. ssp. *intermedium*), fertilizers, yield, oil content of seeds, relative removal of nutrition elements.