

ISSN 0130-8475

Институт почвоведения и агрохимии

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1961 г.

**№ 1(72)
Январь – июнь 2024 г.**

Минск
2024

УДК 631.4+631.8(476)
ББК 40.4+40.3(Бел)

Учредитель: Республиканское научное дочернее унитарное предприятие
«Институт почвоведения и агрохимии»

Свидетельство № 721 от 6 октября 2009 г.
Министерства информации Республики Беларусь

Главный редактор *Ю. К. ШАШКО*

Редакционная коллегия: В. В. ЛАПА (зам. главного редактора)
Т. М. СЕРАЯ (зам. главного редактора)
Н. Ю. ЖАБРОВСКАЯ (ответственный секретарь)

Т. Н. АЗАРЕНОК, И. Г. АСЫЛБАЕВ, И. М. БОГДЕВИЧ, И. Р. ВИЛЬДФЛУШ,
Д. Р. ИСЛАМГУЛОВ, С. А. КАСЬЯНЧИК, Н. В. КЛЕБАНОВИЧ, Е. Г. МЕЗЕНЦЕВА,
Н. А. МИХАЙЛОВСКАЯ, Г. В. ПИРОГОВСКАЯ,
Ю. В. ПУТЯТИН, М. В. РАК, В. Г. СЫЧЕВ, В. Б. ЦЫРИБКО

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ

1(72)

Январь – июнь 2024 г.

Основан в 1961 г. как сборник научных трудов «Почвоведение и агрохимия»,
с 2004 г. преобразован в периодическое издание – научный журнал
«Почвоведение и агрохимия»

Адрес редакции: 220108, г. Минск, ул. Казинца, 90
Тел. (017) 351-08-21, факс (017) 374-04-02
E-mail: brissainform@mail.ru

Ответственная за выпуск *Н. Ю. Жабровская*

Редакторы *Т. Н. Самосюк, А. С. Атлас*
Компьютерная верстка *А. С. Атлас*

Подписано в печать 22.06.2024. Формат 70x100 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 11,28. Уч.-изд. л. 10,87. Тираж 50 экз. Заказ 248.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов Республики Беларусь»
ЛП № 02330/89 от 3.03.2014. Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.

© Республиканское научное дочернее унитарное
предприятие «Институт почвоведения и агрохимии», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПОЧВЕННЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Азарёнок Т. Н., Матыченкова О. В., Дыдышко С. В., Воробей М. В. Территориальные особенности размещения посевов и анализ урожайности сои в Республике Беларусь	7
Цырибко В. Б., Устинова А. М., Логачев И. А. Влияние дефляции на горизонтальную миграцию ¹³⁷ Cs на сельскохозяйственных землях	13
Веремейчик Л. А. Экологическая модернизация земельных ресурсов как фактор повышения эффективности сельскохозяйственного производства	20
Воробей М. В., Киндеев А. Л. Геостатистический анализ внутрипольной неоднородности почвенной кислотности для проведения работ по извест- кованию	27
Цыганов А. Р., Чернуха Г. А., Чернуха В. Г. О набухании гидро- гелей в почве	35

2. ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

Серая Т. М., Богатырева Е. Н., Кирдун Т. М., Новик А. Л., Симанкова Ю. А., Торчило М. М., Жабровская Н. Ю. Влияние удобрений на урожайность гибридной озимой ржи на дерново-подзолистой супесчаной почве.....	43
Станилевич И. С., Богдевич И. М., Путятин Ю. В., Довнар В. А., Третьяков Е. С. Оценка эффективности серо- и магниесодержащих удобрений под озимые зерновые культуры с учетом обеспеченности дерново-подзолистых суглинистых почв серой и магнием	52
Мезенцева Е. Г., Кулеш О. Г., Грачёва А. А., Зенькова С. М., Красно- женова Я. С. Эффективность систем удобрения озимого рапса на дерново- подзолистой суглинистой почве	64
Мезенцева Е. Г., Кулеш О. Г., Грачева А. А., Зенькова С. М., Красно- женова Я. С. Влияния гидротермических условий и режима минерального питания на продукционный процесс кукурузы на дерново-подзолистой высокоокультуренной суглинистой почве	74
Рак М. В., Пукалова Е. Н., Корсакова В. В., Кляусова Ю. В., Гук Л. Н., Кудласевич С. Г. Параметры оптимизации питания люцерны цинком при различной обеспеченности этим элементом дерново-подзолистой супесчаной почвы	91

Михайловская Н. А., Касьянчик С. А., Барашенко Т. Б., Погирницкая Т. В., Дюсова С. В. Влияние слизиобразующих бактерий р. <i>Bacillus</i> на активность фотосинтеза бобов кормовых в зависимости от содержания глифосата в почве	99
Емельяненко Н. В., Германович Т. М. Осадки сточных вод: проблемы и возможности их использования в сельском хозяйстве.....	108
Сороко В. И., Пироговская Г. В., Хмелевский С. С., Лемешевская А. С., Гарбузова Т. В., Некрасова И. Н., Переход Д. Г. Влияние фосфогипса в действии и последствии на урожайность и качество сельскохозяйственных культур	115

3. ЮБИЛЕИ

Цытрон Галина Станиславовна	130
Рефераты	132
Правила для авторов	138

CONTENTS
1. SOIL RESOURCES AND THEIR RATIONAL USE

Azarenok T. N., Matychenkova O. V., Dydyshko S. V., Vorobey M. V. Territorial features of the placement of crops and analysis of soybean yields in the Republic of Belarus.....	7
Tsyrybka V. B., Ustsinava H. M., Lahachou I. A. Influence of deflation on the horizontal migration of ¹³⁷ Cs on agricultural lands	13
Veremeychik L. A. Ecological modernization of land resources as a factor increasing the efficiency of agricultural production.....	20
Vorobei M. V., Kindeev A. L. Expediency of taking into account intra-field heterogeneity of soil acidity in liming operations.....	27
Tsyganov A. R., Chernukha G. A., Chernukha V. G. On the swelling of hydrogels in the soil	35

2. SOIL FERTILITY AND FERTILIZATION

Seraya T. M., Bahatyrova E. N., Kirdun T. M., Novik A. L., Simankova Y. A., Torchilo M. M., Zhabrovskaya N. Yu. The effect of fertilizers on the yield of hybrid winter rye on sod-podzolic sandy loam soil	43
Stanilevich I. S., Bogdevitch I. M., Putyatin Yu. V., Dovnar V. A., Tretjakov Ye. S. The yield response of winter cereals to sulfur and magnesium containing fertilizers with regard to mobile sulfur and exchangeable magnesium supply of podzoluvisol loamy soil.....	52
Mezentseva E. G., Kulesh O. G., Gracheva A. A., Zenkova S. M., Krasnozhenova Y. S. Effectiveness of fertilizer systems for winter rape on sodd-podzol loam soil.....	64
Mezentseva E. G., Kulesh O. G., Gracheva A. A., Zenkova S. M., Krasnozhenova Y. S. Nutrition regime on the production process of corn on sodd-podzol highly cultivated loam soil.....	74
Rak M. V., Pukalova E. N., Korsakova V. V., Kliausava Yu. V., Guk L. N., Kudlasevich S. G. Parameters of optimization of alfalfa nutrition with zinc at different availability of this element in sod-podzolic sandy loam soil.....	91

Mikhailouskaya N. A., Kasyanchyk S. A., Barashenko T. B., Pogirnitskaya T. V., Dyusova S. V. Effect of mucusforming bacteria p. <i>Bacillus</i> on activity of photosynthesis in fodge beans under different glyphosate content in soil	99
Emelyanenko N. V., Germanovich T. M. Sewage sludge: problems and opportunities for their use in agriculture	108
Saroka V. I., Piragouskaya G. V., Khmelevskij S. S., Lemeshevskaya A. S., Garbuzova T. V., Nekrasova I. N., Perekhod D. G. Impact and aftereffect of phosphogips on the yield and quality of agricultural crops	115

3. OUR JUBILEES

Tsytron Galina Stanislavovna	91
Summaries	140
Instructions for authors	145

1. ПОЧВЕННЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 633.34:631.47

ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОСЕВОВ И АНАЛИЗ УРОЖАЙНОСТИ СОИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Т. Н. Азарёнок, О. В. Матыченкова, С. В. Дыдышко, М. В. Воробей

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Беларусь, как страна с развитым животноводством, ежегодно сталкивается с проблемой дефицита растительного белка в рационах животных и птицы. Мировой опыт свидетельствует о том, что наиболее эффективным способом ее решения является использование в рационах животных и птицы продуктов переработки соевых бобов. Включение в рацион таких кормовых продуктов позволяет значительно повысить их продуктивность, сократить затраты кормов на производство единицы продукции животноводства. Этим обусловлен повышенный интерес и постоянное расширение посевов сои во многих странах мира.

Сложившаяся конъюнктура мирового рынка масличных и зернобобовых культур и другие внешние факторы ведут к подорожанию сырья. На это тратятся значительные валютные ресурсы. Анализ статистических данных показывает, что соя является одной из главных культур в структуре импорта сельскохозяйственной продукции республики. С 2013 г. по 2021 г. импорт соевых бобов увеличился в 230,7 раза – с 2,6 тыс. т до 599,9 тыс. т [1–3]. Поэтому для решения проблем продовольственной безопасности республики, недостатка кормового белка, улучшения качества кормовой базы животноводства стратегически важной задачей является создание сырьевой базы производства соевых бобов.

Территориальное размещение посевов сои, как источника сырьевых ресурсов, должно базироваться на принципах экологического и ресурсосберегающего земледелия, включающих тщательный учет агроэкологических и агроклиматических ресурсов, характеризующих условия их произрастания.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являются статистические данные за период с 2015 по 2023 гг. по посевным площадям и урожайности сои Национального статистического комитета Республики Беларусь, агроклиматические показатели. Исследования проводили с применением аналитического, статистического, картографического методов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Соя – светолюбивая и требовательная к теплу культура. Для ее развития необходима сумма температур от 1700 до 2700 °С. Наибольшая потребность в тепле отмечается в фазах цветения и формирования бобов. Оптимальная температура возделывания в этот период должна быть 21–22 °С. При её снижении до 14 °С рост и развитие сои прекращаются. Для прорастания семян сои температура почвы должна достигать 9–10 °С, оптимальная – 15–20 °С, что на юге республики обычно соответствует периоду с 25 апреля по 10 мая. Весенние заморозки в пределах –1...–3 °С соя переносит, слегка задерживаясь в росте. Осенние заморозки повреждают листья, но если они наступают незадолго до полного созревания (после молочной спелости), то последнее заканчивается нормально. Потребность влаги на 1 г сухого вещества (транспирационный коэффициент) составляет 400–1000 [4].

Сорта сои по продолжительности периода вегетации и сумме активных температур делят на 9 групп. В Беларуси наиболее перспективны ультраскороспелые, скороспелые и среднескороспелые сорта. В республике районированы 7 сортов отечественной селекции: Березина, Припять, Снежок, Северная звезда, Ствига, Устя, Ясельда и др. Средняя урожайность их на Кобринском опытном участке была 18–20 ц/га, максимальная – 36 ц/га. В Государственный реестр включены перспективные сорта Аннушка, Верас, Припять, Полесская 201, Раница, Рось. Их потенциальная урожайность – 40 и более ц/га [5]. Белорусские сорта сои, в отличие от многих зарубежных, генетически не модифицированы. Они адаптированы к местной сумме активных температур и долготе дня, хорошо приспособлены к механизированной уборке, устойчивы к неблагоприятным факторам среды, отзывчивы на высокую культуру земледелия. Качество зерна удовлетворяет требованиям, необходимым для переработки на пищевые и фуражные цели.

Соя – растение короткого дня. При коротком фотопериоде повышается способность сои к ветвлению и росту и ускоряется срок цветения, но задерживается налив и созревание бобов. При длинном дне сроки цветения сильно замедляются, но вместе с тем под его влиянием в начале развития или в течение всего вегетационного периода ускоряются пожелтение и опадание листьев, в связи с чем бобы быстрее наливаются и созревают. Вегетационный период сои в зависимости от сорта и условий возделывания сильно колеблется. Отдельные сорта ее созревают за 75–80 дней, но позднеспелые сорта имеют вегетационный период 130–140 дней и более.

До 2022 г. лидирующее место по посевам сои занимала Брестская область, где их площадь занимала от 699 до 1416 га (рис. 1). С 2022 г. наибольшие площади посевов сои были в Гомельской области. В 2023 г. посевные площади здесь возросли на 140 % и составили 2345 га. Меньше всего сои в сельскохозяйственных предприятиях выращивалось в Витебской области (150 га – 2017 г.), а с 2018 г. соя выращивается только в частных посевах. Положительной динамикой характеризуются Гродненская и Могилевская области, где площадь посевных площадей сои возросла с 16 до 676 га и с 210 до 1332 га соответственно. По республике посевные площади сои составляли от 2509 га в 2015 г. до 5145 га в 2023 г., достигнув максимума в 2022 г. – 5759 га, или 0,11 % от общей площади посевов.

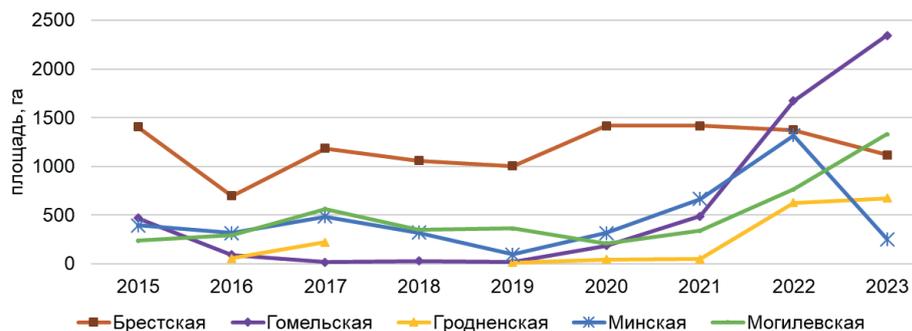


Рис. 1. Динамика посевных площадей сои по областям республики, га (2015–2023 гг.) [6]

На протяжении 2015–2021 гг. соя выращивалась в 23–25 районах республики, с 2022 г. их количество увеличилось до 31, а в 2023 г. уже 36 районов производили сою. В Брестской и Минской областях – от 6 до 9 районов, в Гомельской области их количество увеличилось за 9-летний период с 2 до 12 в 2023 г. В Могилевской области от 3 до 5 районов выращивают сою, а в Гродненской области – от 2 до 4 районов ежегодно и только в 2022 г. – 6 районов.

Как было отмечено выше, соя относится к теплолюбивым культурам и минимальной температурой для прохождения процессов цветения и созревания считается температура порядка 14–15 °С. На основании агрометеорологических показателей за 2015–2022 гг. рассчитаны суммы активных температур выше 15 °С по данным 52 метеостанций и проведена их интерполяция на всю территорию республики (рис. 2).

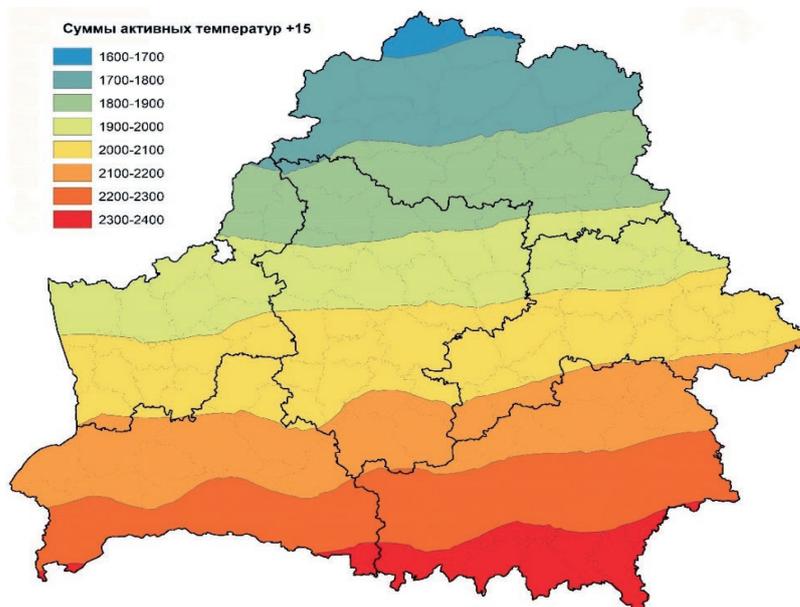


Рис. 2. Сумма активных температур выше 15°C (2015–2022 гг.)

Анализ карты показывает, что по сумме активных температур выше 15 °С сою возможно выращивать во всех районах Брестской, Гомельской и Могилевской областях, в Гродненской области – лишь в 14 районах, а в Минской области – в 19 районах. В районах, входящих в зону с суммой температур 1800–1900 °С (Островецкий, Ошмянский, Сморгонский районы Гродненской области, Логойский, Мядельский, Вилейский районы Минской области, Лепельский, Чашникский, Сенненский, Толочинский, Оршанский, Дубровенский районы (за исключением их южной части) Витебской области) выращивание сои возможно на зеленую массу, а получение устойчиво высоких урожаев зерна затруднительно.

Количество дней вегетационного периода с температурами выше 15 °С составляет от 105 до 116, что достаточно для созревания скороспелых и среднескороспелых сортов.

Анализ данных по урожайности зерна сои показывает, что в среднем за 9-летний период урожайность сои по республике составила 9,6 ц/га. Максимальные урожаи сои были получены в Гродненской области – 17,8 ц/га. (рис. 3). Она же отмечена и наибольшими показателями в 2021 и 2023 гг. – 26,5 и 28,7 ц/га соответственно. В остальных областях урожайность сои колеблется от 9,1 ц/га в Гомельской до 11,6 ц/га в Брестской области.

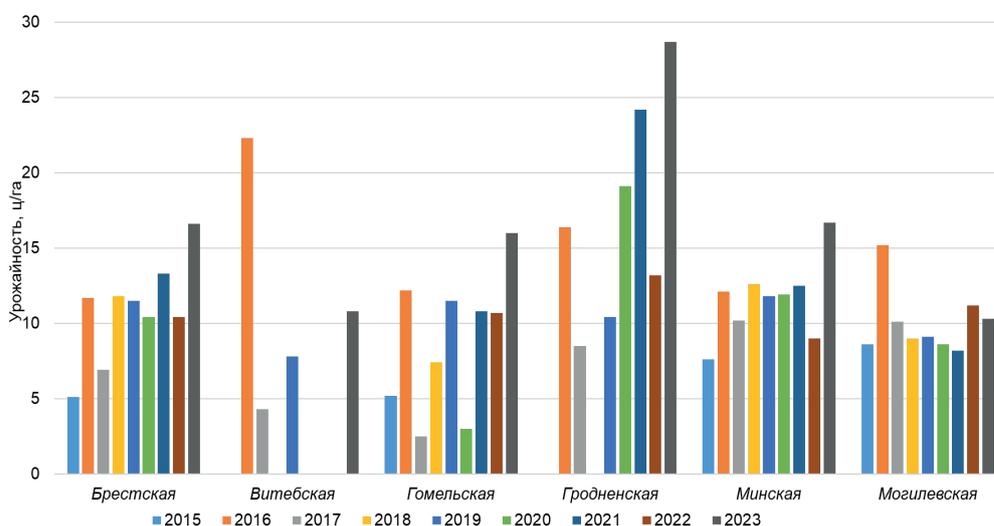


Рис. 3. Урожайность зерна сои по областям республики (2015–2023 гг.) [6]

В 2023 г. урожайность сои по республике составила 16,0 ц/га. В Могилевской и Витебской областях было получено всего 10,3–10,8 ц/га, а в Брестской, Гомельской и Минской – от 16,0 до 16,7 ц/га зерна сои.

Еще большие различия урожайности зерна сои наблюдается по районам республики. Менее 5 ц/га сои в среднем за исследуемый период было получено в Каменецком, Лунинецком, Лельчицком, Житковичском, Октябрьском, Солигорском и Круглянском районах. Абсолютные максимумы урожайности (> 30 ц/га) в отдельные годы были получены в Ветковском (31,9), Мозырском (41,0), Гродненском (36,0), Несвижском (30,3) и Горецком (31,3 ц/га) районах.

Для характеристики производства сои относительно среднего уровня проведена оценка устойчивости получения ее урожаев по каждой из областей. Под устойчивостью понимаются достижение запланированных показателей при любых складывающихся природно-климатических и экономических условиях с наименьшими дополнительными затратами [7]. Устойчивость позволяет дать общую оценку способности противостоять неблагоприятным внешним факторам в складывающейся агроклиматической ситуации (табл.). Приняты следующие градации коэффициента устойчивости: $K_u > 0,9$ – норматив устойчивости, $K_u = 0,9-0,8$ – допустимая устойчивость, $K_u = 0,8-0,6$ – неустойчивое развитие процесса или явления, $K_u = 0,6-0,4$ – крайне неустойчивое, $K_u < 0,4$ – недопустимое.

Таблица

Урожайность бобов сои и коэффициент устойчивости получения урожая за 2015–2023 гг.

Область	Урожайность, ц/га				Коэффициент вариации, %	Коэффициент устойчивости получения урожая
	min	max	среднее значение	стандартное отклонение		
Брестская	6,1	16,6	11,6	3,6	30,8	0,69
Гомельская	2,5	16,0	9,1	5,2	57,0	0,43
Гродненская	6,8	28,7	17,8	8,2	46,1	0,54
Минская	5,9	16,7	10,5	3,3	31,9	0,68
Могилевская	7,5	12,0	9,6	1,9	20,0	0,80

Установлено, что Брестская, Минская и Могилевская области входят в зону неустойчивого получения урожая сои (0,68–0,80), а Гомельская и Гродненская области, несмотря на отдельные высокие показатели, относятся к зоне крайне неустойчивого получения урожая зерна сои (0,43–0,54).

ВЫВОДЫ

Посевные площади сои в республике изменялись от 2509 га в 2015 г. до 5145 га в 2023 г. Максимальные площади сои были в 2022 г. – 5759 га, или 0,11 % от общей площади посевных земель. С 2015 по 2021 гг. лидирующую позицию по посевам сои занимала Брестская область. В 2023 г. – Гомельская область, где посевные площади сои увеличились на 140 % и составили 2345 га.

Анализ суммы активных температур выше 15 °С, показывает, что сою возможно выращивать в Брестской, Гомельской и Могилевской областях на всей территории, в Гродненской – в 14 районах и в Минской области – в 19 районах. Количество дней вегетации в период с температурами выше 15 °С составляет от 105 до 116, что достаточно для созревания скороспелых и среднескороспелых сортов.

Средняя урожайность зерна сои по республике варьирует в пределах от 9,1 до 17,8 ц/га за последние 9 лет. В разрезе областей наиболее перспективной является Гродненская область, где среднемноголетняя урожайность составляет 17,8 ц/га, минимальная продуктивность сои получена в Гомельской области – 9,1 ц/га. Наибольшие урожайности (> 30 ц/га) в отдельные годы были получены в Ветковском (31,9 ц/га), Мозырском (41,0), Гродненском (36,0), Несвижском (30,3) и Горецком (31,3 ц/га) районах.

Оценка устойчивости получения урожая показала, что Брестская, Минская и Могилевская области входят в зону неустойчивого получения урожая сои (0,68–0,80), а Гомельская и Гродненская области относятся к зоне крайне неустойчивого получения урожая зерна сои (0,43–0,54).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левкина, О. В. Оценка экономической эффективности соеводства Беларуси и основные факторы, ее определяющие / О. В. Левкина, В. Г. Тарануха // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2013. – № 4. – С. 27–34.
2. Тарануха, В. Г. Экономическая эффективность возделывания сои в условиях Беларуси / В. Г. Тарануха, О. В. Левкина // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2012. – № 4. – С. 16–20.
3. Левкина, О. В. Современные тенденции развития мирового соевого рынка / О. В. Левкина, В. В. Васильев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 3. – С. 12–18.
4. Земледелие / В. В. Ермоленков [и др.]; под ред. В. В. Ермоленкова, В. Н. Прокоповича. – Минск: ИВЦ Минфина, 2006. – 463 с.
5. Описание сортов растений [Электронный ресурс] // ГУ «Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений»; Режим доступа: <http://sorttest.by/descriptionVarieties.php>. – Дата доступа: 05.03.2024 г.
6. Сельское хозяйство Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь; Режим доступа: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoe-hozyaistvo/selskoe-khozyaistvo/statisticheskie-izdaniya/index_39701/. – Дата доступа: 15.03.2023 г.
7. Суслов, С. А. Методика региональной оценки экономической устойчивости сельскохозяйственного производства / С. А. Суслов, И. В. Громова // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 5. – С. 100–114.

TERRITORIAL FEATURES OF THE PLACEMENT OF CROPS AND ANALYSIS OF SOYBEAN YIELDS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

T. N. Azarenok, O. V. Matychenkova, S. V. Dydysenko, M. V. Vorobey

Summary

The territorial features of the placement of soybean crops (for grain) in the regions of the republic are established based on the analysis of the cultivated areas of the crop. The data on soybean yields from 2015 to 2023 are analyzed. The analysis of the territory of the republic according to the sum of active temperatures above 15 °C. The coefficient of sustainability of harvesting in the regions of the republic is calculated. The research results serve as a basis for planning and developing the structure of soybean acreage, taking into account agro-climatic indicators.

Поступила 16.05.24

ВЛИЯНИЕ ДЕФЛЯЦИИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ МИГРАЦИЮ ^{137}Cs НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ

В. Б. Цырибко, А. М. Устинова, И. А. Логачёв

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нарастающих изменений климата одним из потенциально наиболее опасных видов деградации почв в республике становится дефляция, интенсивность которой определяется особенностями климата, рельефа, почвенного и растительного покрова. Она проявляется в виде повседневного эолового переноса на открытых незащищенных растительностью массивах и в виде пыльных бурь. Повседневный процесс протекает под воздействием ветров скоростью 5–8 м/с, а пыльные бури – при сильных ветрах (скорость превышает 10–15 м/с). Большинство пыльных бурь отмечается в теплый период года: весной – 52,2 % от общего количества, летом – 37,8 % и осенью – 9,4,4 % [1].

Дефляция характерна для южной почвенно-экологической провинции Беларуси из-за широкого распространения песчаных и рыхлосупесчаных, а также осушенных органогенных почв. В последнее время в республике отмечено усиление дефляционных процессов, которое обусловлено увеличением повторяемости засух и засушливых явлений, особенно в весенний период, что приводит к ухудшению водного режима почв, пересыханию верхнего корнеобитаемого слоя легких песчаных и супесчаных почв. По данным метеорологических станций с 1966 г. в Полесье зарегистрировано более 350 случаев проявления экстремальной дефляции – пыльных бурь. [2].

Авария на Чернобыльской АЭС, приведшая к загрязнению 23 % территории Республики Беларусь [3], обусловила горизонтальную миграцию вместе с дефляционным материалом изотопов радиоактивных элементов, став причиной появления новых локальных очагов их повышенной концентрации [1, 4].

В работах различных авторов установлено, что интенсивность горизонтальной миграции зависит от характера использования сельскохозяйственных земель. Под однолетними культурами, характеризующимися невысокой почвозащитной способностью, перенос ^{137}Cs выше, чем под многолетними травами, которые хорошо защищают почву от деградации [5–8].

Целью исследования – изучение влияния дефляции на горизонтальную миграцию ^{137}Cs на органогенных и песчаных почвах сельскохозяйственных земель и определение удельной активности почвы в зонах аккумуляции эолового материала.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований являлись дерново-подзолистые песчаные, торфяные и деградированные торфяные почвы.

С целью определения особенностей горизонтальной миграции ^{137}Cs на минеральных и органогенных почвах в 2022–2023 гг. проведены маршрутные исследования на территории Ветковского, Добрушского, Буда-Кошелевского и Житковичского районов Гомельской области, а также в Лунинецком районе Брестской области.

Исследования проводились путем закладки почвенных катен, расположенных по преимущественному направлению розы ветров (с северо-запада на юго-восток).

Отбор почвенных проб производился агрохимическим буром из пахотного горизонта почв через 50 м от центра поля в направлении зоны аккумуляции.

Удельную активность ^{137}Cs определяли на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315. Основная относительная погрешность измерений при доверительном интервале $P = 95\%$ не превышала 15–30 %. Аппаратурная ошибка измерений – не более 15 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На всех изученных почвенных катенах выделены 3 основные зоны влияния дефляционных процессов: аккумуляции (приурочены к древесно-кустарниковой растительности, урезам воды, дорогам, значительным неровностям рельефа), аккумуляции/переноса (на небольшом расстоянии от перечисленных ранее мест и особенностям микрорельефа), зоны переноса (выровненные центральные части полей) (табл. 1).

В зоне переноса на катене № 1 удельная активность пахотного слоя ^{137}Cs была на 42,1–45,7 % ниже по сравнению с зоной основной аккумуляции дефляционного материала (юго-восточная часть поля). В то же время в зоне аккумуляции загрязнение почвы ^{137}Cs было также неравномерным, что связано как с различной интенсивностью воздействия ветра, так и особенностями микрорельефа.

Изучение перераспределения ^{137}Cs на почвенной катене № 2, находящейся преимущественно в зоне аккумуляции, указывает на значительный контраст внутри – в зоне максимальной аккумуляции загрязнение пахотного слоя ^{137}Cs было на 39,9 % выше, чем в зоне частичной аккумуляции/переноса. Разница в удельной активности между северо-западной и юго-восточной частью зоны аккумуляции составляла 21,0 %.

Особенность почвенной катены № 3 в том, что обе зоны аккумуляции приурочены к антропогенным объектам (ограда частной застройки и дорога). Данная катена расположена в зоне преимущественной аккумуляции, поэтому чистой зоны переноса на ней не выделено. Однако разница между максимальной и минимальной плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs достигает 37,9 %.

На луговых землях различия между зонами аккумуляции и переноса ниже примерно в два раза. Наибольшие различия отмечаются на катене № 6, на которой удельная активность пахотного горизонта почвы в зоне переноса на 22,3 % ниже, чем в зоне аккумуляции.

На катене № 5 влияние дефляции на перераспределение ^{137}Cs также установлено – разница достигает 19,5 %, при этом стоит отметить, что максимальное отличие установлено между зонами аккумуляции и переходной от переноса к аккумуляции.

Наиболее показательной катеной на луговых землях является четвертая, на которой разница между различными точками отбора не превышает 10,5 %, что вероятно обусловлено наибольшей продолжительностью нахождения данного массива в категории луговых земель.

Таблица 1

**Влияние дефляционных процессов на горизонтальную миграцию ¹³⁷Cs
на дерново-подзолистых песчаных почвах**

№ катены	Тип земель	№ точки	Зоны влияния дефляции	Удельная активность ¹³⁷ Cs в почве, Бк/кг	Отклонение от зоны максимальной аккумуляции, %
1	Пахотные	1	перенос	391,23	-45,7
		2	перенос	417,00	-42,1
		3	аккумуляция/перенос	598,47	-16,9
		4	аккумуляция/перенос	584,31	-18,9
		5	аккумуляция	719,38	0,0
		6	аккумуляция	656,96	-8,8
2	Пахотные	1	аккумуляция	623,28	-21,0
		2	аккумуляция/перенос	474,45	-39,9
		3	аккумуляция/перенос	603,47	-23,5
		4	аккумуляция/перенос	507,78	-35,7
		5	аккумуляция	794,00	0,0
3	Пахотные	1	аккумуляция	99,72	-15,8
		2	аккумуляция/перенос	73,57	-37,9
		3	аккумуляция	100,05	-15,5
		4	аккумуляция	115,84	0,0
4	Луговые	1	перенос	388,96	-3,0
		2	аккумуляция/перенос	442,55	10,4
		3	аккумуляция/перенос	437,74	9,2
		4	аккумуляция	400,98	0,0
5	Луговые	1	перенос	307,62	-18,1
		2	перенос	316,70	-15,7
		3	аккумуляция/перенос	302,43	-19,5
		4	аккумуляция	323,46	-13,9
		5	аккумуляция	375,56	0,0
6	Луговые	1	перенос	1104,74	-1,7
		2	перенос	873,06	-22,3
		3	перенос	1111,78	-1,0
		4	аккумуляция/перенос	1146,20	2,0
		5	аккумуляция	1276,10	13,6
		6	аккумуляция	1123,45	0,0

Маршрутные исследования были также проведены на органогенных почвах (табл. 2).

**Влияние дефляционных процессов на горизонтальную миграцию ^{137}Cs
на органогенных почвах**

№ катены	Тип земель	№ точки	Зоны влияния дефляции	Удельная активность ^{137}Cs в почве, Бк/кг	Отклонение от зоны максимальной аккумуляции, %
7	Пахотные	1	аккумуляция	468,30	-4,1
		2	аккумуляция	437,56	-10,2
		3	перенос	109,17	-77,6
		4	аккумуляция	472,08	-2,0
		5	аккумуляция	479,60	0,0
8	Пахотные	1	аккумуляция	547,65	0,0
		2	аккумуляция/перенос	486,95	-12,5
		3	аккумуляция/перенос	457,74	-17,9
		4	аккумуляция	504,96	-9,0
9	Пахотные	1	аккумуляция	136,95	-22,2
		2	аккумуляция	135,76	-22,2
		3	аккумуляция/перенос	129,35	-27,8
		4	перенос	96,34	-44,4
		5	аккумуляция	175,29	0,0
		6	аккумуляция	182,05	0,0
10	Луговые	1	перенос	215,97	6,2
		2	аккумуляция/перенос	265,95	30,7
		3	аккумуляция/перенос	193,38	4,9
		4	аккумуляция	203,38	0,0
11	Луговые	1	перенос	579,21	17,6
		2	аккумуляция/перенос	440,58	-10,5
		3	аккумуляция/перенос	437,72	-11,1
		4	аккумуляция	582,33	18,3
		5	аккумуляция	492,41	0,0
12	Луговые	1	аккумуляция/перенос	925,22	3,0
		2	аккумуляция/перенос	998,44	11,2
		3	аккумуляция	897,89	0,0

Катена № 7 заложена в Добрушском районе на поле со сложным мозаичным почвенным покровом: представлены торфяно-минеральные, остаточно-торфяные и постторфяные разновидности дегроторфяных почв. В связи с этим, на данной катене отмечается максимальное различие в удельной активности пахотного горизонта почв между зоной переноса и зоной аккумуляции, которое достигает 77,6 %.

Катена № 8 находится в непосредственной близости от катены № 7. Её почвенный покров представлен торфяными почвами, а также абсолютная высота ниже,

что обуславливает более длительный период переувлажнения и, следовательно, существенно уменьшает интенсивность протекания дефляционных процессов. Максимальная разница между значениями удельной активности не превышает 18,0 %.

Катена № 9 расположена на торфяных и торфяно-минеральных почвах, что обуславливает более высокую интенсивность протекания дефляционных процессов: разница в удельной активности почвенных образцов в зоне максимальной аккумуляции и зоне переноса достигает 44,4 %.

Катена № 10 расположена на луговых землях с достаточно сложным почвенным покровом (представлены различные разновидности торфяных и дегроторфяных почв). Особенностью данной катены является наибольшее различие в удельной активности отобранных почвенных образцов (30,7 %). Что, вероятнее всего, объясняется изначально неравномерным выпадением радионуклидов ¹³⁷Cs, поскольку наименьшая активность отмечена в зоне потенциальной максимальной аккумуляции.

На катене № 11, представленной преимущественно торфяными почвами, отмечены разнонаправленные колебания удельной активности верхнего горизонта почвы в независимости от зоны влияния дефляции, что указывает на ключевую роль первоначального распределения выпадения радионуклидов.

Наименьшие отличия установлены на катене № 12 (не более 11,2 %), представленной торфяными почвами различной мощности. Минимальные различия обусловлены как использованием в качестве луговых земель, так и генезисом почв.

Для установления степени влияния дефляции на горизонтальную миграцию ¹³⁷Cs проведено сравнение фактической удельной активности пахотного горизонта катены № 2 в 2015 и 2022 гг., а также прогнозного значения, рассчитанного с помощью программного продукта Radprocalculator [10]. Полученные результаты представлены на рисунке.

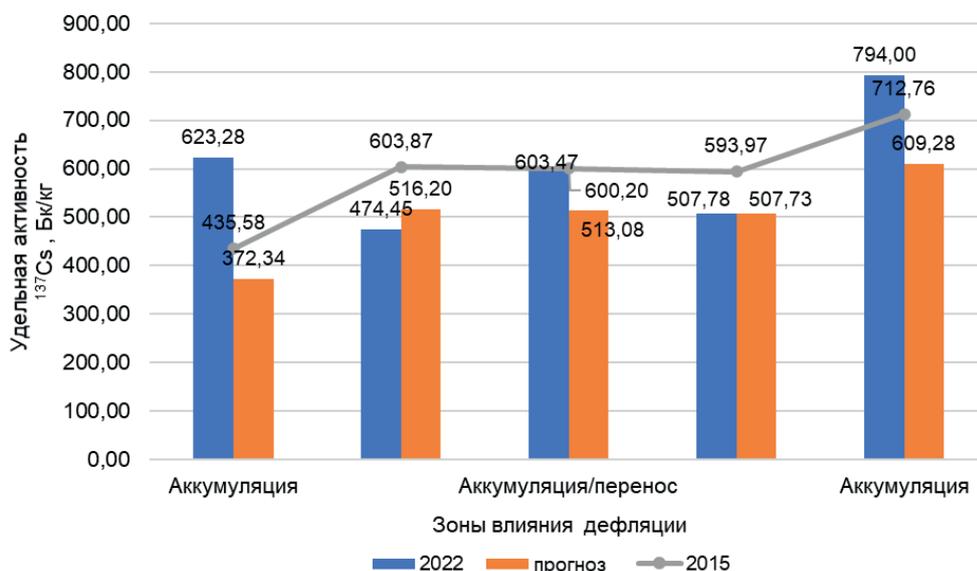


Рис. Сравнение фактической и прогнозной удельной активности ¹³⁷Cs в пахотном горизонте почвы катены № 2, Бк/кг

Сравнение фактических и прогнозных значений показало, что только в одной точке отбора в зоне переходного влияния дефляции (аккумуляции/переноса) фактическое значение сопоставимо с прогнозным. В зонах аккумуляции фактические значения не только выше прогнозных на 184,72–250,94 Бк/кг (35,8–67,4 %), но даже превышают уровень 2015 г., что подтверждает определяющую роль дефляционных процессов в горизонтальной миграции ^{137}Cs и формировании локальных пятен повышенной концентрации радионуклида.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований показали, что на легких по гранулометрическому составу и органогенных почвах пахотных земель происходит активная миграция ^{137}Cs с дефляционными процессами. В то же время интенсивность дефляции на луговых землях ниже и изменение удельной активности почвы обуславливается преимущественно первоначальным выпадением радионуклида. На пахотных землях вдоль естественных и антропогенных преград формируются зоны аккумуляции эолового материала с повышенным содержанием в нем ^{137}Cs . На песчаных почвах разница в удельной активности пахотного горизонта между зоной переноса и аккумуляции достигает на пахотных землях 45,7 %, а на луговых – 22,3 %.

Степень подверженности дефляции находится в тесной взаимосвязи с уровнем деградации органогенных почв. На торфяных и торфяно-минеральных почвах разница в удельной активности ^{137}Cs между зоной переноса и аккумуляции на пахотных землях составляет до 37,5 %, на луговых – 18,3 %, а на остаточно-торфяных и постторфяных почвах – достигает величин более 75,0 % и 30,7 % соответственно на пахотных и луговых землях.

Характер землепользования играет определяющую роль в интенсивности горизонтальной миграции ^{137}Cs с дефляционными процессами. Изменения удельной активности на луговых землях более, чем в два раза ниже, чем на пахотных. На пахотных землях зоны максимальной аккумуляции радионуклидов соответствуют юго-восточным участкам полей, что обусловлено преобладающими направлениями ветра. На органогенных почвах ключевую роль играет водный режим, при избыточном увлажнении интенсивность дефляции минимальна, как и миграция радионуклида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уплыў дэфляцыйных працэсаў на перапамеркаванні ^{137}Cs на ворных землях / В. Б. Цырыбка [і інш.] // Почвоведение и агрохимия. – 2023. – № 2(71). – С. 34–43.
2. Атлас почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / В. В. Лапа [и др]; под общ. ред В. В. Лапа., А. Ф.Черныша; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – 170 с.
3. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси; под. ред. Ю. А. Израэля, И. М. Богдевича. – М.: Фонд «Инфосфера – НИА – Природа»; Минск: Белкартография, 2009. – 140 с.
4. Цырибко, В. Б. Перераспределение ^{137}Cs дефляционными процессами / В. Б. Цырибко, А. М. Устинова, Н. Н. Цыбулько // Природнае асяроддзе

Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця: зб. навук. прац VIII Міжнароднай канферэнцыі «Прыроднае асяроддзе Палесся і навукова-практычныя аспекты рэсурсакарыстання», Брэст, 12–14 верасня 2018 г. / Палескі аграрна-экалагічны інстытут НАН Беларусі; рэдкал. М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Брэст: Альтэрнатыва, 2018. – Вып. 11. – 300 с. – С. 103-105.

5. Dolgilevich, M. I. Wind erosion as a factor of radionuclide contamination of North Ukrainian landscapes / M. I. Dolgilevich // E.S.S.C. Newsletter 2. – 1996. – P. 16–18.

6. Агроэкалагічная ацэнка і групуіроўка дефляцыйна-небяспечных земляў агроландшафтоў Беларускага Полесся: зборнік навуковых прац / А. Ф. Чэрныш, Н. Н. Цыбулько, Л. А. Тишук // Почвоведение и агрохимия. – 1998. – Вып. 30. – С. 23–32.

7. Цыбулько, Н. Н. Дефляция почв и горизонтальный перенос ^{137}Cs / Н. Н. Цыбулько // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – Т. 46. – № 1. – С. 96–102.

8. Чэрныш, А. Ф. Миграция и аккумуляция радионуклидов в эродированных агроландшафтах Беларускага Полесся / А. Ф. Чэрныш, В. С. Аношко // Вестник БГУ. Сер. Химия. Биология. География. – 2006. – № 1. – С. 98–102.

9. Анисимов, В. С. Вертикальная миграция ^{137}Cs чернобыльских выпадений в различных ландшафтах / В. С. Анисимов, В. К. Кузнецов, А. И. Санжаров // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2021. – Т. 61. – № 3. – С. 286–300.

10. Прогнозирование изменения удельной активности радиоактивных элементов [Электронный ресурс] // Интернет-портал о прогнозировании радиоактивности. – Режим доступа: <http://www.radprocalculator.com/Decay.aspx>. – Дата доступа: 22.03.2024.

INFLUENCE OF DEFLATION ON THE HORIZONTAL MIGRATION OF ^{137}Cs ON AGRICULTURAL LANDS

V. B. Tsyrybka, H. M. Ustsinava, I. A. Lahachou

Summary

The data on changes in the specific activity of ^{137}Cs in the upper soil horizon as a result of deflationary processes are presented in the article. It has been established that the nature of land use plays a key role in the intensity of horizontal migration of ^{137}Cs during deflationary processes. Changes in specific activity on meadow lands are more than two times lower than on arable lands.

On arable lands along natural and anthropogenic barriers, zones of accumulation of deflationary (induced) material with an increased radionuclide content are formed. On sandy soils, the difference in the specific activity of the arable horizon between the transfer and accumulation zones reaches 45,7 % on arable lands, and 22,3 % on meadow lands.

The degree of susceptibility to deflationary processes is closely related to the level of degradation of peat soils. On peat and peat-mineral soils, the difference in the specific activity of ^{137}Cs between the zone of transfer and accumulation on arable lands is up to 37,5 %, on meadow soils – 18,3 %, and on residual peat and post-peat soils – reaches 77,6 % and 30,7 %, respectively, on arable and meadow lands.

Поступила 22.04.24

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Л. А. Веремейчик

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях хозяйственная деятельность человека оказывает все большее влияние на целостность агроресурсных систем, увеличивается негативное антропогенное воздействие на земельные ресурсы, в связи с чем важным этапом деятельности становится снижение процесса роста отрицательных экологических изменений в сельскохозяйственном производстве, в первую очередь, путем сопоставления показателей социально-экономического прогноза, обеспечивающего взаимосвязи между экономикой и экологией в сельском хозяйстве.

Одним из направлений совершенствования экологической политики является экологическая модернизация, основанная на концепции модернизма, изменения, обновления, развития. Основная идея экологической модернизации заключается в том, чтобы снизить негативное влияние человечества на окружающую среду. Экологическая модернизация включает комплекс технологических, экономических, правовых и социальных механизмов, управленческих и хозяйственных решений, способных оптимизировать экологические параметры окружающей природной среды, способных обеспечить благоприятные условия и качество жизни населения. Концептуально экологическая модернизация применима к любым улучшениям в окружающей среде, инновациям в экологической политике, в основном она базируется на разработке экологически безопасных технологий. Экологическая модернизация рассматривается как форма деятельности, основанная на использовании практических мер, способствующих улучшению состояния окружающей среды и направлена на оптимизацию взаимоотношений в системе «общество и здоровая природа» [1, 2].

Ключевыми элементами экологической модернизации являются: экологическая политика, основанная на отсутствии конфликта между экономическим развитием и решением экологических проблем; разработка технических инновационных подходов, которые должны учитывать цели экологической политики. Иными словами, целью и принципами инновационной модернизации являются устранение прямой зависимости экологической деградации от экономического роста, сочетание высокого уровня экономического развития и незначительного уровня воздействия на окружающую среду.

Сохранение благоприятной окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов является высшим приоритетом государственной экологической политики Республики Беларусь, основанной на улучшении условий проживания населения и обеспечении экологической безопасности. При этом особое внимание уделяется гармонизации отношений общества и природы за счет развития

хозяйственной деятельности в пределах воспроизводственных возможностей природной среды. Первостепенное значение имеет поощрение наиболее эффективных мер по снижению вредного воздействия на окружающую среду и установление экономических барьеров для неэффективных с экологической точки зрения видов деятельности [3].

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Модернизация сельского хозяйства и устойчивое развитие в условиях ресурсных ограничений и необходимости охраны окружающей среды предусматривает выработку теоретических подходов и практических решений, направленных на модернизацию хозяйственного механизма, способствующего оптимизации экологических параметров земельных ресурсов. При анализе, обобщении и формировании экологических параметров, направленных на оптимизацию земельных ресурсов, в основу должны быть положены методологические принципы, которые являются составной частью общей экологической политики государственного регулирования. Объектом исследования явились земельные ресурсы Республики Беларусь, их современное агроэкологическое состояние. Предметом исследований является анализ экологической политики, основанной на результатах экологической модернизации земельных ресурсов в рамках реализации стратегии, предусматривающей следующие пункты: сохранение и повышение плодородия почв сельскохозяйственных земель за счет оптимизации структуры посевов сельскохозяйственных культур, сбалансированного применения органических и минеральных удобрений; сохранение потенциала почвенно-земельных ресурсов за счет снижения и предотвращения деградации почв; достижение нейтрального баланса деградации земель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Следует учитывать, что экологические изменения в окружающей среде Беларуси происходят под влиянием не только внутренних, но и внешних факторов, которые определяются как природными особенностями и степенью хозяйственного освоения территории, так и спецификой функционирования национальной экономики. Кроме того, учитывается наличие объектов ранее накопленного экологического вреда, численность и пространственное распределение населения, а также немаловажное значение имеют процессы вещественно-энергетического и миграционного обмена с другими странами, с мировыми проблемами изменения климата и др. [3].

Стратегические цели экологической политики Республики Беларусь в области эффективного функционирования аграрного сектора экономики включают мероприятия рационального использования земельных ресурсов, которые являются основой сельскохозяйственного производства. Основными целями государственной аграрной экологической политики на период до 2035 г. остаются: экологическая реабилитация деградированных земель, загрязненных радионуклидами; защита почв от водной и ветровой эрозии; сохранение мелиорированных земель, особенно осушенных торфяников; облесение малопродуктивных сельскохозяйственных земель; рекультивация нарушенных земель; рациональное использование продуктивных угодий; обеспечение оптимальных агрохимических свойств почв; снижение физической деградации и химического загрязнения почв; снижение чрезмерных рекреационных, технических и других антропогенных нагрузок на земли [3].

Следует отметить, что в рамках экологической модернизации добиться необходимых результатов в сельскохозяйственном производстве Республики Беларусь невозможно без увеличения совокупных расходов на охрану окружающей среды и увеличения инвестиций в основной капитал. За последние годы в данном направлении получены положительные результаты. Так, совокупные расходы на охрану окружающей среды в 2018 г. составляли 820,4 млн руб., в 2022 г. они возросли до 1 183,5 млн руб. Инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды с 2018 г. по 2022 г. также увеличились с 112,6 до 230,0 млн руб., практически в два раза. Объем совокупных расходов на охрану окружающей среды по видам природоохранной деятельности свидетельствует, что на охрану и экологическую реабилитацию земель, поверхностных и подземных вод за 2022 г. составил 12,7 млн руб. [4].

Основным фактором, обеспечивающим максимальный экономический эффект в аграрном секторе, за счет получения наибольшего количества продукции при наименьших затратах, является оптимизация структуры посевных площадей как одного из главных элементов современной системы земледелия, а также создание технологических условий для расширенного воспроизводства плодородия почвы. Для этого в аграрном производстве Республики Беларусь уделяется большое внимание созданию необходимых экономических, правовых и организационных условий. Так, инвестиции в основной капитал в сельское хозяйство в процентах к общему объему инвестиций в основной капитал возросли с 9,8 % (2018 г.) до 14,5 % (2022 г.), при этом производительность труда в сельском хозяйстве также увеличилась в 2022 г. до 105,7 %. В результате площадь нарушенных земель, утративших свои природно-исторические признаки, состояние и характер использования в результате вредного антропогенного воздействия и находящихся в состоянии, исключающем их эффективное использование по исходному целевому назначению в Республике Беларусь уменьшилась с 26,4 тыс. га в 2015 г. до 25,3 тыс. га в 2021 г. [5].

Для достижения устойчивого развития сельского хозяйства по пути модернизации требуется усилить контроль за использованием земель, сохранить сложившиеся тенденции к увеличению общей площади естественных экосистем, в особенности лесных, что даст возможность повысить их стабилизирующее экологическое влияние на окружающую среду. Проводимые в республике мероприятия по оптимизации структуры земельного фонда путем репрофилирования низкопродуктивных и экологически неустойчивых земель свидетельствуют, что площадь таких земель изменяется, например, сельскохозяйственные земли в 2015 г. занимали 41,6 %, на 1 января в 2023 г. их площадь снизилась до 39 %, а площадь лесных земель увеличилась с 41,7 (2015 г.) до 43 % (2023 г.). В республике решаются проблемы, связанные с ограниченностью площади обрабатываемых земель, увеличивается доля площади особо охраняемых природных территорий, так с 2015 г. по 2023 г. она возросла с 8,2 до 9,1 % в общей площади территории [4].

Необходимым условием реализации новой стратегии является пересмотр сложившейся в стране системы землеустройства, в основу которой положено экономически оправданное агроэкологическое районирование сельскохозяйственных угодий, базирующееся на выделении экологически однотипных территорий, при этом главными критериями должны быть величина и качество урожая сельскохозяйственных культур, производительность труда и охрана окружающей среды. Для рационального землепользования и охраны почв внедряются

адаптивно-ландшафтные системы земледелия, базирующиеся на экологизации и биологизации продукционного процесса в агроэкосистемах и агроландшафтах. При этом рост продуктивности сельского хозяйства, улучшение его природоохранности достигается за счет дифференцированного использования особенностей почвенно-климатических и погодных условий, а также адаптивного потенциала культивируемых видов растений. Таким образом, адаптивные технологии сельскохозяйственного производства по своей сути направлены на ресурсосбережение, устойчивость и природоохранность. Основным их отличием от техногенных является взаимное сочетание природных и экономических факторов в производстве сельскохозяйственной продукции.

Оптимизация структуры посевных площадей основана на улучшении организации и ведения системы почвенно-экологических севооборотов, как основных принципов ландшафтного землепользования с учетом особенностей каждого поля. При этом специализация хозяйства будет способствовать более рациональному использованию пахотных земель, существенному повышению культуры земледелия, а также значительному увеличению объемов производства растениеводческой продукции. Установлено, что за счет оптимизации размещения зерновых колосовых по благоприятным предшественникам, улучшения фитосанитарных условий в севооборотах, снижения засоренности посевов и поражения растений болезнями увеличится урожайность до 85–90 ц/га к. ед. и валовые сборы зерна. В сравнении с традиционными и ранее разработанными технологиями продуктивность 1 га пахотных угодий повысится на 4–5 ц/га к. ед., снизятся затраты азотных удобрений на 20–30 % и затраты условного топлива и труда – на 10–20 % [6].

Благодаря росту основных средств в сельскохозяйственных организациях с 31043,8 млн руб. в 2018 г. до 55188,7 млн руб. в 2022 г. по первоначальной стоимости отмечается увеличение коэффициента обновления основных средств в сельскохозяйственных организациях с 7,1 (2018 г.) до 8,2 (2022 г.), что способствует широкому применению современной многофункциональной сельскохозяйственной техники и оборудования, GPS, дистанционных исследований, сельскохозяйственной биотехнологии и других технологий [5].

Внедряются передовые ресурсосберегающие сельскохозяйственные технологии, так, по данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия, в Беларуси используются элементы системы точного земледелия (системы параллельного вождения, GPS-навигации, системы учета расхода топлива). В 2021 г. разработана концепция цифровой платформы «Точное земледелие», целью создания которой является информационное сопровождение, планирование и ведение хозяйственной деятельности на основе оперативного управления технологическими процессами в растениеводстве [7].

Экологическая модернизация также включает одну из важнейших технологических особенностей – внедрение органического земледелия, заключающегося в отказе от применения синтетических минеральных удобрений и средств химической защиты растений, более широкое использование органических удобрений, соблюдение оптимальных севооборотов, с включением бобовых культур в структуру посевных площадей, применение биологических методов защиты растений от вредителей, болезней и сорняков, ресурсосберегающих способов обработки почвы и других приемов, позволяющих эффективно использовать возможности естественных природных ресурсов. При органической системе применяются только

природные вещества и материалы, для которых в окружающей среде существуют естественные системы их нейтрализации и разложения, в качестве удобрений рекомендуется использовать навоз, зеленое удобрение, торф, компосты, сапропель, природные минеральные соли (сильвинит, апатит, фосфорит, глубинные рассолы). В настоящее время производством органической продукции в Республике Беларусь занимается порядка 27 субъектов хозяйствования, около 1600 га сельскохозяйственных земель сертифицировано для производства органической продукции. Планируется в Беларуси к 2030 г. увеличить долю земель до 4 %, применяющих технологии органического земледелия [8].

Разработка эколого-гигиенических технологий возделывания, уборки, транспортировки, хранения, переработки и реализации продуктов питания предусматривает развитие новых отраслей сельского хозяйства, обеспечивающих активное применение новых эффективных удобрений и пестицидов с низкой токсичностью. Проводятся исследования по применению эколого-экономических методов управления химизацией земледелия с целью повышения эффективности использования удобрений и пестицидов с учетом экологических последствий. Исследования включают совершенствование нормирования загрязнения почв посредством разработки дифференцированных нормативов содержания в них химических веществ с учетом буферности почв и функционального их использования, создание системы учета химически загрязненных территорий, очистка наиболее загрязненных земель для предотвращения миграции загрязняющих веществ в подземные и поверхностные воды, их накопления в сельскохозяйственной продукции.

Большое внимание в республике уделяется повышению эффективности применения минеральных и органических удобрений. Внесение минеральных удобрений в расчете на один гектар пахотных земель колеблется по годам от 168 кг в 2018 г. до 209 кг в 2022 г. Внесение органических удобрений в сельскохозяйственных организациях в расчете на один гектар пахотных земель также несколько увеличилось за последние годы, в 2018 г. – 9,2 т, в 2022 г. – 10,2 т. Применение пестицидов в расчете на один гектар пахотных земель Республики Беларусь изменялось по годам, 2015 г. – 1,82 кг, 2020 г. – 2,39 кг, при этом особое значение приобретают исследования по определению загрязнения почвы остатками пестицидов [5].

Рост агроэкологических ограничений связан с необходимостью изменения стратегии мелиорации земель – ограничение нового мелиоративного строительства при приоритете реконструкции и модернизации устаревших систем с осуществлением мероприятий по сохранению торфяных почв и предотвращению их минерализации, что и подтверждается имеющимися данными. Общая площадь мелиорированных земель в 2019 г. составляла 3 448,5 тыс. га, в 2023 г. уменьшилась до 3 263,6 тыс. га. Удельный вес мелиорированных земель в общей площади земель снизился в 2023 г. до 15,7 %, что на 0,9 % меньше по сравнению с 2019 г., в том числе на долю осушенных земель в 2023 г. отводилось 15,6 % [5].

ВЫВОДЫ

Таким образом, все мероприятия общей государственной экологической политики в области охраны земельных ресурсов и воспроизводства почвенного плодородия можно обозначить как их экологическая модернизация. Экологическая модернизация – процесс неуклонного и последовательного внедрения технологических,

экономических, управленческих и других решений, позволяющих повышать эффективность использования ресурсов сельскохозяйственного производства наряду с улучшением или сохранением качества земельных ресурсов.

При формировании экологических параметров, направленных на оптимизацию земельных ресурсов, в основу должны быть положены основные методологические подходы, обеспечивающие максимальный экономический эффект в аграрном секторе, за счет получения наибольшего количества продукции при наименьших затратах.

Основными факторами являются сохранение сложившейся тенденции к увеличению общей площади естественных экосистем, увеличения доли площади особо охраняемых природных территорий. Немаловажным при этом является пересмотр сложившейся в республике системы землеустройства, в основу которой положено экономически оправданное агроэкологическое районирование сельскохозяйственных угодий, внедрение адаптивно-ландшафтных систем земледелия и введения системы почвенно-экологических севооборотов.

Рекомендуется более широкое использование современной многофункциональной сельскохозяйственной техники и оборудования, GPS, дистанционных исследований, сельскохозяйственной биотехнологии и других технологий, позволяющих применять элементы системы точного земледелия, а также внедрять органическое земледелие. Необходимо изменить подходы к стратегии мелиорации земель, которые должны быть направлены на ограничение нового мелиоративного строительства и отдавать приоритет реконструкции и модернизации устаревших систем с осуществлением мероприятий по сохранению торфяных почв и предотвращению их минерализации.

Рост агроэкологических ограничений связан с необходимостью разработки эколого-гигиенических технологий, предусматривающих развитие современных отраслей сельского хозяйства, обеспечивающих активное применение новых эффективных удобрений и пестицидов с низкой токсичностью, изучение путей миграции и динамики кумуляции вредных веществ в агроэкосистемах, в том числе в почве. Наряду с этим необходимо выполнить исследования по оценке возможности естественного самоочищения (дезинтоксикации) сельскохозяйственных ландшафтов.

Перспективным направлением по изучению здоровья почв является метагеномика, которая дает возможность более полного исследования почвенного микробиома, в перспективе включающее изучение свойств не только культивируемых, но и некультивируемых микроорганизмов, определение состава и функций почвенных микробных ассоциаций, выяснение объема и функциональной нагрузки почвенного микробного сообщества и его генетического потенциала.

В дальнейшем экологический прогноз использования потенциала земельных ресурсов сопоставляется и координируется с показателями социально-экономического прогноза, обеспечивающего взаимосвязь между экономикой и экологией в сельском хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гатилова, А. В. Экологическая модернизация: аспекты реализации / А. В. Гатилова // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) // Экономические науки. – 2016. – № 4(25). – С. 29–30.

2. Кулясов, И. П. Экологическая модернизация: теория и практики / И. П. Кулясов; под науч. ред. Ю. Н. Пахомова. – СПб: НИИХ СПбГУ. – 2004. – 154 с.
3. Стратегия в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года [Электронный ресурс] / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://mosty.gov.by/uploads/files/Official-docs/Strategija-v-oblasti-oxrany-okruzhajuschej-sredy-Respubliki-Belarus-na-period-do-2035-goda.pdf>. – Дата доступа: 06.12.2023.
4. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь: статистический буклет [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2023. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/8a8/t0s4z8s3dzp1g3j51v8t0bpcq5qm3aес.pdf>. – Дата доступа: 06.12.2023.
5. Сельское хозяйство Республики Беларусь: статистический буклет [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2023. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/e44/omhrgtzoda196g3yг9b2r81r71vexa2k.pdf>. – Дата доступа: 07.12.2023.
6. Системы контурных почвенно-экологических севооборотов и структуры посевных площадей для специализированных животноводческих хозяйств: методические рекомендации / Национальная академия наук Беларуси, РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию». – Жодино. – 2018. – 32 с.
7. Цифровизация и точное земледелие: Беларусь внедряет новые технологии в сельское хозяйство [Электронный ресурс] – Минск, 2022. – Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/tsifrovizatsija-i-tochnoe-zemledelie-belarus-vnedrjaet-povuye-tehnologii-v-selskoe-hozjajstvo-486929-2022> ЭКОНОМИКА. – Дата доступа: 11.12.2023.
8. К 2030 году доля органических земель в Беларуси достигнет четырех процентов // Беларусь сегодня, 20 мая 2021 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/eko-nevidal4.html>. – Дата доступа: 12.12.2023.

ECOLOGICAL MODERNIZATION OF LAND RESOURCES AS A FACTOR INCREASING THE EFFICIENCY OF AGRICULTURAL PRODUCTION

L. A. Veremeychik

Summary

The article presents the key elements of ecological modernization of land resources of the Republic of Belarus based on the state environmental policy, the purpose and principles of which are the combination of a high level of economic development of agricultural production and a low level of environmental impact.

The research results in the analysis of ecological modernization of land resources within the framework of the strategy implementation, which provides for the preservation and improvement of soil fertility of agricultural land by optimizing the structure of agricultural crops, introducing adaptive-landscape farming systems and introducing a system of soil ecological crop rotations, balanced use of organic and mineral fertilizers, active use of new effective fertilizers and pesticides with low toxicity.

Поступила 18.03.24

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВНУТРИПОЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВЕННОЙ КИСЛОТНОСТИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ИЗВЕСТКОВАНИЮ

М. В. Воробей, А. Л. Киндеев

*Белорусский государственный университет,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Повышение плодородия почвы является важной задачей для современного сельского хозяйства, особенно в условиях увеличения населения и ограниченных земельных ресурсов. Эффективное управление плодородием почвы необходимо для обеспечения высокой урожайности и устойчивости сельского хозяйства, что напрямую влияет на продовольственную безопасность и адаптацию к изменению климата. В Беларуси за период с 2010 по 2020 гг. урожайность зерновых и зернобобовых культур увеличилась с 27,7 до 35 ц/га [1], что свидетельствует о значительных улучшениях в агротехнологиях и управлении почвенными ресурсами.

Одним из важнейших показателей плодородия является кислотность почвы, которая оказывает существенное влияние на здоровье почвенной среды, рост и развитие растений, а также эффективность использования удобрений, поскольку от показателя кислотности зависит усвояемость микро-и макроэлементов [2].

В большинстве развитых странах мира учет неоднородности свойств почвенного покрова применяется при дифференцированном внесении удобрений и является основой точного земледелия. В таких странах как США, Канада, Германия, Австралия, точное земледелие активно внедряется и исследуется в ведущих аграрных университетах и институтах. При этом применение дифференцированного внесения удобрений позволило сократить их использование в среднем на 15–20 %, а урожайность увеличить на 5–10 %.

В свою очередь, в республике при агрохимическом обследовании сельскохозяйственных земель, с одного элементарного участка отбираются 20–35 уколов общим весом 0,6 кг, из которых отбирается смешанный образец [3]. Данная методика была востребована при проведении сельскохозяйственных работ на территории Республики Беларусь во второй половине XX века, когда проводились крупномасштабные почвенные и агрохимические обследования по всей стране. В ходе данных мероприятий было установлена необходимость повсеместного известкования 83,0 % пахотных земель. За последующие 40 лет в почвы Беларуси внесено примерно 150 млн т CaCO_3 , что составляет в среднем 15–20 т/га и к концу 2010 г. только 5,2 % пашни имели рН менее 5,0 [4]. После чего государственное финансирование работ по химической мелиорации прекратилось и за последние 10–15 лет задел, который был создан, постепенно уменьшается, и в настоящее время возникает необходимость проведения подобных работ, но уже с использованием современных технологий, основанных на методах точного земледелия, данных дистанционного зондирования и геоинформационных систем.

Одним из современных направлений пространственного анализа кислотности и других агрохимических свойств почв в локальном масштабе при применении технологий точного земледелия является геостатистика. Она представляет собой научно-методический аппарат анализа данных, базирующийся на теории вероятности и позволяющий выразить случайное явление в пространстве и/или времени через математико-статистические величины, а также классифицировать закономерности их распределения.

Интерполяционные поверхности, полученные при применении методов геостатистики представляют собой наименьшую несмещенную погрешность [5], т. е. прогноз имеет минимальные ошибки. В связи с этим точное (точечное) позиционирование сельскохозяйственной техники и внесение средств химизации позволяет оптимизировать расходы на проведения химической мелиорации, в том числе и известкования. При этом работ в данной области в Республике Беларусь проводится недостаточно для того, чтобы говорить о повсеместном переходе на такие системы земледелия. Исходя из чего, целью данного исследования является анализ целесообразности применения геостатистического подхода при учете внутрипольной неоднородности кислотности почвы при проведении известкования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются почвы рабочего участка, находящегося вблизи деревни Радюки, ОАО «Кошелево-Агро» Новогрудского района Гродненской области. Предметом исследования является внутрипольная неоднородность кислотности почв. На рабочем участке преобладают почвы дерново-подзолистые рыхлосупесчаные, развивающиеся на моренных суглинках, со средним содержанием гумуса – 2,5 %. Участок расположен на склоне с перепадом высот 40 м, общая площадь составляет 119,7 га.

Для картографирования кислотности почвы с использованием геостатистических методов необходимо: произвести отбор проб и лабораторный анализ; проанализировать пространственное распределение полученных данных и произвести подбор вариограммы для оценки пространственной зависимости между значениями кислотности почвы; провести кросс-валидацию полученных результатов и составить картографических материал на основе получившихся моделей вариограмм и их ошибок.

Отбор проб проводился в середине сентября, после сбора урожая тритикале. Пробы отбирались на глубине 0–20 см, по предварительно созданной сетке точек, с шагом 70 м (рис.1). Всего было отобрано 229 образцов с плотностью пробоотбора около 2-х образцов на 1 га. Для данного исследования определение pH солевой вытяжки проводилось по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483) при помощи pH-метра-милливольтметра pH-150M. Экспериментальные данные были занесены в таблицы Excel, где была определена нормальность распределения. Все операции по построению вариограмм и интерполяции проводились в программном продукте компании ESRI, ArcMap в модуле Geostatistical Analyst.

Для изучения целесообразности учета внутрипольной неоднородности кислотности почв, использовались «Картограмма кислотности, содержания фосфора, калия и гумуса в почвах» и «Почвенная карта 10 000 масштаба», они были получены по запросу в ОАО «Кошелево-Агро».

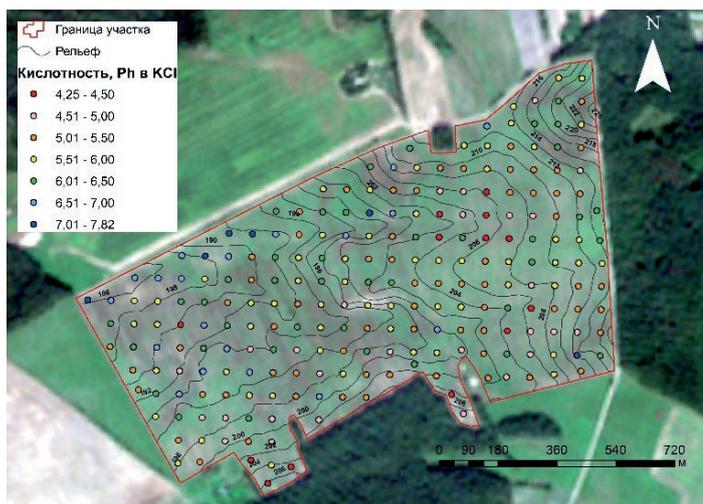


Рис. 1. Сетка точек отобранных образцов

На основе полученных данных и интерполяции были высчитаны затраты на проведение известкования, эффективность внесения мелиоранта по классическому агрохимическому обследованию сельскохозяйственных земель (табл. 1).

Таблица 1

Дозы известковых мелиорантов (т/га CaCO₃) для известкования кислых почв пахотных земель (фрагмент) [6]

Группы почв	Содержание гумуса, %	рН солевой вытяжки					
		≤ 4,25	4,26–4,50	4,51–4,75	4,76–5,00	5,01–5,25	5,26–5,50
Песчаные	≤ 1,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5
	1,51–3,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
	> 3,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5
Рыхлосупесчаные	≤ 1,5	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
	1,51–3,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5
	> 3,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0
Связносупесчаные	≤ 2,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0
	> 2	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	4,5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По средствам математических методов, рассмотрев гистограмму распределения данных (рис. 2), мы наблюдаем приближенный к нормальному распределению ряд данных. Но в связи с тем, что асимметрия выходит за пределы своей ошибки, наблюдается правосторонняя асимметрия [7]. Эксцесс приближен к 0 и не выходит за пределы своей ошибки, показатели медианы и моды имеют почти одинаковое значение 5,58 и 5,6 соответственно (табл. 2). Если бы отклонение от нормального распределения оказалось существенным пришлось бы прибегнуть к преобразованию данных [8].

Среднее значение кислотности полученных образцов 5,64, данный показатель незначительно ниже средней кислотности пахотных земель Беларуси [9]. Для выборки характерен большой разброс значений от 4,25 до 7,82, благоприятными же значениями для выращивания тритикале являются значения 5,5–6,5. При анализе тренда было выявлено линейное удаление (рис. 2). Линия наилучшего соответствия (полином) проведена через проецируемые точки, показывая тренды в определенных направлениях. Если бы линии были параллельны осям X (зеленая линия) или Y (синяя линия), это означало бы, что трендов нет [8]. Тренды будут включены в расчеты перед созданием результирующей поверхности.

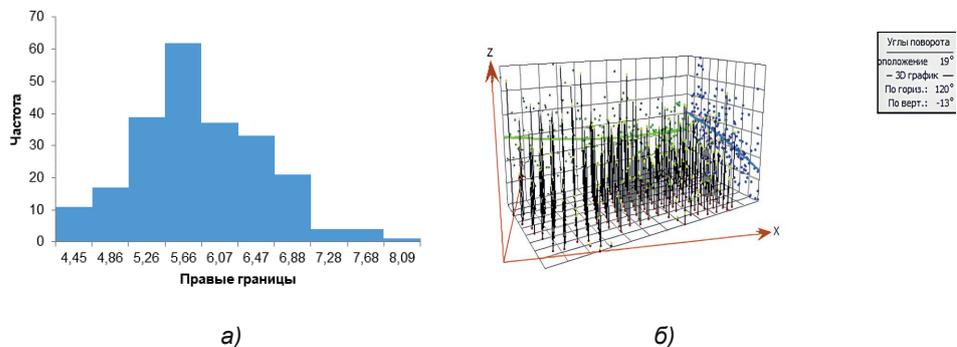


Рис. 2. а – гистограмма распределения данных, б – линии тренда

На основе проанализированных данных можно построить экспериментальную вариограмму или же облако точек вариограммы. Однако экспериментальная вариограмма представляет собой дискретный набор точек, который нельзя подать на вход алгоритму для построения картограммы. Для того чтобы подать на вход алгоритму необходима теоретическая вариограмма. Теоретическая вариограмма – это математическая функция, которая аппроксимирует экспериментальную вариограмму [10]. При правильном подборе теоретической вариограммы, она будет описывать поведение используемых данных.

Таблица 2

Статистические параметры рабочего участка

Показатель	Значение
Количество проб	229
Среднее, рН	5,64
Максимальное значение	7,82
Минимальное значение	4,25
Мода	5,60
Медиана	5,58
Среднее квадратическое отклонение	0,70
Дисперсия	0,49
Коэффициент вариации рН, %	12,40
Асимметрия (А)	0,40
ошибка асимметрии (mas)	0,16
Экссесс (Е)	0,10
Ошибка эксцесса (mE)	0,32

При подборе теоретической вариограммы была применена устойчивая модель (рис. 3), она наиболее точно описывает поведение данных. При этом большой радиус влияния равен 840 м это значит, что весь участок в направлении юго-запад северо-восток автокоррелирован. Однако расстояние автокорреляции по направлению юго-запад северо-восток уменьшается до 248 м. Это связано с влиянием анизотропий, само же наличие анизотропий предположительно вызвано гипсометрией рельефа и движением сельскохозяйственной техники.

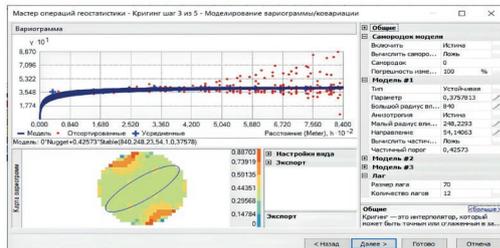


Рис. 3. Теоретическая вариограмма

Частичный порог – это порог минус самородок, для данной вариограммы он равен 0,43. Значение, в котором модель вариограммы достигает диапазона (значение на оси y), называется порогом. Диапазон – это расстояние, при котором модель начинает выравниваться. Эффект самородка (Nugget effect) – это выброс который может включать такие атрибуты, как погрешности измерения или пространственные источники вариации на расстояниях [5], для данной вариограммы равен 0. Следовательно остаточная дисперсия равна 0, это говорит о высокой точности, подобранной вариограммы.

В результате всех операций была получена картограмма кислотности (рис. 4). При визуальном осмотре явно наблюдается анизотропия: в направлении северо-запад юго-восток наблюдается линейное изменение кислотности на протяжении всего участка, а в перпендикулярном направлении такая тенденция не прослеживается. Также при сравнениях картограмм кислотности, построенных по классическому и геостатистическому методу заметно, что более реальную обстановку на поле отображает картограмма, построенная с помощью геостатистического подхода.

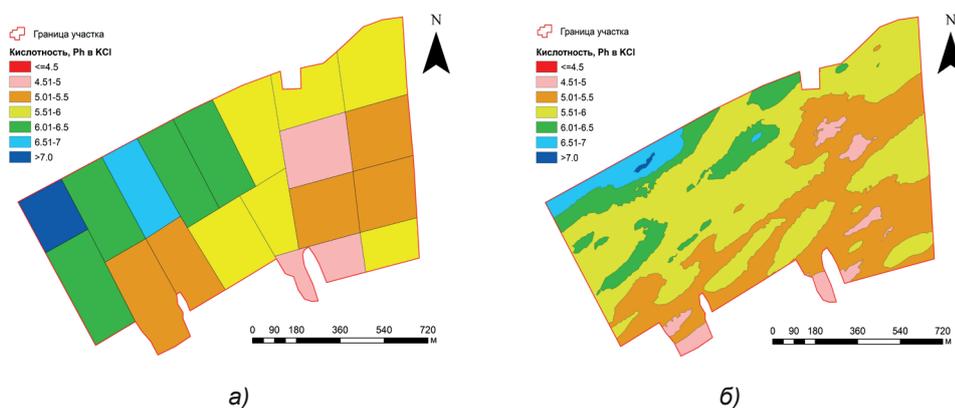


Рис 4. Картограмма кислотности (а – построенная классическим методом, б – с применением методов геостатистики)

Стоимость отбора проб и лабораторного анализа по определению кислотности на 12.01.2023 г. составляет 7,5 руб. и 2.05 руб. соответственно. Но при дальнейших подсчётах следует учитывать, что в стоимость отбора одного смешенного образца входят около 30 уколов буром. Для отбора проб и лабораторного анализа в целях геостатистического метода было затрачено в 2,9 раза больше средств, чем на классический метод (табл. 3).

Таблица 3

Стоимость отбора и лабораторного анализа проб по двум методам, руб.

Показатель	Классический метод	Геостатистический метод
Количество проб	19	229
Стоимость отбора проб	143	57
Стоимость лабораторных анализов	39	469
Итоговая стоимость	182	526

На 12.01.2023 г. стоимость внесения 1 т CaCO₃ составляла 86 руб., включая закупку, транспортировку и внесение. Расчет доз внесения CaCO₃ выполнен по данным таблицы 1. Применение геостатистического метода по сравнению с классическим методом, позволило сократить количество необходимого CaCO₃ на 56,2 т и обрабатываемую площадь на 2,9 га. Это привело к снижению затрат на 28 %, или на 4 833 руб. (табл. 4). Экономия в пересчете на рубли за гектар, с учетом отбора проб и лабораторных анализов, составила 36 руб./га, 147 руб./га и 109 руб./га для классического и геостатистического методов соответственно.

Таблица 4

Затраты на проведение известкования по двум методам

Группа почв	Гумус, %	pH _{KCl}	CaCO ₃ , т/га	Площадь, га	CaCO ₃ , т	Затраты, руб.
по классическому способу агрохимического обследования						
Связносупесчаные	1,51–2	4,51–5	5,25	5,8	30,5	2623
Связносупесчаные	2,01–2,5	4,51–5	6,25	6,8	42,5	3655
Рыхлосупесчаные	2,01–2,5	5,01–5,5	3,75	34,5	129,4	11128
Почвы не нуждающиеся в известковании				72,6	–	–
Сумма				119,7	202,4	17406
по агрохимическому обследованию с применением геостатистического метода						
Песчаные	2,01–2,5	4,5–4,75	4,5	0,1	0,5	43
Связносупесчаные	1,51–2	4,76–5	5	0,4	2	172
Рыхлосупесчаные	2,01–2,5	4,76–5	4	2,5	10	860
Песчаные	1,51–2	4,76–5	3,5	1,7	6	516
Связносупесчаные	1,51–2	5,01–5,25	4,5	2	9	774
Рыхлосупесчаные	1,51–2	5,01–5,25	3,5	11,4	39,9	3431
Песчаные	2,01–2,5	5,01–5,25	3	1,4	4,2	361
Связносупесчаные	1,51–2	5,26–5,5	4	1,2	4,8	413
Рыхлосупесчаные	2,01–2,5	5,26–5,5	3	22	66	5676
Песчаные	1,51–2	5,26–5,5	2,5	1,5	3,8	327
Почвы не нуждающиеся в известковании				75,5	–	–
Сумма				119,7	146,2	12573

Затраты на проведение известкования с учетом неоднородности почвенного покрова оказались ниже, чем по классическому методу. Но геостатистический подход позволяет вносить CaCO_3 эффективно, не только количественно (в необходимом объеме), но и качественно (в нужном месте). Из 202,4 т внесенных бы на поле по классическому методу: эффективно (сколько необходимо) внесено 65,3 %; недоизвестковано (необходимы большие дозы) – 4,1 %; переизвестковано (необходимы меньшие дозы или вообще нет необходимости в проведении) – 30,6 %.

ВЫВОДЫ

Применение геостатистических методов помогает значительно повысить точность картографирования почвенных характеристик. В данном исследовании использование методов геостатистики позволило бы сократить количество необходимого CaCO_3 на 56,2 т, и обрабатываемую площадь – на 2,9 га. Несмотря на более высокие затраты на отбор проб и лабораторные анализы в 2,9 раза дороже, чем для классического метода, затраты на известкование включая: закупку, транспортировку, внесение, отбор проб и лабораторные анализы в пересчете на гектар оказываются ниже, чем при применении классического метода. А именно 109 руб./га вместо 147 руб./га соответственно. Общие затраты на проведение известкования, без учета отбора проб и лабораторного анализа, сократились с 17 406 руб. до 12 573 руб., экономия средств составила 4 833 руб., или 28 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь. Статистический сборник [Электронный ресурс] – Минск, 2021. – 179 с. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/241/241db6e8c967173-2fede4b275828d2ae.pdf>. – Дата доступа: 14.04.2024.
2. Плодородие почв – основа продовольственной безопасности государства: материалы VI съезда Белорусского общества почвоведов и агрохимиков, Минск, 21 июля 2022 г. / Институт почвоведения и агрохимии, Белорусское общество почвоведов и агрохимиков; редкол.: Ю. К. Шашко [и др.]. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – С. 54–58.
3. Клебанович, Н. В. Почвоведение и земельные ресурсы: учеб. пособие / Н. В. Клебанович. – Минск: БГУ, 2013. – 343 с.
4. Клебанович, Н. В. География кислотности пахотных почв Беларуси // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2006. – № 1. – С. 92–97.
5. Кынашев, С. К. Основные элементы и понятия геостатистики / С. К. Кынашев, С. А. Баранов. – Республика Казахстан, 2015 г. – 15 с.
6. Инструкция по известкованию кислых почв сельскохозяйственных земель / В. В. Лапа [и др.] – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2019. – 31 с.
7. Математические методы в географии: учебно-методическое пособие / Н. К. Чертко, А. А. Карпиченко. – Минск: БГУ, 2009. – С. 10–38.
8. Клебанович, Н. В. Геостатистический анализ при картографировании пространственной неоднородности влажности и кислотности почв / Н. В. Клебанович, А. Л. Киндеев, А. А. Сазонов // Геосферные исследования. – 2021 г. – № 3. – С. 80–91.

9. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Васильюк. – Минск: БГУ, 2003. – 322 с.

10. Моделирование оптимальной теоретической вариограммы мощности пласта на основе группового учета аргументов / Д. Н. Шурыгин [и др.]. – Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014 г. – № 4. – С. 76–78.

EXPEDIENCY OF TAKING INTO ACCOUNT INTRA-FIELD HETEROGENEITY OF SOIL ACIDITY IN LIMING OPERATIONS

M. V. Vorobei, A. L. Kindeev

Summary

The article presents the main stages of mapping of agrochemical properties by geostatistical method on the example of soil acidity. The comparison of classical and geostatistical methods of soil acidity mapping for the study area was carried out. The comparison was made by the following indicators: cost of sampling and laboratory analysis, costs of liming. Geostatistical method, despite higher costs of sampling and laboratory analysis, 2.9 times more expensive than the classical method, would reduce the cost of liming from 147 rub./ha to 109 rub./ha.

Поступила 20.05.24

О НАБУХАНИИ ГИДРОГЕЛЕЙ В ПОЧВЕ

А. Р. Цыганов¹, Г. А. Чернуха², В. Г. Чернуха³

¹Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь

²Белорусская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Горки, Беларусь

³Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
г. Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата в Беларуси в последние десятилетия привело к увеличению частоты засух, что оказывает негативное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Эксперты считают, что за последние 30 лет годовое количество осадков в Беларуси изменилось на 5–7 %, поэтому говорить о глобальной засухе нельзя. Но поменялось внутригодовое распределение влаги. Задача устойчивого управления водными ресурсами в сельском хозяйстве обуславливает необходимость изучения и внедрения инновационных решений.

Одной из влагоберегающих технологий является внесение в почву гидрогелей-суперабсорбентов воды. Гидрогели представляют собой трехмерные полимерные сетки, образованные за счет электростатической или ковалентной сшивки гидрофильных мономеров. В результате наличия упругой сетки, вода эффективно заполняет внутриводное пространство полимерных гидрогелей. Они обладают очень высокой степенью набухания в воде: до 1 кг воды на 1 г сухого полимера. Поэтому их относят к классу влагопоглотителей (суперабсорбентов).

По происхождению гидрогели делятся на синтетические и природные. Синтетические гидрогели – главным образом полимеры и сополимеры акриламида и акриловой кислоты. Природные гидрогели могут быть синтезированы на основе полисахаридов – целлюлозы, крахмала, гуаровой камеди и др. Биоразлагаемость, биосовместимость, нетоксичность и нерастворимость в большинстве растворителей, а также возможность получения из природного и возобновляемого сырья делает целлюлозу привлекательным источником получения гидрогелей. С экологической точки зрения для внесения в почву предпочтительнее природные полимеры, т. к. они биоразлагаемы и не загрязняют почву. Как у синтетических, так и у натуральных гидрогелей есть свои недостатки: синтетические гидрогели медленно разлагаются из-за невысокой способности к биодegradации, в то же время натуральные, характеризующиеся высокой скоростью биодеструкции, не обладают достаточной механической прочностью и влагоемкостью [1].

В настоящее время порядка 95 % суперабсорбентов применяются при производстве гигиенических изделий для детей и взрослых. Кроме того, их используют в сельском хозяйстве как вещество, способствующее сохранению влаги в почве, что приводит к сокращению потерь урожая, снижению эрозии и вымыванию плодородного слоя почвы, строительстве, нефтехимии и в некоторых других областях человеческой деятельности.

Внедрение гидрогелей в практику сельского хозяйства, несмотря на их положительное влияние на химико-физические свойства почвы, окружающую среду, водный баланс почв и урожайность, происходит недостаточными темпами. Это связано не только с их стоимостью. Анализ литературных источников показал, что не менее важной причиной является отсутствие научно обоснованных рекомендаций по их применению в различных почвенно-климатических зонах [2].

Цель работы – изучить факторы, влияющие на набухание гидрогелей в почве.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились с 2 видами гидрогелей. Первый – гидрогель природного происхождения Зеба (Индия), который производится из кукурузного крахмала. Представляет собой гранулы белого цвета без запаха. Второй – синтетический гидрогель Bellava (Германия), состоящий из полиакрилата натрия в виде гранул 0,05–0,9 мм, действует в течение 3–4 лет.

В лабораторных опытах изучалось:

– набухание гидрогеля в дистиллированной воде, водной вытяжке из почвы и в стандартном растворе Кнопа. Для этого 1 г сухого гидрогеля равномерно распределялся по сити с отверстиями диаметром менее 0,05 мм, которое помещалось в емкость с водой или водным раствором объемом 1 литр. Степень набухания гидрогеля оценивалась по изменению массы набухшего гидрогеля во времени. Для получения водной вытяжки навеску почвы заливали дистиллированной водой в соотношении 1:5, перемешивали в течение 1 мин. и оставляли на 15 мин. Затем суспензию взбалтывали и фильтровали через бумажный фильтр;

– полная влагоемкость почвы и степень набухания гидрогелей в зависимости от возрастающих доз их внесения;

– влияние распределения гидрогелей в почве на их набухание и полную влагоемкость.

Полную влагоемкость определяли по общепринятой методике с помощью пластмассовых цилиндров высотой около 100 мм и диаметром около 50 мм с сетчатым дном.

Степень набухания гидрогелей в почве рассчитывали исходя из значений увеличения полной влагоемкости почвы за счет применения гидрогелей и дозы их применения.

Опыты проводились с дерново-подзолистой окультуренной среднесуглинистой почвой, развивающейся на лессовидном суглинке, подстилаемым мореной с глубины около 1 м, характеризующейся следующими агрохимическими показателями: гумус – 1,9 %, кислотность 6,5, содержание подвижных форм фосфора и калия 215,3 и 241,6 мг/кг соответственно. Почвенные образцы были просеяны через сито с отверстиями диаметром 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучая набухание гидрогелей в дистиллированной воде нами было установлено, что на степень набухания гидрогелей влияет размер сита, на которое помещался гидрогель. Максимальная степень набухания наблюдалась, когда гранулы гидрогеля на сите располагались слоем в одну гранулу. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Динамика набухания гидрогелей

Время набухания, мин.	Масса гидрогеля, г					
	Зеба			Bellava		
	H ₂ O дист.	водная вытяжка из почвы	раствор Кнопа	H ₂ O дист.	водная вытяжка из почвы	раствор Кнопа
0	1	1	1	1	1	1
5	184	111	74	186	153	92
10	240	164	92	248	210	110
15	258	182	84	257	229	104
20	267	188	80	264	244	97
25	270	190	75	268	248	88
30	272	191	69	269	254	83
35	279	195	69	284	257	83
40	284	200	69	288	258	81
45	292	204	68	289	255	81
50	292	207	67	289	255	78
55	293	204	67	290	254	77
60	294	204	66	292	254	76
1440 (1 сутки)	294	231	8	292	240	14
2880 (2 суток)	294	232	8	293	240	13

Установлено, что процесс набухания гидрогелей в дистиллированной воде протекает с высокой скоростью. Так, за первые 5 минут масса гидрогеля увеличилась с 1 г до 184 и 186 г соответственно, что составляло более 60 % от максимального значения. Через 20 мин. масса гидрогелей достигла более 90 % от максимальной. Максимальное значение массы гидрогелей было достигнуто в течение 1 часа. Через сутки и двое суток масса оставалась на достигнутом уровне. Таким образом, экспериментально установлено, что 1 г сухих исследуемых гидрогелей способен абсорбировать порядка 290 мл дистиллированной воды.

Набухание гидрогелей в водной вытяжке из дерново-подзолистой суглинистой почвы протекало медленнее и было адсорбировано соответственно 231 и 239 г воды, что на 21 и 18 % ниже, чем в дистиллированной воде.

В растворе Кнопа набухание обоих гидрогелей наблюдалось лишь в течение первых 10 мин. За это время масса гидрогелей достигла максимума – увеличилась до 92 и 110 г соответственно, что в 2,6 и 2,3 раза ниже, чем за такое же время в дистиллированной воде и 1,8 и 1,9 раз ниже, чем в водной вытяжке из почвы. Затем начался обратный процесс. К концу первого часа наблюдения масса как природного, так и синтетического гидрогелей уменьшилась в 1,4 раз относительно максимальных значений. Через сутки она снизилась в 11,5 и 7,9 раз. Спустя двое суток дальнейшее снижение массы гидрогелей не наблюдалось. В литературных источниках имеются сведения, что при разбавлении раствора Кнопа набухание гидрогелей увеличивается [3].

Полученные результаты свидетельствуют, что максимальная степень набухания гидрогелей наблюдалась в дистиллированной воде, на набухание гидрогелей оказывает влияние состав и концентрация ионов, присутствующих в воде.

Также изучалось влияние возрастающих доз гидрогелей на полную влагоемкость почвы и степень их набухания. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние гидрогелей на полную влагоемкость дерново-подзолистой суглинистой почвы

Вариант опыта	Полная влагоемкость, %		Увеличение, раз		Набухание в расчете на 1 г гидрогеля, г	
	Зеба	Bellava	Зеба	Bellava	Зеба	Bellava
Контроль (без гидрогеля)	41,6	41,6	–	–	–	–
0,5 г на 1 кг почвы	53,2	52,0	1,28	1,25	228,9	204,7
1,0 г на 1 кг почвы	56,4	55,9	1,36	1,34	148,0	143,1
2,5 г на 1 кг почвы	66,4	75,4	1,60	1,81	97,8	133,4
5,0 г на 1 кг почвы	87,5	106,1	2,10	2,55	91,7	129,0
10,0 г на 1 кг почвы	118,2	167,2	2,84	4,02	76,7	125,6

Полная влагоемкость используемой в опытах дерново-подзолистой суглинистой почвы находилась на уровне 41,6 %. Внесение в почву гидрогелей в дозе 0,5 г на 1 кг почвы привело к увеличению полной влагоемкости в 1,25 и 1,28 раз. Повышение дозы гидрогелей до 1,0 г на 1 кг почвы привело к росту полной влагоемкости до 55,9 и 56,4 %, или в 1,34 и 1,36 раз, эффективность гидрогелей была примерно одинакова.

При дозе гидрогелей 2,5 г на 1 кг почвы начали проявляться различия в эффективности гидрогелей: полная влагоемкость почвы при применении Зебы составляла 66,4 %, Bellava – 75,4 %, то есть повысилась в 1,60 и 1,81 раз соответственно. Дальнейшее увеличение доз гидрогелей до 5,0 и 10,0 г привело к увеличению полной влагоемкости в 2,10 и 2,55 раз и 2,84 и 4,02 раз соответственно.

В то же время степень набухания гидрогелей в расчете на 1 г с увеличением их доз применения снижалась. Так, при дозе гидрогеля Зеба 0,5 г на 1 кг почвы она была меньше, чем в дистиллированной воде в 1,28 раз, Bellava – 1,43 раз и была немного ниже уровня значений, характеризующих степень набухания гидрогелей в водной вытяжке из этой же почвы (табл. 1). При дозе 1,0 г на 1 кг почвы степень набухания снизилась по сравнению с предыдущим вариантом в 1,55 и 1,43 раз. В вариантах с дозой 10,0 г на 1 кг почвы этот показатель снизился в 2,98 и 1,63 раз. Это обусловлено усилением сдавливания набухающего гидрогеля частицами почвы за счет увеличения объема набухших частиц самого гидрогеля.

Далее нами изучалось влияние распределения гидрогелей в почве на ее полную влагоемкость. Для этого гидрогели вносились поверхностно, а также равномерно в слои почвы 0–2 см, 0–4 см и т. д. Нами предполагалось, что в зависимости от глубины заделки гидрогелей будет изменяться степень их сдавливания частичками почвы и соответственно полная влагоемкость, то есть чем глубже вносится в почву гидрогель, тем сильнее он сдавливается. Во всех вариантах данного опыта гидрогели вносились в дозе 2,5 г на кг почвы. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Влияние распределения гидрогеля в почве на полную влагоемкость

Слой почвы, см	Полная влагоемкость почвы, %		Повышение за счет гидрогелей, %		± относительно контроля, раз		Набухание в расчете на 1 г гидрогеля, г	
	Зеба	Bellava	Зеба	Bellava	Зеба	Bellava	Зеба	Bellava
0–2 (контроль)	76,6	81,4	35,0	39,8	–	–	140,0	159,2
0–2*	89,3	92,5	47,7	50,9	+1,17	+1,08	190,8	203,6
0–4	72,2	75,5	30,6	33,9	–1,06	–1,11	122,4	135,6
0–6	62,5	68,0	20,9	26,4	–1,23	–1,20	83,6	105,6
0–8	57,4	64,1	15,8	22,5	–1,33	–1,27	63,2	90,0
0–10	54,4	61,4	12,8	19,8	–1,41	–1,33	51,2	79,2

* поверхностное внесение гидрогеля.

Опыты подтвердили наши предположения. Было установлено, что при одной и той же дозе гидрогелей в расчете на 1 кг почвы эффективность влияния на полную влагоемкость почвы зависит от их распределения в почве. Полная влагоемкость исследуемой почвы без применения гидрогелей составляла 41,6 % (табл. 2). При равномерном распределении гидрогелей в 2-сантиметровом слое почвы ее полная влагоемкость повысилась до 76,6 и 81,4 % соответственно. При этом поверхностное внесение эквивалентного количества гидрогелей обеспечило еще большее повышение полной влагоемкости до 89,3 и 92,5.

При внесении гидрогелей в 4-сантиметровый слой почвы наблюдалось снижение полной влагоемкости относительно контрольного варианта в 1,06 и 1,08 раз. При дальнейшем увеличении толщины слоев почвы происходило постепенное снижение эффективности влияния гидрогелей на ее полную влагоемкость: при внесении гидрогелей в 6-сантиметровый слой в 1,23 и 1,20 раз, в 10-сантиметровый слой – в 1,41 и 1,33 раз соответственно. Причем во всех вариантах опыта более эффективным в 1,04–1,13 раз было применение гидрогеля Bellava.

Таким образом, при заделке гидрогелей в почву они подвергаются сдавливанию частицами почвы и чем на большую глубину в почву вносятся гидрогели, тем больше эффект сдавливания. При набухании гидрогелей это воздействие усиливается.

Соответственно изменялась степень набухания гидрогелей. Максимальные значения наблюдались при поверхностном внесении гидрогелей: масса гидрогелей при набухании увеличилась с 1 г до 191,2 и 203,6 г соответственно. Эти значения сопоставимы с результатами, полученными при изучении набухания гидрогелей в водной вытяжке из почвы (табл. 1). При равномерном распределении гидрогелей в 2-сантиметровом слое почвы масса гидрогелей при набухании была меньше, чем при поверхностном внесении в 1,37 и 1,28 раз, при внесении в 10-сантиметровый слой наблюдалось дальнейшее снижение – в 2,73 и 2,01 раз соответственно.

Полученные результаты согласуются с выводами ученых из Принстонского университета, которые изучали причины, по которым внесение гидрогеля в почву не всегда приводит к желаемым результатам. Для этого они разработали заменитель

почвы, который позволял наблюдать за гидрогелями и продемонстрировали, что количество воды, сохраняемой гидрогелями, контролируется балансом между силой, создаваемой при набухании гидрогеля в воде, и сдерживающей силой окружающей почвы. В результате гидрогели поглощают большое количество воды при смешивании с поверхностными слоями почвы, но не работают так хорошо в глубине, где испытывают нарастающее давление [4].

Результаты, приведенные в таблице 3, позволяют оценить, как изменяется полная влагоемкость 2-сантиметровых слоев почвы и набухание в них гидрогелей в зависимости глубины их заделки. Полученные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние глубины заделки гидрогеля в почву на полную влагоемкость и набухание гидрогелей

Глубина заделки гидрогеля, см	Полная влагоемкость почвы, %		Повышение за счет гидрогелей, раз		Набухание в расчете на 1 г гидрогеля	
	Зеба	Bellava	Зеба	Bellava	Зеба	Bellava
0–2 (контроль)	76,6	81,4	1,84	1,96	140,0	159,2
2–4	67,4	69,6	1,62	1,67	103,2	112,0
4–6	45,9	53,0	1,10	1,27	17,2	45,9
6–8	42,1	52,4	1,01	1,26	2,0	43,2
8–10	42,4	50,6	1,02	1,22	3,2	36,0

Как ранее указывалось, полная влагоемкость почвы без внесения гидрогелей составляла 41,6 % (табл. 2). При внесении по 2,5 г гидрогелей Зеба и Bellava на 1 кг почвы в 2-сантиметровый слой ее полная влагоемкость увеличилась в 1,84 и 1,96 раз соответственно.

Та же доза гидрогелей в слое почвы 2–4 см повысила ее полную влагоемкость в меньшей степени – в 1,62 и 1,51 раз соответственно.

В слое почвы 4–6 см эффективность влияния гидрогелей на полную влагоемкость почвы была еще ниже. При внесении гидрогеля Зеба в слои почвы 6–8 и 8–10 см ее полная влагоемкость практически не изменялась и оставалась на уровне варианта без применения гидрогеля. Гидрогель Bellava продемонстрировал большую устойчивость к сдавливанию частицами почвы, что обеспечило повышение полной влагоемкости почвы 1,26 и 1,25 раз.

Аналогично изменялась степень набухания гидрогелей в зависимости от глубины заделки их в почву. В верхнем 2-сантиметровом слое почвы она была максимальной – 140,0 и 159,2 г в расчете на 1 г гидрогеля соответственно. В слое почвы 2–4 см она была ниже в 1,36 и 1,88 раз. В слоях почвы 6–8 и 8–10 см степень набухания гидрогеля Зеба снизилась относительно контроля более, чем в 40 раз и из-за сдавливания частицами почвы он потерял способность поглощать воду. В то же время степень набухания гидрогеля Bellava снизилась в меньшей степени – примерно в 4,0 раза и его применение повысило полную влагоемкость на 10,8 и 9,0 % относительно варианта, где гидрогель не применялся.

ВЫВОДЫ

Установлено, что 1 г сухих гидрогелей Зеба и Bellava способен абсорбировать порядка 290 мл дистиллированной воды. В водных растворах степень набухания гидрогелей ниже, на нее оказывают влияние состав и концентрация присутствующих ионов.

Равномерное внесение исследуемых гидрогелей в дерново-подзолистую окультуренную среднесуглинистую почву в дозах от 0,5 до 10,0 г на 1 кг почвы позволило увеличить ее полную влагоемкость в 1,25–4,02 раз. При этом степень набухания гидрогелей в почве в расчете на 1 г была ниже, чем в дистиллированной воде в 1,3–3,8 раз и с увеличением их доз применения она снижалась. Это обусловлено усилением сдавливания набухающего гидрогеля частицами почвы за счет увеличения объема набухших частиц самого гидрогеля.

Эффективность влияния гидрогелей на полную влагоемкость почвы зависела от толщины слоя почв, в котором они равномерно распределены. При внесении гидрогелей в 2-сантиметровый слой почвы ее полная влагоемкость увеличивалась относительно варианта без применения гидрогелей в 1,8 и 2,0 раза, а при внесении в 10-сантиметровый слой в той же дозе – только в 1,3 и 1,5 раза соответственно.

Максимальная степень набухания гидрогелей наблюдались при их поверхностном внесении в почву: масса гидрогелей увеличилась с 1 г до 191,2 и 203,6 г соответственно. При их внесении в 2-сантиметровый слой она была меньше в 1,4 и 1,3 раза, а при внесении в 10-сантиметровый слой в 4,0 и 2,4 раза соответственно.

Полная влагоемкость 2-сантиметровых слоев дерново-подзолистой окультуренной среднесуглинистой почвы и набухание в них гидрогелей снижались с увеличением глубины их заделки. При внесении гидрогеля Зеба в слои почвы 6–8 и 8–10 см его степень набухания была очень низкой и практически не влияла на полную влагоемкость. Степень набухания гидрогеля Bellava в слоях почвы 4–6, 6–8 и 8–10 см снизилась относительно слоя 0–2 см в 4–5 раз, но была выше, чем у гидрогеля Зеба.

Полученные результаты позволяют утверждать, что степень набухания гидрогелей в почве зависит от состава и концентрации ионов, присутствующих в воде и баланса между силой, создаваемой набухающим гидрогелем, и сдерживающей силой окружающих частиц почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимова, Ю. Г. Полимерные гидрогели в сельском хозяйстве (обзор) / Ю. Г. Максимова, В. А. Щетко, А. Ю. Максимов // *Сельскохозяйственная биология*. – 2023. – Т. 58. – № 1. – С. 23–42.
2. Ревенко, В. Ю. Использование гидрогелей в растениеводстве / В. Ю. Ревенко, О. М. Агафонов // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. – 2018. – № 11–2. – С. 59–65.
3. Данилова, Т. Н. Влияние полимерного геля «РИТИН-10» на водно-физические свойства почв / Т. Н. Данилова // *Агрофизика*. – 2013. – № 210). – С. 38–43.
4. Under pressure: Hydrogel swelling in a granular medium [Electronic resource] / ed. Jean-François Louf, Nancy B. Lu, Margaret G. O'Connell, H. Jeremy Cho, Sujit S. Datta. – *Science Advances*, 2021, Volume 7, Issue 7. – Mode of access: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abd2711> – Date of access: 14.03.2024.

ON THE SWELLING OF HYDROGELS IN THE SOIL

A. R. Tsyganov, G. A. Chernukha, V. G. Chernukha

Summary

In laboratory experiments, it was found that the swelling rating of hydrogels in soil is lower than in distilled water and depends on the composition and concentration of ions dissolved in water and the balance between the force created by the swelling hydrogel and the restraining force of the surrounding soil particles.

The maximum swelling rating of hydrogels when applied to sod-podzolic cultivated middle loamy soil was observed with their surface application, with an increase in the depth of their embedding, it decreased. For this reason, soil application of Zeba hydrogel to a depth of 6–10 cm did not affect its maximum water-holding capacity. Under the same conditions, Bellava hydrogel has demonstrated greater resistance to compression by soil particles.

Поступила 02.05.24

2. ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

УДК 631.8:633.14:631.445.2

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ ГИБРИДНОЙ ОЗИМОЙ РЖИ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ

Т. М. Серая, Е. Н. Богатырева, Т. М. Кирдун, А. Л. Новик,
Ю. А. Симанкова, М. М. Торчило, Н. Ю. Жабровская

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Озимая рожь – традиционная для Беларуси культура, площади под которую в последние годы снижаются, так в 2021 г. озимая рожь занимала 353,4 тыс. га, в 2023 г. – уже только 228,4 тыс. га, что в структуре озимых зерновых культур составляет 18 %. Зерно ржи используется для изготовления хлеба и хлебобулочных изделий, при производстве солода для кваса, в спиртовой и крахмалопаточной промышленности.

Урожайность зерна данной культуры невысокая и в зависимости от погодных условий в среднем по республике составляет 20–26 ц/га при средних дозах удобрений: азотных – 84 кг/га, фосфорных – 12 кг/га, калийных – 68 кг/га (N:P:K 1:0,14:0,8) [1–4]. По сравнению с озимыми пшеницей, тритикале и ячменем озимая рожь более пластичная культура и по своим биологическим особенностям способна произрастать на разных по плодородию и гранулометрическому составу дерново-подзолистых почвах. Районированные в Беларуси сорта озимых пшеницы, тритикале и ячменя имеют более высокую потенциальную урожайность, чем озимая рожь. Учитывая эти особенности ржи в сельскохозяйственных организациях под данную культуру отводят почвы и вносят удобрения по остаточному принципу.

Большинство современных сортов озимых пшеницы, тритикале, гибридной ржи обладают потенциалом урожайности 100 ц/га и более. Но получение такой высокой урожайности зерна на дерново-подзолистых почвах республики, в большинстве своем легких, даже при полном соблюдении технологии, далеко не всегда возможно из-за непредсказуемых погодных условий. Поэтому, в наших условиях, при выборе культуры целесообразно ориентироваться не только на потенциал урожайности, но и на стабильность получения запланированного урожая при любой погоде.

Для того чтобы свести к минимуму влияние неблагоприятных погодных факторов на урожайность необходимо вводить в севооборот культуры с высокой стрессоустойчивостью и, в первую очередь, – засухоустойчивые. «Матушка-рожь кормит всех сплешь, а пшеничка – по выбору» – эта народная пословица как нельзя лучше отражает стабильность урожаев ржи. Рожь лучше других зерновых культур приспособлена к возделыванию на почвах с невысоким естественным плодородием,

более устойчива к неблагоприятным погодным условиям, менее требовательна к предшественникам, слабо поражается корневыми гнилями и обеспечивает, при соблюдении технологии возделывания, гарантированные урожаи [5, 6].

Гибридная рожь КВС Винетто – это оптимальное сочетание крайне высокой урожайности и очень сильной адаптивности к внешним условиям. Гибридная рожь отличается высокой урожайностью – выше популяционной ржи на 20–25 %, на легких почвах превосходит по урожайности пшеницу и тритикале, переносит до 25 °С мороза на глубине узла кущения, благодаря мощной корневой системе характеризуется высокой засухоустойчивостью. Высокий коэффициент кущения позволяет уменьшить норму высева до 2 млн всхожих семян/га, то есть в 2 раза ниже, чем у сортов. Гибриды с генетической системой Pollen Plus имеют отличную устойчивость к спорынье [7].

Цель исследований – изучение эффективности систем удобрения озимой ржи и способа обработки среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыт с озимой рожью гибрид КВС Винетто проводили на опытном поле Института почвоведения и агрохимии, расположенном в ПРУП «Э/б имени Котовского» Узденского района на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве со слабокислой реакцией почвенной среды (рН 5,52–5,80), средним и повышенным содержанием гумуса (1,96–2,40 %) и подвижных форм фосфора (134–177 мг/кг почвы), низким и средним содержанием подвижных форм калия (134–195 мг/кг).

Опыт проводился в двух полях, на каждом поле в двух блоках, где в качестве основной обработки применялись вспашка и дискование в один след. Повторность вариантов 4-кратная, размер делянки – 31,2 м², учетная – 24 м². Озимую рожь возделывали в 2021–2022 и 2022–2023 гг.

Предшественник озимой ржи – горох посевной на зерно. Урожайность соломы гороха в среднем за 2 года составила 2,9 т/га с содержанием (на сухое вещество): N – 1,07 %, P₂O₅ – 0,50 %, K₂O – 1,51 %. После уборки предшественника измельченную солому равномерно распределяли по полю, вносили компенсирующие дозы азота (N₁₅) в виде КАС или микробное удобрение Жыцень в дозе 3 л/га и задисковывали. Через две недели в 1-м блоке проводили вспашку, во 2-м – дискование в один след. Удобрение микробиологическое Жыцень – целлюлозразлагающее удобрение с содержанием *Pseudomonas* sp. – 11 не менее 1 · 10⁹ КОЕ/см³, *Bacillus* sp. – 49 – не менее 1 · 10⁹ КОЕ/см³.

Минеральные удобрения внесены в полной дозе, рассчитанной под планируемую урожайность (N₇₀₊₃₀P₅₀K₉₀). Фосфорные и калийные удобрения внесены под основную обработку почвы, азотные – в две подкормки: в начале ранневесенней вегетации (КАС) и в фазу первый узел (карбамид).

Коэффициенты возмещения выноса рассчитывали как отношение количества поступивших в почву элементов питания с удобрениями и соломой к выносу их с урожаем.

Расчет экономической эффективности применения удобрений проведен по «Методике определения агрономической и экономической эффективности минеральных и органических удобрений» [8]. Для определения прибыли рассчитывали стоимость урожая, полученного за счет внесения удобрений, и затраты

на получение прибавки урожая от удобрений. Использованы нормативы затрат на удобрения и их внесение, доработку прибавки урожая, цены на сельскохозяйственную продукцию в Республике Беларусь на 2023 г. в долларовом эквиваленте (долл. США). Статистическую обработку результатов осуществляли согласно методике полевого опыта Б. А. Доспехова с использованием MS Excel 2010.

Озимую рожь гибрид КВС Винетто высевали с нормой посева 60 кг/га (2,6 млн всхожих семян).

Погодные условия в осенний период вегетации озимой ржи в 2021 г. были неблагоприятными для роста и развития растений. Сентябрь был холодным (среднесуточная температура на 2,4 °С ниже среднееголетней) и влажным. При этом первая половина месяца была сухой, практически вся сумма осадков выпала с 17 по 25 сентября. В результате сроки сева были затянуты. Озимая рожь ушла в зиму в фазе 2–3 листа. В ноябре и декабре погодные условия были близки к среднееголетним значениям, январь и февраль – теплее обычного с большим количеством осадков. Март был холодным и сухим: при среднемесячной температуре 1,3 °С выпало всего 3 мм осадков. Холоднее обычного и дождливыми были апрель и май: при среднесуточной температуре в апреле 5,6 °С выпало 108 мм осадков; в мае выпало 70 мм осадков при температуре 11 °С. Благодаря этому озимая рожь хорошо раскустилась. Июнь был суше и теплее обычного, в результате ГТК составил 0,9 при среднееголетнем 1,5. Погода в июле была близка к норме.

Погодные условия в осенний период вегетации озимой ржи в 2022 г. были близкими к предыдущему году, в период вегетации озимой ржи в 2023 г. – значительно отклонялись от нормы. В апреле складывались благоприятные температурные условия для развития возобновившихся вегетацию озимых зерновых культур. Обильные осадки в марте, составившие 222 % нормы, обеспечили достаточную влагообеспеченность почвы и в течение апреля, что, наряду с благоприятным температурным режимом (среднемесячная температура апреля превысила многолетний показатель на 1,8 °С), способствовало хорошему кущению озимых зерновых. В апреле выпало 20 мм осадков (57 % от нормы), в мае ситуация продолжала ухудшаться, в этом месяце выпало всего 3 мм осадков (ГТК 0,2). В целом период с засушливыми условиями, когда отсутствовали эффективные осадки (более 5 мм в сутки) составил 79 дней (с 1 апреля по 18 июня). Дефицит влаги вызвал задержку роста и развития растений, нарушение минерального питания, что в значительной степени повлияло на продуктивность возделываемых сельскохозяйственных культур.

Несмотря на то, что погодные условия в отдельные периоды вегетации озимой ржи существенно отличались от среднееголетних значений и были неблагоприятны для роста и развития культуры. Гибрид КВС Винетто подтвердил свою высокую пластичность и засухоустойчивость. Благодаря быстрому развитию весной мощной корневой системы, гибридная озимая рожь мало пострадала от летней засухи и сформировала достаточно высокий урожай.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайность озимой ржи за счет плодородия среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы в блоке вспашки по годам была практически одинаковой и составила в 2022 г. – 36,6 ц/га, в 2023 г. – 36,8 ц/га (табл. 1). Внесение $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$ обеспечило увеличение урожайности зерна в среднем за 2 года на

37,0 ц/га, т. е. в 2 раза по сравнению с контролем, окупаемость 1 кг NPK составила 15,4 кг зерна. В варианте, где озимая рожь посеяна без фосфорных и калийных удобрений, двукратная некорневая обработка комплексным удобрением Адоб Профит 4–12–38 в дозе по 2 кг/га (1-я по всходам осенью, 2-я в период начала активной вегетации весной), по действию на урожайность (74,0 ц/га) была аналогичной внесению $P_{50}K_{90}$. Урожайность зерна в варианте с внесением $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$ на фоне 2-го года последействия 40 т/га подстилочного навоза КРС была такой же, как и при минеральной системе удобрения. Третья подкормка азотом в фазу флаг-лист не способствовала росту урожайности зерна озимой ржи. В варианте, где первую подкормку азотом проводили до оптимальных сроков (когда только смогли выйти в поле), урожайность зерна была такой же (75,3 ц/га), как и в варианте с подкормкой в оптимальные сроки (74,8 ц/га).

Таблица 1

Влияние удобрений и способа обработки почвы на урожайность озимой ржи на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве, 2022–2023 гг.

Вариант	Урожайность зерна, ц/га			Прибавка, ц/га	Окупаемость 1 кг NPK, кг зерна
	2022 г.	2023 г.	среднее		
Вспашка					
Без удобрений (контроль 1)	36,6	36,8	36,7	–	–
$P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	78,4	68,9	73,7	37,0	15,4
Адоб Профит 4–12–38, (2 + 2) кг/га + N_{70+30}	72,7	75,3	74,0	37,3	37,3
Послед. ПН КРС, 40 т/га + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	72,5	74,9	73,7	37,0	15,4
Посл. ПН КРС, 30 т/га + Солома + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	76,2	71,1	73,7	37,0	15,4
Солома + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	74,1	64,8	69,5	32,8	13,6
Солома + Жыцень, 3 л/га + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	75,2	65,7	70,5	33,8	14,1
Солома + $N_{15(КАС)} + P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	83,6	66,0	74,8	38,1	15,9
Солома + $N_{15(КАС)} + P_{50}K_{90} + N_{70до\ opt + 30}$	83,3	67,3	75,3	38,6	16,1
Солома + $N_{15(КАС)} + P_{50}K_{90} + N_{70+30+40}$	76,2	65,0	70,6	33,9	12,1
Солома + $N_{15(КАС)} + P_{45}^*K_{55}^* + N_{70+30}$	73,9	64,8	69,4	32,7	16,3
Дискование					
Без удобрений (контроль 2)	35,9	34,4	35,2		
$P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	76,9	71,0	74,0	38,8	16,1
Послед. ПН КРС, 40 т/га + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	75,2	73,3	74,3	39,1	16,3
Солома + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	76,7	66,6	71,7	36,5	15,2
Посл. ПН КРС, 30 т/га + Солома + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	82,3	68,0	75,2	40,0	16,6
Солома + Жыцень, 3 л/га + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	78,1	78,1	78,1	42,9	17,9
Солома + $N_{15(КАС)} + P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	76,3	72,2	74,3	39,1	16,3
<i>НСР₀₅ (удобрения)</i>	5,3	5,2			
<i>НСР₀₅ (обработка почвы)</i>	2,8	4,9			

* – дозы фосфорных и калийных удобрений рассчитаны с учетом содержания фосфора и калия в заделанной соломе.

Следует отметить, что в 2023 г. с длительным бездождным периодом и очень низкой влажностью почвы довольно продолжительный период, урожайность зерна озимой ржи имела тенденцию к снижению по сравнению с 2022 г.

В блоке дискования за счет плодородия почвы получено 35,2 ц/га зерна озимой ржи. Максимальная урожайность зерна озимой ржи в среднем за 2 года 78,1 ц/га получена в варианте с внесением $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$ по фону соломы гороха, обработанной целлюлозоразлагающим микробным удобрением Жыцень. Окупаемость 1 кг NPK составила 17,9 кг зерна.

Урожайность соломы в 2022 г. в неудобренных вариантах составила 38,4 и 36,4 ц/га, в удобренных – 74,0–84,1 ц/га при соотношении солома/зерно 1,0, в 2023 г. – 17,2 и 19,1 ц/га, 32,2–55,2 ц/га соответственно при соотношении солома/зерно 0,7.

Следует отметить особенность озимой ржи гибрид КВС Винетто: в 2023 г. с неблагоприятным режимом увлажнения урожайность зерна в среднем в блоке вспашки была на 10,0 % ниже, чем в предыдущем году, в блоке дискования – на 7,6 % ниже, в то время как урожайность соломы в неблагоприятном 2023 г. была на 40 % ниже.

В 2022 г. содержание азота в зерне озимой ржи колебалось в пределах 1,15–1,39 % в блоке вспашки и 1,31–1,44 % в блоке дискования, фосфора – 0,60–0,77 %, калия – 0,48–0,58 %, кальция – 0,03–0,04 %, магния – 0,06–0,08%, при среднем соотношении – 1:0,5:0,4:0,02:0,06. В соломе озимой ржи содержание азота было в пределах 0,37–0,60 %, фосфора – 0,19–0,33 %, калия – 1,16–1,65 %, кальция – 0,11–0,13 %, магния – 0,04–0,06 % при среднем соотношении 1:0,5:3,0:0,24:0,10.

В 2023 г. в варианте без удобрений содержалось 1,32 % азота, в удобренных вариантах – 1,54–1,71 % в блоке вспашки, в блоке дискования накопление азота в неудобренном варианте было таким же, как и в вариантах с внесением удобрений, в том числе и азотных – 1,52–1,68 %. Содержание азота в соломе озимой ржи составило 0,39–0,69 %. Содержание фосфора в зерне изменялось от 0,49 % в варианте с применением только некорневой подкормки удобрением Адоб Профит 4–12–38 до 0,77 %. Содержание фосфора в соломе было очень низким: 0,11–0,27 % при среднем 0,16 %. В целом по опыту содержание калия в зерне в сильно засушливых условиях 2023 г. было близким к содержанию фосфора и составило 0,54–0,62 %. Накопление калия в соломе составило 1,08–1,44 %. Накопление кальция в зерне озимой ржи было в пределах 0,11–0,13 %, в соломе – 0,30–0,36 %. Содержание магния в зерне составило 0,06–0,07 %, в соломе – 0,03–0,05 %.

Для оценки систем применения удобрений на дерново-подзолистой супесчаной почве рассчитаны хозяйственный и удельный выносы элементов питания с урожаем и коэффициенты их возмещения по вариантам опыта. Хозяйственный вынос в удобренных вариантах в среднем за 2 года изменялся в пределах: азота – 104–130 кг/га, фосфора – 44–59 кг/га, калия – 90–115 кг/га. В зависимости от системы удобрения удельный вынос азота изменялся от 14,5 до 17,2 кг/т, фосфора – от 5,9 до 8,1 кг/т, калия – от 12,8 до 16,0 кг/т (табл. 2).

Для расчета оптимальных доз внесения удобрений под планируемую урожайность используется метод коэффициентов возмещения выноса, т. е. компенсация выноса за счет удобрения с корректировкой на уровень содержания соответствующих элементов питания в почве. Установлено, что при возделывании озимой ржи гибрид КВС Винетто на дерново-подзолистой супесчаной почве при урожайности зерна 69,2–78,1 ц/га в зависимости от системы применения удобрений коэффициенты

возмещения удобрениями выноса азота составили 0,8–1,6, фосфора – 0,9–1,4, калия – 0,6–1,5. Это значит, что применяемые системы удобрения наряду с повышением урожайности зерна озимой ржи в основном способствовали поддержанию и повышению почвенного плодородия.

Таблица 2

Влияние удобрений на вынос и коэффициент возмещения элементов питания озимой рожью на дерново-подзолистой супесчаной почве

Вариант	Удельный вынос, кг/т			Коэффициент возмещения		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Вспашка						
Без удобрений (контроль 1)	14,4	7,7	13,4			
P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	15,4	7,0	14,2	0,9	1,0	0,9
Адоб Профит 4-12-38, (2+2) кг/га + N ₇₀₊₃₀	14,5	5,9	13,0	0,9		
Послед. ПН КРС, 40 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	15,0	6,5	12,8	0,9	1,0	1,0
Солома + Посл. ПН КРС, 30 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	15,8	6,7	14,0	1,1	1,3	1,3
Солома + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	15,4	6,9	13,0	1,2	1,4	1,5
Солома + Жыцень, 3 л/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	16,2	7,9	14,4	1,1	1,2	1,3
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	17,2	7,8	14,3	1,1	1,1	1,2
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N _{70до опт +30}	16,8	7,6	13,5	1,2	1,2	1,3
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀₊₄₀	17,0	6,9	15,3	1,6	1,3	1,2
Солома + N _{15(КАС)} + P ₄₅ *K ₅₅ * + N ₇₀₊₃₀	15,0	7,2	14,4	1,4	0,9	0,9
Дискование						
Без удобрений (контроль 2)	14,9	8,1	13,0			
P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	15,7	7,3	14,8	0,9	0,9	0,8
Послед. ПН КРС, 40 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	16,5	7,4	14,4	0,8	0,9	0,8
Солома + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	16,7	7,4	16,0	1,2	1,2	1,2
Солома + Посл. ПН КРС, 30 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	15,9	7,1	15,1	1,2	1,2	1,2
Солома + Жыцень, 3 л/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	16,3	7,2	14,7	1,1	1,2	1,2
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	16,2	7,3	14,3	1,2	1,2	1,3

* – дозы фосфорных и калийных удобрений рассчитаны с учетом содержания фосфора и калия в заделанной соломе.

Рациональность применения различных видов и доз удобрений в сельскохозяйственном производстве должна быть подтверждена не только агрономической, но и экономической эффективностью. Ее главным критерием в растениеводстве является получение максимальной урожайности при минимальных затратах. Экономическую эффективность применения удобрений оценивали такими показателями как чистый доход и рентабельность. Чистый доход на 1 га посевов рассчитывали как разность между стоимостью урожая, полученного за счет удобрений, и стоимостью затрат на удобрения и доработку урожая.

Стоимость зерна ржи, поставляемой для переработки в муку, в 2023 г. составляла 444,05 руб./т [9]. Пересчет в USD выполнен по курсу 3,27.

Установлено, что при условии реализации зерна озимой ржи для переработки в муку условный чистый доход от применения удобрений в блоке вспашки составил

200–248 USD/га при рентабельности 77–97 %, в блоке дискования – 268–302 USD/га при рентабельности 95–107 % (табл. 3). Наиболее экономически эффективной в среднем за 2 года в блоке вспашки была минеральная система удобрения, где применяли 2 некорневые подкормки Адоб Профит 4–12–38 в дозе по 2 кг/га и некорневые подкормки азотом – N₇₀₊₃₀, чистый доход составил 320 USD/га при рентабельности применения удобрений 171 %, однако при данной системе удобрения отмечается истощение почвы в отношении фосфора и калия.

В блоке с дискованием максимальный чистый доход получен в варианте Солома + Жыцень, 3 л/га + N₇₀₊₃₀P₅₀K₉₀ – 302 USD/га, рентабельность – 107 %, при этом отмечены оптимальные коэффициенты возмещения выноса азота – 1,1, фосфора – 1,2, калия – 1,2.

Таблица 3

Экономическая эффективность применения удобрений под озимую рожь на дерново-подзолистой супесчаной почве

Вариант	Стоимость урожая за счет применения удобрений, USD/га	Затраты на удобрения и доработку урожая, USD/га	Условный чистый доход, USD/га	Рентабельность, %
Вспашка				
P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	502	255	247	97
Адоб Профит 4-12-38, (2+2) кг/га + N ₇₀₊₃₀	507	187	320	171
Послед. ПН КРС, 40 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	503	255	248	97
Солома + Посл. ПН КРС, 30 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	502	255	247	97
Солома + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	445	244	200	82
Солома + Жыцень, 3 л/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	460	259	201	77
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	526	271	255	94
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N _{70до opt +30}	509	268	241	90
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀₊₄₀	459	259	200	77
Солома + N _{15(КАС)} + P ₄₅ *K ₅₅ * + N ₇₀₊₃₀	442	229	212	93
Дискование				
P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	528	260	268	103
Послед. ПН КРС, 40 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	531	260	271	104
Солома + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	496	254	242	95
Солома + Посл. ПН КРС, 30 т/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	544	263	281	107
Солома + Жыцень, 3 л/га + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	584	282	302	107
Солома + N _{15(КАС)} + P ₅₀ K ₉₀ + N ₇₀₊₃₀	532	272	259	95

* – дозы фосфорных и калийных удобрений рассчитаны с учетом содержания фосфора и калия в заделанной соломе.

ВЫВОДЫ

1. Уровень урожайности зерна озимой ржи гибрид КВС Винетто на дерново-подзолистой супесчаной почве зависел от применяемых систем удобрения и погодных условий вегетации. За счет эффективного плодородия почвы в среднем за 2 года по вспашке получено зерна 36,7 ц/га, по дискованию – 35,2 ц/га. Погодные условия периода вегетации озимой ржи 2021–2022 гг. были более благоприятны для роста и развития и способствовали формированию урожайности зерна на 9 % выше (в среднем по вариантам), чем в 2022–2023 г., соломы на 40 % выше.

За счет применения удобрений урожайность зерна озимой ржи в среднем по опыту выросла в 2 раза по сравнению с контролем. В блоке с поверхностной обработкой почвы существенной разницы в урожайности зерна озимой ржи по сравнению с аналогичными вариантами в блоке с традиционной обработкой почвы не отмечено за исключением варианта с обработкой соломы микробным удобрением Жыцень, где урожайность в блоке дискования была на 7,6 ц/га выше, чем в блоке вспашки.

Заделка соломы без компенсирующей дозы азота как при традиционной, так и при поверхностной обработке почвы не оказала негативного влияния на равномерность всходов и развитие растений озимой ржи в осенний период на дерново-подзолистой супесчаной почве.

2. Применяемые системы удобрения обеспечили рост урожайности зерна в среднем за два года по вспашке от 36,7 ц/га до 70,5–75,3 ц/га, т. е. на 92–105 %, условный чистый доход за счет применения удобрений составил 200–320 USD/га, рентабельность – 77–171 %, по дискованию – от 35,2 ц/га до 74,0–78,1 ц/га (на 110–121 %), условный чистый доход за счет применения удобрений составил 242–302 USD/га, рентабельность – 95–107 %.

Наиболее агроэкономически эффективной в опыте была система удобрения, включающая внесение $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$ на фоне соломы, обработанной микробиологическим удобрением Жыцень в дозе 3 л/га, в блоке с дискованием в один след в качестве основной обработки почвы: урожайность зерна озимой ржи составила 78,1 ц/га, коэффициенты возмещения выноса элементов питания урожаем составили: N – 1,1, P_2O_5 – 1,2, K_2O – 1,2, условный чистый доход – 302 USD/га, рентабельность применения удобрений – 107 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистический ежегодник, 2020 / Нац. статистический комитет Респ. Беларусь; редкол. И. В. Медведева [и др.]. – Минск, 2020. – С. 222–228.
2. Беларусь в цифрах: статистический справочник / Нац. статистический комитет Респ. Беларусь; редкол. И. В. Медведева [и др.]. – Минск, 2021. – С. 36–38.
3. Статистический ежегодник, 2022 / Нац. статистический комитет Респ. Беларусь; редкол. И. В. Медведева [и др.]. – Минск, 2022. – С. 198–204.
4. Статистический ежегодник, 2023 / Нац. статистический комитет Респ. Беларусь; редкол. И. В. Медведева [и др.]. – Минск, 2023. – С. 192–198.
5. Петрович, Э. А. Ржаное поле Беларуси: тенденции и перспективы развития / Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 4. – С. 160–164.

6. Урбан, Э. П. Устойчива к любым экономическим рискам / Э. П. Урбан // Сельская газета. – 18.12.2018.
7. Кадыров, Р. Гибридная рожь – высокий урожай на каждом поле! / Р. Кадыров // Зямля і людзі. – 13.09.2017.
8. Методика определения агрономической и экономической эффективности минеральных и органических удобрений / И. М. Богдевич [и др.]; РУП «Институт почвоведения и агрохимии». – Минск, 2010. – 24 с.
9. Об установлении фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2023 года, закупаемую для государственных нужд [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://mshp.gov.by/uploads/Files/prices/postanovlenie2023.33.pdf>. – Дата доступа 01.12.2023.

THE EFFECT OF FERTILIZERS ON THE YIELD OF HYBRID WINTER RYE ON SOD-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL

T. M. Seraya, E. N. Bahatyrova, T. M. Kirdun, A. L. Novik,
Y. A. Simankova, M. M. Torchilo, N. Yu. Zhabrovskaya

Summary

On sod-podzolic sandy loam soil, due to effective fertility, in an average of 2 years, winter rye grain hybrid KVS Vinetto 36,7 c/ha was obtained by plowing, 35,2 c/ha by disking. In the dry year 2023, grain yields were 9 % lower, and straw yields were 40 % lower than in 2022. Due to the use of fertilizers, the yield of winter rye grain on average increased by 2 times compared to the control. In the block with surface tillage, there was no significant difference in the yield of winter rye grain compared with similar variants in the block with traditional tillage, with the exception of the variant with straw treatment with microbial fertilizer Zhytsen, where the yield in the disking block was 7.6 c/ha higher than in the plowing block.

The sealing of straw without a compensating dose of nitrogen, both in traditional and surface tillage, did not have a negative effect on the uniformity of seedlings and the development of winter rye plants in the autumn period on sod-podzolic sandy loam soil.

Поступила 23.04.24

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕРО- И МАГНИЙСОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ ПОД ОЗИМЫЕ ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ СЕРОЙ И МАГНИЕМ

**И. С. Станилевич, И. М. Богдевич, Ю. В. Путятин,
В. А. Довнар, Е. С. Третьяков**

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Среди наиболее необходимых элементов, играющих жизненно важную роль в питании сельскохозяйственных культур, сера (S) занимает особое место. Сера принимает участие в важнейших физиологических процессах таких, как фотосинтез и дыхание, углеводный обмен, первичная ассимиляция азота, образование пигментов (хлорофилла и каротиноидов), синтез некоторых витаминов, ферментов, эфирных масел, ряда макроэргических компонентов, является неотъемлемой частью белковой молекулы, содержится в таких аминокислотах, как цистеин, цистин и метионин, витаминах В (тиамин), Н (биотин) [1–5]. В питании растений между азотом и серой существует тесная взаимосвязь. При недостаточном поступлении серы в растения, менее 1:16 по отношению к азоту, тормозится синтез белка и идет накопление нитратов. Одновременный недостаток этих элементов зачастую лимитирует урожайность сельскохозяйственных культур [1, 3, 5]. Питание растений серой в определенной степени может зависеть от содержания магния в почве. Повышенная концентрация магния в почвенном растворе может снижать доступность серы растениям.

Значение магния в питании растений характеризуется тем, что он входит в состав зеленого пигмента листьев хлорофилла и участвует в процессе фотосинтеза [6, 7]. В хлорофилле содержится 2,7 % (по весу) магния, что составляет около 10–30 % общего его содержания в зеленых частях растений. Остальное количество нужно для построения клеток и протоплазмы, регулирования нормального протекания биологических процессов в протоплазме [6, 8]. Магний – полифункциональный элемент питания, так как он выполняет структурообразующую роль, входя в состав органелл, клеток, мембран, клеточных стенок, и выполняет важную функциональную роль в составе около 300 ферментов. Связь этого элемента с деятельностью ферментов в значительной степени определяет его участие в обмене веществ в растениях и в биохимических процессах [9–10]. Недостаток или избыток магния в питательной среде приводит к нарушению биохимических процессов в растениях, тем самым ограничивая урожайность сельскохозяйственных культур и снижая качество продукции [9, 11, 12].

Содержание подвижной серы в дерново-подзолистых почвах колеблется в больших пределах и связано, в основном, с содержанием органических веществ, на

долю которых приходится 70–90 % валового запаса серы. Количество доступных для растений сульфатов зависит от темпов минерализации гумуса, поступления серы с навозом, минеральными удобрениями и осадками. Сокращение поступления серы с осадками, органическими и минеральными удобрениями содержащими серу, привело к снижению запаса этого элемента в почве наполовину. В настоящее время средневзвешенное содержание сульфатной серы в почвах пахотных земель Беларуси составляет 5,85 мг/кг почвы. Недостаток серы не только снижает урожайность и качество растениеводческой продукции, но и уменьшает эффективность использования азота из удобрений растениями.

В связи с использованием для известкования кислых почв доломитовой муки, где содержание MgO около 20 %, наблюдалось долговременное повышение содержания в почве обменных форм магния [13]. За последние 8 лет поддерживаемое известкование проводилось недостаточно на 50–60 % от потребности. Поэтому обозначилось небольшое снижение средневзвешенного содержания обменного магния на пахотных землях на 17 мг, на луговых землях – на 19 мг/кг почвы. В настоящее время средневзвешенное содержание магния составляет в почвах пахотных земель Mg 145 (MgO 242) мг/кг, луговых – 163 (MgO 265) мг/кг. Доля почв с низким содержанием элемента – 5,3 %. Оптимальная и высокая обеспеченность почв магнием наблюдается на 80 % площади пахотных земель и 89,8 % площади луговых земель [14]. Поскольку содержание обменного магния сильно различается по отдельным полям и участкам, на значительной части пахотных земель нарушено соотношение катионов $Ca^{2+} : Mg^{2+}$ и $K^{+} : Mg^{2+}$, и возделываемые культуры испытывают недостаток или избыток магния для формирования урожайности [15]. Актуальность исследований обусловлена большим диапазоном различий концентрации магния в почвах.

Цель исследований – оценка обеспеченности пахотных земель Беларуси подвижной серой с учётом отзывчивости зерновых культур на серо- и магниесодержащие удобрения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы агрохимического обследования почв за 14 тур (2017–2020 гг.) представлены областными проектно-изыскательскими станциями химизации сельского хозяйства, верифицированы и систематизированы в республиканской электронной базе данных.

В стационарном полевом опыте в ОАО «Гастелловское» Минского района на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с контрастными уровнями содержания обменного магния проводились исследования в 2020–2023 гг. Исследовали действие серосодержащего удобрения (сульфата аммония) и некорневых подкормок сульфатом магния на урожайность озимых зерновых культур (озимое тритикале и озимая пшеница).

Агрохимические показатели пахотного горизонта почвы были следующими: содержание гумуса (по Тюрину) – 1,8–2,1 %, pH_{KCl} – 5,8–6,0, P_2O_5 (0,2 М HCl) – 530–570 мг/кг почвы, K_2O (0,2 М HCl) – 310–345 мг/кг, Ca (1 М KCl) – 805–1160, Mg (1М KCl) – 45–240 мг/кг, подвижных форм серы – 7–10 мг/кг.

Опыт заложен в двух полях, на каждом из которых создано четыре уровня обеспеченности почвы обменным Mg, которые отражают диапазон различий по

содержанию магния в дерново-подзолистых суглинистых почвах Беларуси (табл. 1). Содержание катионов (Mg, K, Ca) и их соотношения типичны для среднекультуренных дерново-подзолистых пахотных почв.

Высокие уровни содержания обменного Mg на делянке создавались путем внесения быстродействующего удобрения – сульфата магния ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Значения 4-х уровней содержания обменного магния определены после агрохимического анализа почвы со всех делянок. С целью выравнивания обменной кислотности, значений pH_{KCl} , поделяночно внесен мел.

Таблица 1

Содержание и соотношение катионов (Ca, Mg, K) в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве опытных полей в ОАО «Гастелловское» (2020–2023 гг.)

Уровень Mg в почве	Содержание в почве катионов, мг·кг ⁻¹			Эквивалентное соотношение катионов	
	Mg	K	Ca	Ca : Mg	K : Mg
2020 г. (Поле № 1)					
I	45	310	1150	15,3	2,1
II	115	315	1057	5,5	0,8
III	160	345	955	3,6	0,6
IV	230	325	840	2,2	0,4
2021 г. (Поле № 2)					
I	53	315	1160	13,2	1,8
II	120	310	1032	5,2	0,8
III	165	335	935	3,6	0,6
IV	240	320	860	2,2	0,4
2022 г. (Поле № 1)					
I	50	327	1010	13,2	1,8
II	110	342	920	5,2	0,8
III	175	370	855	3,6	0,6
IV	225	361	805	2,2	0,4
2023 г. (Поле № 2)					
I	55	394	1135	12,6	2,3
II	120	374	1040	5,2	0,9
III	165	360	930	3,4	0,7
IV	235	345	850	2,2	0,4

Минеральные удобрения под озимые тритикале и пшеницу вносились под предпосевную обработку почвы в виде карбамида, калия хлористого, аммонизированного суперфосфата и сульфата аммония, согласно схеме опыта. Проведена подкормка азотными удобрениями весной в начале активной вегетации. Некорневые подкормки 4%-ым раствором сульфата магния в дозах $Mg_1S_{1,3}$ и $Mg_{1,5}S_2$ на растениях проведены в начале фазы удлинения стебля до отбора растительных образцов.

Закладка опыта, наблюдения, учет урожайности, анализы почвы и растений проведены по соответствующим ГОСТ, ОСТ и методическим указаниям. Статистическая обработка результатов исследований – по Б. А. Доспехову с использованием соответствующих программ дисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение серо- и магнийсодержащих удобрений оказывало существенное влияние на формирование урожайности зерна озимых зерновых культур (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

Урожайность зерна озимых зерновых культур в зависимости от содержания обменного магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и удобрений

Вариант	Урожайность зерна, ц/га			
	Уровни содержания Mg, мг/кг почвы			
	I	II	III	IV
Озимое тритикале (в среднем за 2020–2021 гг.)				
Контроль	51,9	54,3	58,6	51,7
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ – фон	61,7	66,4	68,3	62,6
Фон + Mg _{1,5} S ₂	67,9	71,1	70,7	63,2
Фон + S ₆₀	67,2	70,9	70,6	63,2
Фон + S ₆₀ + Mg _{1,5} S ₂	68,8	71,6	71,0	62,9
НСР ₀₅ варианты 2,30 уровни 1,67				
Озимая пшеница (в среднем за 2022–2023 гг.)				
Контроль	33,6	36,8	41,9	29,1
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ – фон	53,2	59,9	62,9	53,8
Фон + Mg _{1,5} S ₂	60,7	65,7	66,2	53,2
Фон + S ₆₀	60,8	66,4	66,7	54,1
Фон + S ₆₀ + Mg _{1,5} S ₂	61,8	67,0	67,0	53,2
НСР ₀₅ варианты 2,42 уровни 1,73				

Внесение серы в виде сульфата аммония сопровождалось повышением урожайности исследуемых культур. Наибольшие прибавки получены на первых двух уровнях содержания в почве магния, они составили на озимом тритикале 5,5 и 4,5 ц/га, на озимой пшенице – 7,6 и 6,5 ц/га соответственно.

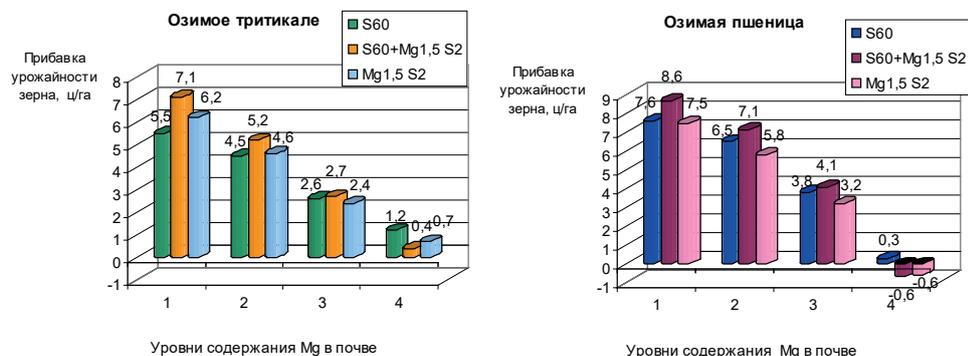


Рис. 1. Прибавки урожайности зерна озимого тритикале и озимой пшеницы от внесения серы и некорневых подкормок сульфатом магния на разных уровнях обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием (1 – Mg в почве 45–53 мг/кг, 2 – 115–120 мг/кг, 3 – 160–165 мг/кг, 4 – 230–240 мг/кг)

Прибавки урожайности зерна от некорневых подкормок раствором сульфата магния были высокими на низком и среднем уровнях содержания обменного магния (Mg 45–120 мг/кг почвы) и подтвердили недостаток магния для питания растений. На повышенном уровне, при содержании Mg 160–165 мг/кг почвы прибавки урожайности зерна были невысокими, но ещё достоверными. Некорневые подкормки сульфатом магния на высоком уровне обеспеченности почвы обменным магнием > 165 мг Mg на кг почвы, равно как и внесение серы в виде сульфата аммония в почву, были неэффективны. Применение некорневой подкормки сульфатом магния в дозе Mg 1,5 кг/га одновременно обеспечивает растения серой в дозе 2,0 кг S на га и прибавку урожайности зерна, соизмеримую с действием дозы S 60 кг/га, при внесении в почву сульфата аммония. Сочетание некорневой подкормки сульфатом магния с внесением S 60 кг/га в почву незначительно повышало прибавку урожайности зерна и не имело статистически значимого преимущества перед одной, непосредственной некорневой подкормкой раствором сульфата магния в дозе Mg_{1,5} S_{2,0}. По мере повышения обеспеченности почвы обменным магнием эффективность внесения серо- и магниесодержащих удобрений снижалась.

Основным критерием целесообразности применения сульфата магния в качестве серосодержащего удобрения является обеспеченность почвы доступными соединениями серы. В первую очередь сульфат магния следует применять на почвах с низким содержанием серы (менее 6 мг/кг в 1,0н KCl вытяжке), которые по республике занимают 66,7 % площади, затем на среднеобеспеченных (6–12 мг/кг) – 25,8 %. Гродненская и Минская области характеризуются высокой долей площади почв с низким содержанием серы 79,5 % и 71,2 % соответственно. Доля высокообеспеченных почв серой (выше 12 мг/кг) незначительна и составляет 7,5 %. Средневзвешенное содержание подвижной серы в пахотных землях в целом по Беларуси низкое и составляет 5,85 мг/кг почвы (табл. 3). Содержание подвижной серы в почвах Витебской и Гомельской областей не определялось.

Таблица 3

Распределение площади пахотных почв Беларуси по группам содержания подвижной серы

Область	Площадь, га	По группам содержания S, мг/кг, %				Средневзвешенное содержание S, мг/кг почвы
		< 6,0	6,1–12,0	12,1–18,0	> 18,0	
Брестская	724681	47,3	40,8	11,8	0,1	7,0
Гродненская	753042	79,5	18,1	1,5	0,9	5,1
Минская	1050552	71,2	24,0	3,5	1,3	5,1
Могилёвская	780537	66,5	21,9	8,2	3,4	5,7
Беларусь	3308812	66,7	25,8	6,0	1,5	5,8

Обеспеченность пахотных почв доступной растениям серой заметно различается по районам. В Брестской области большинство районов характеризуется средним содержанием подвижной серы в почве от 6 до 10 мг/кг. Средневзвешенное значение по области составляет 7,0 мг/кг почвы. К группе почв с низким содержанием серы менее 6,0 мг/кг относится 5 районов, средневзвешенный показатель в которых составляет: Ганцевичский (5,4 мг/кг), Дрогичинский (4,9 мг/кг), Жабинковский (4,3 мг/кг), Ивановский (5,8 мг/кг), Кобринский (5,5 мг/кг). Доля почв с низким содержанием серы по области составляет 47,3 %, различаясь по районам

от 15,1–17,1 % в Столинском и Пинском районах до 80,4–82,3 % в Жабинковском и Дрогиченском районах (рис. 2, табл. 4).

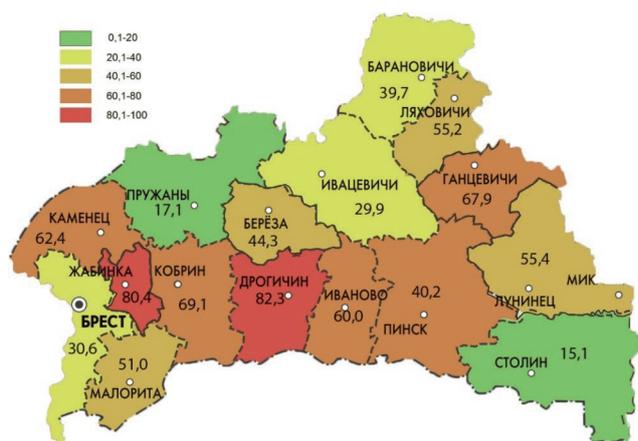


Рис. 2. Распределение доли площади пашни с низким содержанием подвижной серы менее 6 мг/кг почвы по районам Брестской области, %

Таблица 4

Распределение площади пахотных почв Брестской области по группам содержания серы, %

Район	Площадь, га	По группам содержания S, мг/кг, %				Средневзвешенное содержание S, мг/кг почвы
		< 6,0	6,1–12,0	12,1–18,0	> 18,0	
Барановичский	73862	39,7	54,2	6,0	0,1	7,2
Березовский	38341	44,3	47,1	8,6	–	7,0
Брестский	38466	30,6	58,7	10,7	–	7,9
Ганцевичский	19160	67,9	27,9	4,2	–	5,4
Дрогичинский	39205	82,3	14,4	3,3	–	4,9
Жабинковский	27857	80,4	16,0	2,8	0,8	4,3
Ивановский	44873	60,0	37,8	2,1	0,1	5,8
Ивацевичский	52631	29,9	48,6	21,4	0,1	7,9
Каменецкий	60219	62,4	31,3	6,3	–	6,6
Кобринский	54918	69,1	24,2	6,6	0,1	5,5
Лунинецкий	41342	55,4	34,9	9,6	0,1	6,3
Ляховичский	35792	55,2	32,9	11,8	0,1	6,9
Малоритский	27012	51,0	37,4	11,5	0,1	7,0
Пинский	59955	40,2	42,8	16,8	0,2	7,5
Пружанский	71064	17,1	58,4	24,4	0,1	9,2
Столинский	39986	15,1	52,5	31,6	0,8	10,0
Итого	724681	47,3	40,8	11,8	0,1	7,0

В Гродненской области преобладают почвы с низким содержанием серы, доля которых составляет 79,5 % от общей площади пахотных земель. Более 80 % площади пахотных земель с низким содержанием подвижной серы характерно для Волковысского (84,1 %), Дятловского (93,6 %), Зельвенского (87,7 %), Ивьевского

(82,0 %), Кореличского (86,9 %), Лидского (91,3 %), Новогрудского (84,2 %), Слонимского (85,7 %) и Сморгонского (85,7 %) районов (рис. 3, табл. 5). Очевидно, что здесь эффективным приемом будет проведение некорневой подкормки сульфатом магния на посевах озимых зерновых культур, так как практически повсеместно наблюдается острый дефицит серы в почве.

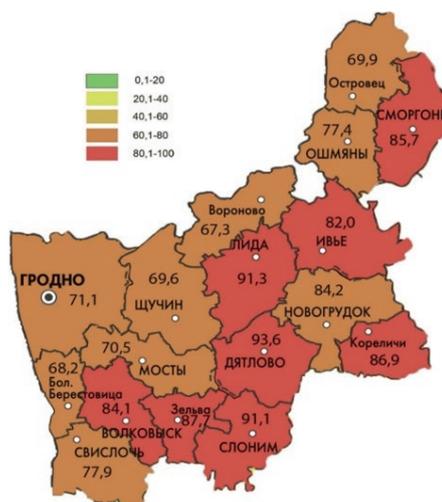


Рис. 3. Доля площади пашни с содержанием подвижной серы менее 6 мг/кг почвы по районам Гродненской области, %

Таблица 5

Распределение пахотных почв Гродненской области по группам содержания подвижной серы, %

Район	Площадь, га	По группам содержания S, мг/кг, %				Средневзвешенное содержание S, мг/кг почвы
		< 6,0	6,1–12,0	12,1–18,0	> 18,0	
Берестовицкий	35087	68,2	29,9	1,0	0,9	6,1
Волковысский	57378	84,1	15,0	0,4	0,5	4,9
Вороновский	50895	67,3	26,8	2,5	3,4	6,9
Гродненский	76786	71,7	26,9	0,6	0,8	6,1
Дятловский	35404	93,6	5,8	0,3	0,3	3,9
Зельвенский	39247	87,7	10,2	1,5	0,6	4,2
Ивьевский	39988	82,0	16,5	0,7	0,8	5,3
Кореличский	42578	86,9	10,2	2,2	0,7	4,4
Лидский	45355	91,3	7,5	1,1	0,1	3,9
Мостовский	38887	70,5	26,6	1,9	1,0	5,6
Новогрудский	41377	84,2	13,3	1,6	0,9	4,2
Островецкий	33619	69,9	27,5	2,1	0,5	5,4
Ошмянский	34519	77,4	20,1	1,7	0,8	5,2
Свислочский	38543	77,9	19,2	1,7	1,2	5,6
Слонимский	48756	91,1	6,7	0,9	1,3	4,1
Сморгонский	36636	85,7	11,6	1,8	0,9	4,3
Щучинский	57988	69,6	26,4	3,0	1,0	5,3
Итого	753042	79,5	18,1	1,5	0,9	5,1

Средневзвешенное содержание подвижной серы в почвах пахотных земель Минской области также низкое и составляет 5,1 мг/кг. Только в двух районах этот показатель незначительно превышает 6 мг/кг в Копыльском (6,5 мг/кг) и Несвижском районе (6,6 мг/кг). Доля площади почв с низким содержанием серы по области составляет 71,2 %, различаясь от 49,4 % в Копыльском районе до 93,9 % в Мядельском. Доля пахотных земель с повышенным и высоким содержанием серы более 12 мг/кг почвы незначительна и занимает 4,8 % площади (рис. 4, табл. 6).

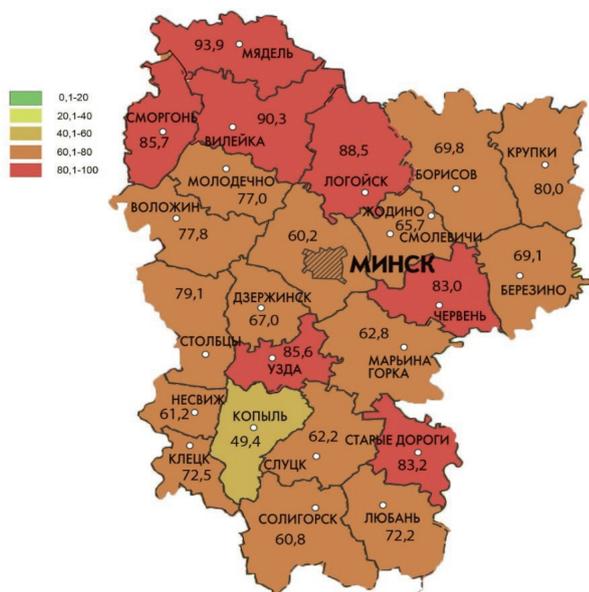


Рис. 4. Доля площади пашни с содержанием подвижной серы менее 6 мг/кг почвы по районам Минской области, %

Таблица 6

Распределение площади пахотных почв Минской области по группам содержания подвижной серы, %

Район	Площадь, га	По группам содержания S, мг/кг, %				Средневзвешенное содержание S, мг/кг почвы
		< 6,0	6,1–12,0	12,1–18,0	> 18,0	
Березинский	44984	69,1	28,2	2,4	0,3	5,0
Борисовский	52324	69,8	26,1	4,0	0,1	5,1
Вилейский	51322	90,3	8,3	1,1	0,3	3,4
Воложинский	53814	77,8	18,6	3,1	0,5	4,1
Дзержинский	43228	67,0	25,5	5,0	2,5	5,9
Клецкий	37731	72,5	21,6	3,6	2,3	5,4
Копыльский	78081	49,4	43,4	6,0	1,2	6,5
Крупский	44696	80,0	17,0	1,9	1,1	4,1
Логойский	44110	88,5	9,9	1,5	0,1	3,5
Любанский	41011	72,2	21,2	5,3	1,3	5,3
Минский	60561	60,2	33,5	5,6	0,7	5,6
Молодечненский	40671	77,0	18,2	3,6	1,2	5,0

Продолжение таблицы 6

Район	Площадь, га	По группам содержания S, мг/кг, %				Средневзвешенное содержание S, мг/кг почвы
		< 6,0	6,1–12,0	12,1–18,0	> 18,0	
Мядельский	26497	93,9	4,7	0,9	0,5	3,1
Несвижский	49755	61,2	24,9	8,6	5,3	6,6
Пуховичский	52836	62,8	34,2	1,3	1,7	5,6
Слуцкий	77937	62,2	31,7	4,3	1,8	5,7
Смолевичский	45736	65,7	31,0	3,0	0,3	5,3
Солигорский	50563	60,8	36,8	2,4	–	5,6
Стародорожский	26913	83,2	13,9	2,4	0,5	4,3
Столбцовский	48251	79,1	14,9	3,0	3,0	4,9
Узденский	31375	85,6	9,9	1,7	2,8	4,2
Червенский	48157	83,0	14,3	2,1	0,6	4,4
Итого	1050552	71,2	24,0	3,5	1,3	5,1

В Могилевской области также преобладают пахотные земли с низким содержанием подвижной серы. Средневзвешенное содержание подвижной серы в почвах различается по районам от 2,5–2,6 мг/кг в Быховском, Горецком, Дрибинском до 10,4–13,0 мг/кг в Славгородском, Осиповичском, Чериковском. Доля площади почв с низким содержанием серы в 9 районах превышает 95 % от общей площади пашни. Острый дефицит серы наблюдается в Быховском (99,1 %), Горецком (99,8 %), Дрибинском (99,1 %), Климовичском (98,5 %), Костюковичском (97,7 %), Краснопольском (95,5 %), Круглянском (99,9 %), Могилевском (96,5 %), Хотимском (99,2 %) районах Могилевской области (рис. 5, табл. 7).

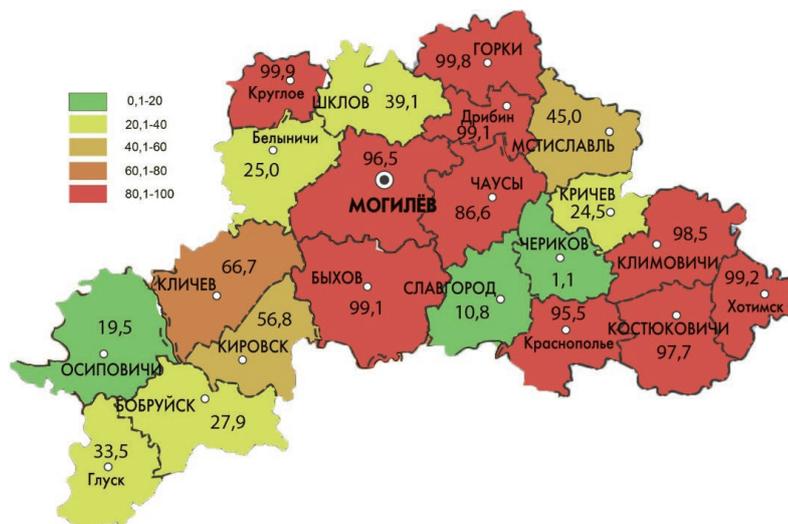


Рис. 5. Доля площади пашни с содержанием подвижной серы менее 6 мг/кг почвы по районам Могилевской области, %

Таблица 7

Распределение площади пахотных почв Могилевской области по группам содержания подвижной серы, %

Район	Площадь, га	По группам содержания S, мг/кг, %				Средневзвешенное содержание S, мг/кг почвы
		< 6,0	6,1–12,0	12,1–18,0	> 18,0	
Белыничский	36126	25,0	50,9	19,9	4,2	9,2
Бобруйский	39761	27,9	63,0	7,5	1,6	7,8
Быховский	45409	99,1	0,8	0,1		2,5
Глусский	18942	33,5	56,2	9,8	0,5	7,7
Горецкий	65267	99,8	0,2	–	–	2,6
Дрибинский	31369	99,1	0,5	0,4		2,6
Кировский	38734	56,8	23,6	8,2	11,4	7,2
Климовичский	37466	98,5	1,3	–	0,2	2,7
Кличевский	28783	66,7	28,0	3,2	2,1	5,5
Костюковичский	27550	97,7	1,6	0,7	–	3,0
Краснопольский	13312	95,5	4,2	0,3	–	2,9
Кричевский	25771	24,5	58,6	16,0	0,9	8,7
Круглянский	28313	99,9	0,1	–	–	3,3
Могилевский	76828	96,5	3,1	0,3	0,1	2,8
Мстиславский	57589	45,0	29,4	19,1	6,5	7,9
Осиповичский	23923	19,5	45,4	11,6	23,5	10,8
Славгородский	27350	10,8	60,0	22,9	6,3	10,4
Хотимский	25563	99,2	0,4	0,1	0,3	2,8
Чаусский	46402	86,6	6,1	6,5	0,8	4,7
Чериковский	21027	1,1	42,9	52,6	3,4	13,0
Шкловский	65052	39,1	36,5	14,2	10,2	8,5
Итого	780537	66,5	21,9	8,2	3,4	5,7

Для уменьшения дефицита серы необходимо использовать в качестве источника азота под посев озимых зерновых культур сульфат аммония или проводить некорневые подкормки растений раствором сульфата магния.

ВЫВОДЫ

Проведены исследования по изучению эффективности применения серо- и магнийсодержащих удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с разной обеспеченностью почвы обменным магнием в 2020–2023 гг. В модельных полевых опытах созданы четыре уровня обеспеченности дерново-подзолистых легкосуглинистых почв обменными формами Mg (1M KCl) в диапазоне от низкого 45–55 до высокого 225–240 мг/кг почвы, при соответствующем эквивалентном соотношении $Ca^{2+} : Mg^{2+}$, от 15,3 до 2,2. Другие агрохимические свойства (pH_{KCl} , содержание гумуса, подвижных форм фосфора и калия) были близки к оптимальным параметрам. Созданные уровни отражают типичный диапазон различий по содержанию обменного магния и соотношений катионов $Ca^{2+} : Mg^{2+} : K^{+}$ в дерново-подзолистых суглинистых почвах Беларуси.

При среднем содержании подвижной серы S 7–10 мг/кг почвы, на первых двух уровнях содержания обменного магния ($Mg < 120$ мг/кг почвы) получены существенные

прибавки урожайности зерна озимой пшеницы 5,8–7,5 ц/га и озимого тритикале 4,6–6,2 ц/га от некорневых подкормок растений 4%-ым раствором сульфата магния. Некорневая подкормка обеспечивает растения одновременно серой в дозе S 2 кг/га и магнием в дозе Mg 1,5 кг/га. Примерно такие же прибавки урожайности зерна 6,5–7,8 ц/га пшеницы и 4,5–5,5 ц/га тритикале получены от внесения серы в почву, S 60 кг/га, в форме сульфата азота.

По мере повышения обеспеченности почвы обменным магнием эффективность применения серо- и магниесодержащих удобрений снижалась. Некорневые подкормки сульфатом магния на высоком уровне обеспеченности почвы обменным магнием > 165 мг Mg на кг почвы, равно как и внесение серы в виде сульфата аммония в почву были неэффективны.

Основным критерием целесообразности применения некорневых подкормок посевов озимых зерновых культур раствором сульфата магния или применения других серосодержащих удобрений, является обеспеченность почвы доступными соединениями серы. В первую очередь серосодержащие удобрения следует применять на почвах с низким содержанием сульфатной серы (менее 6 мг/кг в 1,0н KCl вытяжке). Применение серосодержащих удобрений эффективно и на среднеобеспеченных серой полях и участках (S 6–12 мг/кг почвы). Однако следует исключить применение серосодержащих удобрений на почвах с высоким содержанием обменного магния, 5 и 6 группы обеспеченности (Mg > 180 мг/кг почвы). В настоящее время в каждом сельскохозяйственном предприятии Беларуси имеются актуальные материалы агрохимического обследования почв, позволяющие определить потребность в применении серосодержащих удобрений и выделить те поля и участки посевов озимых зерновых культур, где окупаемость удобрений прибавкой урожайности зерна будет наиболее высокой. В целом по Беларуси 2/3 площади пахотных почв характеризуются очень низким содержанием подвижной серы с различием по районам от 15,1 % (Столинский район) – до 99,9 % (Круглянский район).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристархов, А. Н. Агрохимия серы / А. Н. Аристархов. – М.: ВНИИА, 2007. – 272 с.
2. Панасин, В. И. Сера и урожай / В. И. Панасин, В. Д. Слобожанинова, Н. В. Лопатина. – Калининград: Изд-во «КГТ», 1990 – 150 с.
3. Нортон, Р. Значение серы в питании растений / Р. Нортон, Р. Миккелсен, Т. Дженсен; перевод с англ. В. В. Носов // Питание растений. – 2004. – № 3. – С. 2–5.
4. Ceccotti, S. Plant nutrient sulphur: a global review of crop requirements, supply and environmental impact on nutrient balance / S. Ceccotti, D. Messick // *Nrw. J. Agr. Sci.* – 1994. – P. 7–25.
5. Stewart, M. Pay attention to sulfur / M. Stewart // *Plant Nutrition Today* – 2017 Issue 2, № 2.
6. Магницкий, К. П. Магниевые удобрения / К. П. Магницкий – Москва: Государственное изд-во сельскохозяйственной литературы, 1952. – 111 с.
7. Spectrum Analytic, 2010. Magnesium Basics [Electronic resource]. – Mode of access: http://spectrumanalytic.com/support/library/ff/Mg_Basics.htm. – Date of access: 20.12.2023.

8. Богдевич, И. М. Магниевые удобрения на дерново-подзолистых почвах: аналитический обзор / И. М. Богдевич, О. Л. Ломонос; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2009. – 40 с.
9. Магниевые удобрения в интенсивном земледелии (обзорная информация) / В. В. Прокошев [и др.]. – М.: ВНИИТЭИ-Агропром, 1987. – 52 с.
10. Шкляев, Ю. Н. Магний в жизни растений / Ю. Н. Шкляев. – М.: Наука, 1981. – 95 с.
11. Кулаковская, Т. Н. Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев / Т. Н. Кулаковская. – Минск, 1978. – С. 227–232.
12. Sakmak, I. Magnesium: a forgotten element in crop production / I. Sakmak, A. M. Yazici // Better Crops. – Vol. 94 (2010, № 2). – P. 23–25.
13. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Васильюк. – Минск: БГУ, 2003. – 322 с.
14. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2017–2020 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 276 с.
15. Диагностика магниевого питания сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых суглинистых почвах / И. М. Богдевич [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграрных наук. – № 2. – 2016. – С. 34–42.

**THE YIELD RESPONSE OF WINTER CEREALS TO SULFUR
AND MAGNESIUM CONTAINING FERTILIZERS WITH REGARD
TO MOBILE SULFUR AND EXCHANGEABLE MAGNESIUM SUPPLY
OF PODZOLUVISOL LOAMY SOIL**

**I. S. Stanilevich, I. M. Bogdevitch, Yu. V. Putyatin,
V. A. Dovnar, Ye. S. Tretiakov**

Summary

The effect of S60 applied to soil as ammonium sulfate and the foliar spray of 4 % magnesium sulfate solution had been studied in the model field experiment with medium mobile S 7–10 ppm and four different levels of exchangeable Mg supply. The grain yield responses to the tested fertilizers were sufficient only on the low and medium content of Mg (45–120 ppm) in soil. Application of S60 to soil resulted with yield increase 0,76–0,65 t of wheat and 0,55–0,45 t of triticale. The same level of crop response was noted after foliar spray of magnesium sulfate: 0,75–0,58 t of wheat and 0,55–0,45 t of triticale. The assessment of mobile sulfur supply of arable soil in regions and district of Belarus has been done according to the data of 14 cycle of Soil Survey (2017–2020). In genera 2/3 of the area of arable soils in Belarus is characterized by a very low content of mobile sulfur with a difference by region from 15,1 % (Stolinsky district) to 99,9 % (Kruglyansky district).

Поступила 20.05.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ ОЗИМОГО РАПСА НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ

**Е. Г. Мезенцева, О. Г. Кулеш, А. А. Грачёва,
С. М. Зенькова, Я. С. Красноженова**

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Возделывание рапса, как наиболее приспособленной для почвенно-климатических условий нашей страны маслично-белковой культуры, способствует решению проблемы обеспечения страны растительным маслом и кормовым белком. Ежегодно посевные площади рапса составляют 400–500 тыс. га, из них озимого – 85–95 %. Потенциальная урожайность районированных сортов и гибридов достигает 50–65 ц/га маслосемян. Однако средняя урожайность культуры в Беларуси в производственных условиях остаётся невысокой – на уровне 18–19 ц/га [1, 2]. Это обусловлено не только низкой зимостойкостью озимого рапса в отдельные годы, но и несовершенной технологией его возделывания. Успешное выращивание рапса предполагает тщательное и своевременное выполнение технологических рекомендаций: дифференцированная основная обработка почвы в зависимости от предшественника; почвенных и климатических условий; рациональная система удобрения; соблюдение технологии посева высокопродуктивными сортами культуры в оптимальные сроки; интегрированная защита посевов в течении всего вегетационного периода [3–7].

Содержание подвижных соединений фосфора и калия в почве – важная характеристика ее плодородия, которая в значительной мере отображает общий уровень окультуренности. В Беларуси принятый интервал оптимальных параметров содержания подвижных фосфатов составляет 150–300 мг/кг почвы, калия – 100–300 мг/кг почвы. При этом около четверти площадей дерново-подзолистых почв характеризуются избыточным содержанием подвижных соединений фосфора [8].

Урожайность возделываемых культур до известных пределов возрастает с увеличением содержания фосфора и калия в почве, тогда как эффективность фосфорных и калийных удобрений при этом снижается. Опыт стран с развитым сельским хозяйством показывает, что на почвах высоко обеспеченных доступными для растений соединениями фосфора и калия особая роль в получении высокой урожайности и снижении себестоимости продукции, экологической безопасности отводится прежде всего оптимизации азотного питания сельскохозяйственных культур. В то же время отмечается, что применение моноазотной системы удобрения связано с неизбежным ухудшением фосфатно-калийного и гумусного состояния почвы, а совместное применение органических и минеральных удобрений оказывает благоприятное воздействие на фосфатный и калийный режим почвы [9, 10].

Цель исследований – установление наиболее эффективных агротехнологических приемов возделывания озимого рапса на дерново-подзолистой высокоокультуренной суглинистой почве.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили в 2022–2023 гг. в стационарном технологическом опыте на дерново-подзолистой высококультуренной суглинистой почве в ОАО «Гастелловское» Минского района Минской области в звене стационарного зернопропашного севооборота: кукуруза на зелёную массу (2020–2021 гг.) – яровая пшеница (2021–2022 гг.) – озимый рапс (2022–2023 гг.). Первую культуру звена севооборота (кукурузу на зелёную массу) возделывали по трём технологиям: минеральная, органоминеральная с внесением навоза, органоминеральная биологизированная с заделкой сидерата. До закладки опыта почва (Апах.) опытного участка характеризовалась следующим усредненным уровнем агрохимических показателей: рН – 6,35, содержание гумуса – 2,6 %, подвижных форм фосфатов – 709 мг/кг и калия – 279 мг/кг почвы. Почва характеризуется оптимальным для сельскохозяйственных культур уровнем кислотности и содержания калия, средним – гумуса, очень высоким – фосфора [8].

Опыт развернут в пространстве в 2 полях. Всего в опыте 15 вариантов в четырехкратной повторности. Общая площадь каждой делянки – 24 м². Соломистый навоз КРС в дозе 60 т/га и сидерат (зелёная масса редьки масличной) внесены под кукурузу.

Озимый рапс Темптейшен F1 возделывали в двух последовательно открывающихся полях. Обработка почвы включала вспашку и предпосевную культивацию на глубину 10–12 см. Минеральные удобрения в виде аммонизированного суперфосфата и хлористого калия применяли в основное внесение, кроме того, карбамид – в подкормки согласно схемам опыта (табл. 1–4) в два (при возобновлении вегетации и в фазу бутонизации) и в три срока (до посева, при возобновлении вегетации и в фазу бутонизации). Кроме того, в качестве некорневой подкормки для озимого рапса применяли микроудобрения (м/у) МикроСтим-Марганец (1 л/га) и МикроСтим Бор (1,0 л/га) – в фазу бутонизации; стимулятор роста растений (СР) Аминофол Плюс – в начале возобновления вегетации и в фазу бутонизации озимого рапса (1,0 + 1,0 л/га). Агротехника возделывания озимого рапса общепринятая в центральной зоне Беларуси для дерново-подзолистых суглинистых почв [11, 12].

Агрохимический анализ почвенных образцов включал определение: рН_{KCl} – потенциометрическим методом в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26483-85); содержания гумуса – по методу И. В. Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-84); подвижных форм Р₂О₅ и К₂О в 0,2 М вытяжке HCl – по методу А. Г. Кирсанова с последующим определением фосфора фотоколориметрическим методом, калия – методом пламенной фотометрии (ГОСТ 26207-91).

При уборке рапса с каждой делянки опытного участка отбираются растительные образцы для определения содержания сухого вещества (высушиванием в сушильном шкафу при температуре 100–105°С) и элементов питания. В растительных образцах из одной навески после мокрого озоления по методу ЦИНАО (1976) определяли: содержание общего азота – фотоколориметрически (индофенольным методом) (ГОСТ 13496.4-93), фосфора – (ванадомолибдатным методом) (ГОСТ 26657-85); калия – на атомно-абсорбционном спектрофотометре (ГОСТ 26570-95); масличность семян рапса – на инфракрасном спектрофотометре «Infraneo».

На формирование урожая культур, наряду с питанием растений, большое влияние оказывает водный и температурный режимы почв и воздуха в течение вегетационного периода растений. Как избыток, так и недостаток влаги и тепла негативно сказывается на урожае культур. Наиболее информативными величинами

для характеристики оптимального водного и теплового режимов почв и растений являются среднесуточные показатели осадков и температуры воздуха (рис. 1–2) [13].

Метеорологические условия 2022 г. в апреле-мае характеризовались высокой влажностью (осадков выпало соответственно на 184 и 34 % выше нормы) и пониженной теплообеспеченностью (среднесуточные температуры были ниже нормы на 2–3 °С) (рис. 1, 2).

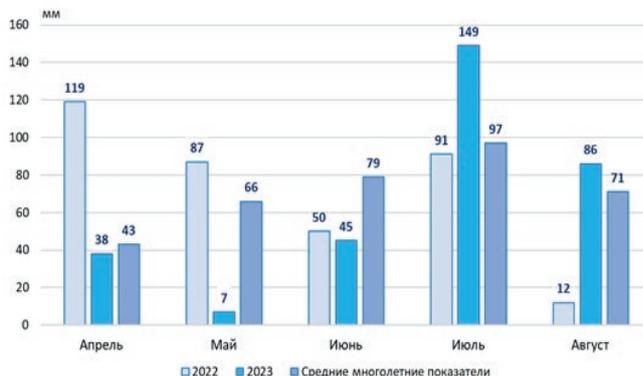


Рис. 1. Условия увлажнения вегетационных периодов

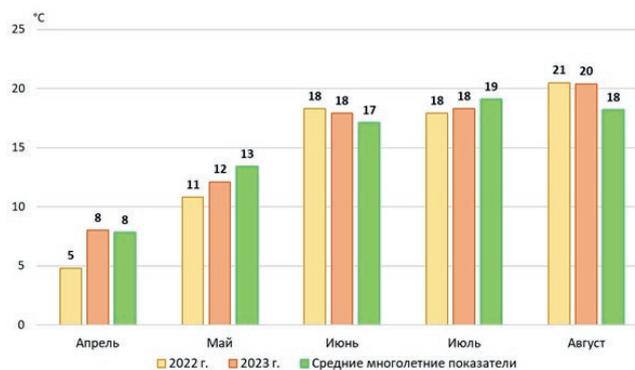


Рис. 2. Температурный режим вегетационных периодов

В дальнейшем количество осадков сократилось в июне и составило 64 % нормы, в июле – на уровне среднесуточного показателя, а в августе – 17 %. В периоды, когда отмечался дефицит осадков, устанавливалась жаркая погода. Благодаря почвенным запасам влаги, сформированным за зимний период и обильным осадкам в апреле-мае, растения озимого рапса практически не испытывали дефицита в воде в критические фазы роста и развития, что позволило получить высокий урожай маслосемян (табл. 1).

Апрель, июль и август 2023 г. характеризовались достаточным количеством выпавших осадков – 88–145 % нормы (среднесуточный показатель) на фоне благоприятных среднесуточных температур. Май был сухим и прохладным – выпало всего 10 % нормы при снижении среднесуточных температур на 1,3 °С. В июне количество выпавших осадков составило всего лишь 57 % нормы (рис. 1, 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сложившиеся погодные условия оказали определённое влияние на уровень сформированного урожая маслосемян. В условиях 2023 г. полученная урожайность семян озимого рапса по опыту была ниже в 1,6 раза (табл. 1), соломы – в 2,7 раза по отношению к предыдущему году исследования.

Таблица 1

Эффективность систем удобрения при возделывании озимого рапса на дерново-подзолистой суглинистой почве

Вариант	Урожайность маслосемян (11 % вл.), ц/га			Прибавка к фону, ц/га маслосемян	Урожайность соломы (16 % вл.), 2022–2023 гг.	Оплата 1 кг N/P/K урожаем маслосемян, ц
	2022 г.	2023 г.	среднее			
1. Без удобрений – Фон 1	26,6	14,4	20,5	–	19,0	–
2. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	37,0	29,0	33,0	12,5	28,5	4,2
3. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	37,3	26,9	32,1	11,6	29,4	3,9
4. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	39,4	25,6	32,5	12,0	32,1	4,0
5. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	35,0	20,0	27,5	7,0	31,0	3,9
6. Подстилочный навоз (2-й год последействия) – Фон 2						
7. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у	44,1	31,8	38,0	11,8	39,1	4,4
8. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	47,1	30,6	38,9	12,7	39,6	4,7
9. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	44,0	30,3	37,2	11,0	41,8	4,1
10. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	39,9	24,4	32,2	6,0	42,7	3,4
11. Сидераты (2-й год последействия) – Фон 3						
12. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	37,8	25,7	31,8	12,0	28,1	4,0
13. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	39,1	27,5	33,3	13,5	27,6	4,5
14. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	36,6	24,5	30,6	10,8	29,3	3,6
15. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	35,9	20,3	28,1	8,3	31,1	4,7
Фактор А (фон) – НСР ₀₅	3,7	3,1	3,0		2,0	–
Фактор В (удобрения) – НСР ₀₅	4,2	3,4	3,4		1,7	
Взаимодействие – НСР ₀₅	F _{факт.} < F ₀₅					

* дополнительные некорневые подкормки посевов стимулятором роста растений Аминофол Плюс.

В среднем за 2 года исследований по опыту урожайность маслосемян культуры составила 19,8–38,9 ц/га, соломы – 19,0–42,7 ц/га с наибольшими значениями в вариантах с применением комплекса макро– и микроудобрений, стимулятора роста на органическом фоне с последствием навоза. В вариантах с применением полных минеральных удобрений прибавки урожая на минеральном фоне составили 11,6–12,5 ц/га, органическом фоне с последствием навоза – 11,0–12,7 ц/га, сидерата – 10,8–13,5 ц/га при окупаемости 1 кг минеральных удобрений 3,6–4,7 ц маслосемян. Некорневые обработки посевов озимого рапса стимулятором роста были малоэффективны с тенденцией роста урожая на органических фонах с последствием навоза и сидерата на 0,9–1,5 ц/га, а на минеральном фоне с тенденцией его снижения на 0,9 ц/га. Перераспределение доз и сроков азотных подкормок с $N_{30+90+60}$ на $N_{0+120+60}$ обусловило снижение урожайности маслосемян на органическом фоне с последствием навоза на 1,7 ц/га, сидерата – на 2,7 ц/га. На минеральном фоне, наоборот, дополнительно получено 0,4 ц/га маслосемян озимого рапса.

Установлено, что в среднем за 2 года исследований моноазотная система удобрения ($N_{0+120+60}$) была менее эффективной по отношению к полной на всех изучаемых фонах – недобор урожая по опыту составил 2,5–5,0 ц/га.

Максимальная урожайность маслосемян (38,9 ц/га) сформирована при комплексном применении полного минерального удобрения $N_{30+90+60}P_{20}K_{70}$, микроудобрений МикроСтим-Марганец, МикроСтим-Бор и стимулятора роста растений Аминофол Плюс при окупаемости 1 кг минеральных удобрений 4,7 ц/га маслосемян (табл. 1).

Из всего комплекса химических показателей качества семян рапса наиболее значимыми являются содержание в них масла и протеина. Исследователи отмечают, что в семенах масличных культур белки и жиры находятся в динамическом равновесии. Причем, увеличение количества масла снижает содержание белков и, наоборот [14]. В наших исследованиях семена с максимальными показателями содержания масла (49,3–49,9 %) и наименьшим – белка (17,5–19,5 %) получены в фоновых вариантах. Установлено, что накопление жира в маслосеменах не зависело от погодных условий – в среднем за 2 года исследований показатели варьировались в пределах 47,6–48,6 % (табл. 2).

В среднем за 2 года исследований наибольшее содержание белка в маслосеменах установлено при системах удобрения, применяемых на фоне последствия солоमистого навоза (20,9–21,6 %), а также на фоне последствия сидерата в вариантах с применением полной ($N_{0+120+60}P_{30}K_{90}$) и моноазотной ($N_{0+120+60}$) систем удобрения в комплексе с микроудобрениями и стимулятором роста (21,3–21,8 %).

Наибольшие значения сбора белка (7,3–7,7 ц/га), масла (16,4–16,7 ц/га) и кормовых единиц (77,5–79,3 ц/га) получены при применении полного минерального удобрения с микроудобрениями отдельно ($N_{30+90+60}P_{20}K_{70}$ + м/у) и при дополнительном использовании стимулятора роста растений на органическом фоне с последствием соломистого навоза.

Комплексное применение полного минерального удобрения в дозе $N_{30+90+60}P_{20}K_{70}$ в сочетании с микроудобрениями МикроСтим-Марганец, МикроСтим-Бор и стимулятора роста растений Аминофол Плюс на фоне 2-го года последствия навоза обеспечило получение маслосемян с содержанием 21,4 % белка, 48,3 % жира при 7,4 ц/га выхода сырого белка и 79,3 ц/га выхода кормовых единиц (табл. 2).

Таблица 2

Показатели качества маслосемян озимого рапса в зависимости от системы удобрения

Вариант	Содержание, %		Выход, ц/га		
	масла	белка	масла	белка	кормовых единиц
1. Без удобрений – Фон 1	49,3	19,2	9,0	3,5	41,8
2. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	47,9	20,5	14,1	6,0	67,3
3. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	48,1	19,7	13,7	5,6	65,4
4. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	48,4	19,6	14,0	5,7	66,3
5. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	48,4	19,4	11,8	4,8	56,1
6. Подстилочный навоз (2-й год последствий) – Фон 2	49,7	19,5	11,6	4,5	53,5
7. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у	48,6	21,6	16,4	7,3	77,5
8. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	48,3	21,4	16,7	7,4	79,3
9. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	48,4	20,9	16,0	6,9	75,8
10. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	48,4	21,4	13,8	6,1	65,6
11. Сидераты (2-й год последствий) – Фон 3	49,9	17,5	8,8	3,1	40,4
12. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	47,9	20,3	13,6	5,7	64,8
13. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	47,6	20,6	14,1	6,1	67,9
14. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	47,8	21,3	13,0	5,8	62,3
15. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	47,8	21,8	12,0	5,5	57,4
Фактор А (фон) – НСР ₀₅	0,5	0,3	–		
Фактор В (удобрения) – НСР ₀₅	0,4	0,3			
Взаимодействие – НСР ₀₅	F _{факт} < F ₀₅				

* дополнительные некорневые подкормки посевов стимулятором роста растений Аминофол Плюс.

Анализ химического состава растительных образцов озимого рапса показал, что в маслосеменах содержится 2,80–3,49 % азота, 1,52–1,60 % фосфора и 0,82–0,94 % калия, в соломе – 0,61–1,06 % азота, 0,21–0,39 % фосфора и 1,54–2,20 % калия. Установлено, что применяемые системы удобрения достоверно увеличивали содержание азота в маслосеменах на органическом и сидератном фонах, а также – калия во всех вариантах на сидератном фоне. Отмечено достоверное увеличение азота, фосфора и калия в соломе озимого рапса, возделываемого в варианте и последствием солоमистого навоза, относительно неудобреного варианта и последствия сидерата (табл. 3).

Для обоснования более эффективных уровней применения удобрений и целенаправленного регулирования почвенного плодородия в современных условиях используется балансовый метод оптимальных доз минеральных удобрений, который основан на количественных нормативах общего и удельного выноса основных элементов питания с урожаем. Многочисленные исследования по изучению химического состава и уровня накопления элементов питания различными

сельскохозяйственными культурами показывают, что вынос элементов питания с единицей урожая не является величиной постоянной и изменяется в тех или иных пределах под действием удобрений, состояния почвенного плодородия, погодных условий. Выявлено, что в результате использования новых интенсивных сортов сельскохозяйственных культур, роста уровня урожайности показатели удельного выноса элементов питания в расчёте на 1 т зерна (кг/т) отличаются от установленных ранее справочных нормативов [15]. Так как нормативы выноса элементов питания используются при планировании потребности сельского хозяйства в удобрениях, определении баланса элементов питания, необходимо периодически уточнять средние показатели нормативного выноса элементов питания.

Таблица 3

**Содержание основных элементов питания в маслосеменах
и соломе озимого рапса**

Вариант	Маслосемена			Солома		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений – Фон 1	3,08	1,60	0,85	0,67	0,24	1,67
2. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	3,29	1,52	0,91	0,61	0,22	1,54
3. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	3,15	1,56	0,88	0,77	0,27	1,85
4. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	3,14	1,54	0,86	0,83	0,26	1,92
5. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	3,11	1,54	0,85	0,78	0,24	1,70
6. Подстилочный навоз (2–й год последствия) – Фон 2	3,12	1,57	0,85	0,99	0,36	2,20
7. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у	3,45	1,58	0,90	0,96	0,36	2,12
8. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	3,43	1,59	0,91	1,02	0,35	2,02
9. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	3,35	1,57	0,87	1,04	0,39	1,88
10. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	3,43	1,58	0,89	0,92	0,21	1,91
11. Сидераты (2–й год последствия) – Фон 3	2,80	1,58	0,82	0,66	0,23	1,96
12. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	3,24	1,53	0,89	0,85	0,25	1,83
13. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	3,29	1,57	0,94	0,90	0,26	1,98
14. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	3,41	1,55	0,92	1,06	0,34	1,74
15. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	3,49	1,59	0,86	0,77	0,27	1,63
Фактор А (фон) – НСР ₀₅	0,18	0,05	0,03	0,18	0,10	0,23
Фактор В (удобрения) – НСР ₀₅	0,16	0,05	0,03	0,16	F _{факт} < F ₀₅	
Взаимодействие – НСР ₀₅	F _{факт} < F ₀₅	0,12	0,07	F _{факт} < F ₀₅		

* дополнительные некорневые подкормки посевов стимулятором роста растений Амино-фол Плюс.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны показатели выноса основных элементов питания озимым рапсом. Наименьшие значения хозяйственного выноса характерны для фоновых вариантов: N – 57,5–89,2 кг/га, P₂O₅ – 30,8–42,3, K₂O – 41,3–61,6 кг/га. С повышением уровня минерального питания

вынос элементов питания растениями рапса увеличился, составив по опыту: N – 98,5–148,5 кг/га, P₂O₅ – 43,9–64,6, K₂O – 65,2–99,6 кг/га.

Согласно обобщённым справочным данным [15], с 1 т маслосемян и соответствующим количеством соломы в среднем выносятся 58 кг азота, 29 кг фосфора и 26 кг калия. В наших исследованиях удельный вынос в фоновых вариантах составил: N – 29,3–34,1 кг/га, P₂O₅ – 15,6–16,3, K₂O – 19,3–22,9 кг/га. При системе удобрения, обеспечившей в условиях года получение максимальной урожайности маслосемян (38,9 ц/га), удельный вынос составил: N – 38,4 кг/га, P₂O₅ – 16,7, K₂O – 24,3 кг/га (табл. 4).

Таблица 4

Вынос основных элементов питания озимым рапсом

Вариант	Хозяйственный вынос, кг/га			Удельный вынос, кг/т		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Без удобрений – Фон 1	65,9	32,3	41,3	31,9	15,8	19,3
2. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	112,2	50,1	64,8	33,8	15,1	19,2
3. Фон 1 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	110,2	51,3	72,1	34,0	15,9	21,8
4. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	113,8	51,2	79,5	34,6	15,7	23,0
5. Фон 1 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	98,5	43,9	65,2	34,9	15,8	22,2
6. Подстилочный навоз (2-й год последействия) – Фон 2	89,2	42,3	61,6	34,1	16,3	22,9
7. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у	146,5	63,5	99,6	38,4	16,8	25,5
8. Фон 2 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	147,9	64,6	97,1	38,4	16,7	24,3
9. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₂₀ K ₇₀ + м/у*	148,5	63,7	97,9	39,5	17,2	25,2
10. Фон 2 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	131,2	52,7	93,7	40,6	16,4	28,4
11. Сидераты (2-й год последействия) – Фон 3	57,5	30,8	45,7	29,3	15,6	21,3
12. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у	111,2	48,9	68,1	35,0	15,5	21,1
13. Фон 3 + N ₃₀₊₉₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	116,6	52,3	73,1	35,3	15,7	21,5
14. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ P ₃₀ K ₉₀ + м/у*	119,1	49,3	69,0	38,6	16,2	21,5
15. Фон 3 + N ₀₊₁₂₀₊₆₀ + м/у*	109,3	46,2	65,2	38,2	16,6	22,3

* дополнительные некорневые подкормки посевов стимулятором роста растений Аминофол Плюс.

Таким образом, наиболее эффективной при возделывании озимого рапса следует признать систему удобрения, включающую комплексное применение полного минерального удобрения в дозе N₃₀₊₉₀₊₆₀P₂₀K₇₀ в сочетании с микроудобрением МикроСтим-Марганец, МикроСтим-Бор и стимулятора роста растений Аминофол Плюс на фоне 2-го года последействия навоза. Что обеспечивает получение 38,9 ц/га маслосемян с содержанием 21,4 % белка, 48,3 % жира при 7,4 ц/га выхода сырого белка и 79,3 ц/га выхода кормовых единиц, а удельный вынос основных элементов питания составляет: N – 38,4 кг/га, P₂O₅ – 16,7, K₂O – 24,3 кг/га.

ВЫВОДЫ

Изучена эффективность различных систем удобрения озимого рапса, возделываемого на дерново-подзолистой высококультуренной почве. Выявлено, что в среднем за 2 года исследований урожайность маслосемян озимого рапса составила 19,8–38,9 ц/га, соломы – 19,0–42,7 ц/га. При исключении из системы удобрения фосфорных и калийных удобрений недобор урожая маслосемян составил 2,5–5,0 ц/га.

Наиболее эффективным является комплексное применение полного минерального удобрения $N_{30+90+60}P_{20}K_{70}$ в сочетании с микроудобрениями МикроСтим-Марганец, МикроСтим-Бор и стимулятором роста растений Аминофол Плюс на фоне 2-го года последствия соломистого навоза, обеспечившее получение 38,9 ц/га маслосемян с содержанием 21,4 % белка, 48,3 % масла при 7,4 ц/га выхода сырого белка и 79,3 ц/га выхода кормовых единиц. При такой системе удобрения каждый килограмм минеральных удобрений окупался 4,7 кг маслосемян.

На основании полученных экспериментальных данных уточнены показатели удельного выноса основных элементов питания озимым рапсом, которые в зависимости от применяемой системы удобрения и уровня урожайности составили (кг/т): N – 31,8–37,9, P_2O_5 – 15,8–16,2, K_2O – 21,2–22,9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мезенцева, Е. Г. Рапс – основная масличная культура в Республике Беларусь / Е. Г. Мезенцева // Почвоведение и агрохимия. – 2022. – № 2(69). – С. 71–83.
2. Сельское, лесное и рыбное хозяйство Беларуси. Статистический сборник [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoe-hozyaistvo>. – Дата доступа 21.03.2024 г.
3. Милащенко, Н. З. Технология выращивания и использования рапса и сурепицы / Н. З. Милащенко, В. Ф. Абрамов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 223 с.
4. Пиллюк, Я. Э. Рапс – белковый компонент концентрированных кормов / Я. Э. Пиллюк. – Земледелие и защита растений. – 2017. – № 1(110). – С. 40–42.
5. Пиллюк, Я. Э. Технология возделывания сортов озимого и ярового рапса качества «канола» на маслосемена (рекомендации) / Я. Э. Пиллюк, О. А. Пикун, В. В. Зеленьяк. – Жодино: НПЦ НАН Беларуси по земледелию. – 2010. – 42 с.
7. Шаганов, И. А. Рапсовое поле Беларуси: практ. рук. по освоению интенсивной технологии возделывания озимого рапса на маслосемена / И. А. Шаганов. – М.: Равноденствие, 2008. – 70 с.
8. Рапс и сурепица (выращивание, уборка, использование) / Д. Шпаар [и др.]. – М., 2007. – 319 с.
9. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2017–2020 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича: Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 276 с.
10. Динамика содержания фосфатов различной растворимости в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с очень высокими запасами фосфора / О. Г. Кулеш [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2020. – № 1(64). – С. 94–104.

11. Кулеш О. Г. Трансформация калийного состояния высококультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в условиях применения калий-дефицитных систем удобрения / О. Г. Кулеш, Е. Г. Мезенцева // Почвоведение и агрохимия. – 2021. – № 1(66). – С. 51–59.

12. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных, кормовых и технических растений: сборник отраслевых регламентов; под общ. ред. академиков НАН Беларуси В. Г. Гусакова и Ф. И. Привалов. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – 506 с.

13. Организационно-технологические нормативы возделывания сельскохозяйственных культур: сборник отраслевых регламентов. – Минск: Белорусская наука, 2005. – 460 с.

14. Погода и климат [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26850>. – Дата доступа: 08.11.2023.

15. Кефели, В. И. Физиология растений с основами микробиологии: уч. пособие / В. И. Кефели, О. Д. Сидоренко. – М.: Агропромиздат, 1991. – С. 186–188.

16. Справочник агрохимика / В. В. Лапа [и др.]; под ред. В. В. Лапа. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 260 с.

EFFECTIVENESS OF FERTILIZER SYSTEMS FOR WINTER RAPE ON SODD-PODZOL LOAM SOIL

**E. G. Mezentseva, O. G. Kulesh, A. A. Gracheva,
S. M. Zenkova, Y. S. Krasnozhenova**

Summary

The most effective in cultivating winter rapeseed was the use of complete mineral fertilizer $N_{30+90+60}P_{20}K_{70}$ in combination with microfertilizers MicroStim-Manganese, MicroStim-Boron and plant growth stimulator Aminofol Plus against the background of the 2nd year of aftereffect of straw manure, which ensured the production of 38,9 c/ha of oil seeds containing 21,4 % protein, 48,3 % oil with 7,4 c/ha of crude protein yield and 79,3 c/ha of feed unit yield. With such a fertilization system, each kilogram of mineral fertilizers paid for 4,7 kg of oil seeds In a technological experiment on sod-podzolic loamy soil.

The standards for the specific removal of basic nutrients by winter rapeseed have been clarified. They make up are (kg/t): N – 31,8–37,9, P_2O_5 – 15,8–16,2, K_2O – 21, 2–22,9 in depending on the fertilizer system used and the level of yield.

Поступила 25.04.24

ВЛИЯНИЯ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И РЕЖИМА МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА ПРОДУКЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС КУКУРУЗЫ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ВЫСОКОКУЛЬТУРЕННОЙ СУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ

**Е. Г. Мезенцева, О. Г. Кулеш, А. А. Грачева,
С. М. Зенькова, Я. С. Красноженова**
*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Территория Беларуси относится к зоне рискованного земледелия. Колебания урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от погодных условий являются объективной реальностью и происходят, несмотря на общий рост культуры земледелия. Экстремальные погодные условия и их влияние на растениеводство, безусловно, стали более распространенными. Наблюдаемые участвовавшие в течение вегетационного периода смены избытка и недостатка влаги, весенне-летние заморозки или высокие летние температуры, а тем более их чередование, приводят к снижению потенциальной урожайности сельскохозяйственных зерновых культур на 40–60 %, что существенно сказывается на валовых сборах и себестоимости их производства [1, 2].

Эксперты Межправительственной группы Рамочной Конвенции ООН об изменении климата заявляют, что потепление климата в Европе идет более высокими темпами, чем в среднем по миру. В Беларуси на конец XX – начало XXI века пришелся самый продолжительный период потепления за все время инструментальных наблюдений за температурой воздуха, которая за последние 25 лет превысила климатическую норму на 1,2 °С [2].

Большинство глобальных климатических моделей указывает на ожидание возрастания в будущем максимальных и минимальных значений температуры, увеличение числа жарких дней, количества интенсивных осадков и уменьшение числа дней с небольшим количеством осадков, уменьшение числа холодных дней, сокращение амплитуды суточного хода температуры. Анализ одного из сценариев ожидаемой сельскохозяйственной продуктивности показывает, что недостаточность увлажнения может значительно снизить эффект потенциального роста урожайности за счёт потепления. Предполагается, что к 2041–2060 гг. продолжительность теплого периода с положительными температурами возрастет на 35 дней и составит 280–350 дней, а в Брестской области достигнет 365 дней. Расчёты указывают на вероятное незначительное увеличение количества осадков в осенний и зимний период, однако при их неизменном количестве в весенне-летний период влагообеспеченность будет уменьшаться за счёт повышения температуры воздуха и транспирации растений. Увлажнение территории Беларуси за май–июнь

уменьшится, и примерно на трети территории гидротермический коэффициент (ГТК) составит 1,0–1,2, что характерно для засушливых и слабозасушливых условий. Это потребует определенных мероприятий для сохранения влагозапасов или подбора засухоустойчивых культур на почвах легкого гранулометрического состава. Предполагается, что в ближайшие 3 десятилетия уровень урожайности ячменя, рапса и кукурузы на песчаных почвах может снизиться по отношению к уровню 2010 года на 15–25 %, а урожайность кукурузы на северо-западе страны вырасти на 10–20 % [2–4].

Изменение климата вызывает как отрицательные, так и положительные последствия в сельскохозяйственном производстве. Отрицательные последствия связаны с более частым проявлением экстремальных и неблагоприятных гидрометеорологических условий: повышением максимальной температуры воздуха, более частой интенсивностью засух, продолжительностью периодов экстремальной жары, вероятностью заморозков в период цветения, дефицита воды в вегетационный период, роста экстремальных осадков с высокой вероятностью повреждения растений, появления новых вредителей и болезней растений. Положительный эффект заключается в большей продолжительности вегетационного периода и росте обеспеченности теплом, что может создать более благоприятные условия для выращивания ряда культур. [2–4].

В связи с улучшением теплообеспеченности и с целью уменьшения негативного влияния засушливых условий возникает целесообразность в структуре посевных площадей увеличение доли более теплолюбивых и засухоустойчивых культур. Кукуруза – универсальная зерновая культура с высоким продуктивным и адаптивным потенциалом, которая благодаря своей пластичности способна эффективно использовать почвенно-климатические факторы, хорошо отзываться прибавкой урожая на улучшение водного и пищевого режимов почвы, общего агротехнического состояния посевов. Эта культура обладает уникальным комплексом признаков, принципиально отличающим её от других растений семейства мятликовых: принадлежность к классу C4 (лучшее использование солнечной энергии), своеобразная раздельнополость, при которой мужское и женское соцветия закладываются на побегах с разной динамикой развития, широкая генетически обусловленная вариация по самым различным признакам, являющаяся резервом для адаптации культуры в большом диапазоне условий. Именно такое сочетание признаков определило в XX столетии ведущую роль кукурузы как главного источника дешевой концентрированной обменной энергии. И по этому показателю она вне конкуренции среди других полевых кормовых культур [5–8].

В последние годы благодаря подбору новых гибридов и усовершенствованным технологиям в Беларуси расширились посевные площади и повысилась урожайность кукурузы, возделываемой на зерно. В системе сортоиспытания, передовых сельхозпредприятиях и в экспериментальных опытах урожайность зерна составляет 100–120 ц/га и более при высокой рентабельности, что указывает на высокий потенциал этой культуры в производстве. Однако по стране продуктивный потенциал кукурузы реализуется менее чем наполовину – при ежегодном увеличении площадей за последние годы урожайность зерна варьировала от 43,9 до 65,3 ц/га [9] (рис. 1).

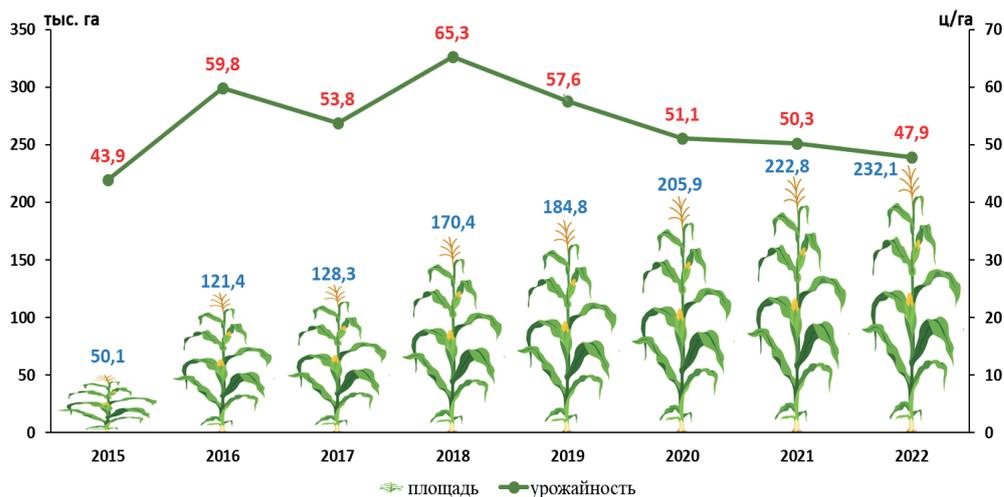


Рис. 1. Посевные площади и урожайность зерна кукурузы в сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь

Основная причина того, что в производстве реализуется лишь часть потенциальной урожайности культуры, исследователи связывают с неправильным подбором и нарушением сроков внесения гербицидов, а также с опозданием со сроками уборки, т. е. нарушением рекомендуемой технологии возделывания кукурузы. Вместе с тем, несмотря на более высокую устойчивость кукурузы к неблагоприятным погодным условиям (стрессорам), по сравнению с менее засухоустойчивыми и теплолюбивыми культурами, погодные условия оказывают существенное влияние на интенсивность роста, развитие и формирование урожая, в отдельные годы даже превышающие значимость технологии [8].

Колебания урожайности кукурузы по годам в значительной степени обусловлены лимитирующими факторами температурного режима и влагообеспеченности. Данные белорусских учёных показывают, что в центральной зоне Беларуси, если кукуруза размещается на легкосуглинистой почве, урожайность зависит в большей степени от теплообеспеченности, чем от количества осадков в критический период, а в южной зоне, когда кукуруза размещается на супесчаной, подстилаемой песками почве, наоборот. При недостатке тепла в период вегетации к уборке резко снижается процент початков полной спелости, уменьшается индивидуальная продуктивность початка и урожайность зерна. Урожайность кукурузы на легких по гранулометрическому составу почвах в отдельные годы при недостаточном выпадении осадков в критический период (за 10 дней до выметывания) снижается на 30–40 % [8]. Отмечено, что при одинаковом содержании элементов питания в растениях кукурузы, выращиваемых при оптимальной и недостаточной влагообеспеченности, урожай сухой надземной биомассы, вследствие дефицита влаги, уменьшался в 2,6 раза, а недостаток тепла в первый период вегетации кукурузы снижал её продуктивность в 3 раза [10, 11].

Невозможность точно спрогнозировать экстремальные погодные явления, безусловно, усложняет задачу стабильного получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур. И тем не менее справедливо будет утверждение, что необходимо приложить все усилия по управлению факторами, ограничивающими

рост и развитие растений, чтобы повысить устойчивость культур к воздействию стрессоров. По мнению ряда исследователей, экологическая устойчивость современных гибридов кукурузы значительно ниже в сравнении с сортами начала XX века, что объясняется их невысокой приспособленностью к конкретным экологическим условиям и уровню агротехники. И чем выше несоответствие условий внешней среды адаптивному потенциалу растений, и, прежде всего, их экологической устойчивости, тем большую часть продуктов ассимиляции растения расходуют не на формирование урожая, а на защитно-компенсаторные реакции [7, 12].

К настоящему времени учёными в области агрохимии разработан ряд методических рекомендаций и регламентов по возделыванию кукурузы [13–16]. Результаты многочисленных исследований показывают, что наиболее управляемым мероприятием по повышению устойчивости к неблагоприятным факторам окружающей среды как кукурузы, так и других сельскохозяйственных культур, является оптимизация минерального питания по фазам развития растений [1, 17–20]. Для управления посевами кукурузы с целью снижения негативного влияния погодных условий важно знать особенности ее роста и развития, чётко представлять потребности растений на каждом этапе онтогенеза и учитывать, какое влияние оказывают те или иные факторы внешней среды на физиологические процессы растений.

Исследования показали, что при различных складывающихся неблагоприятных факторах в критические фазы развития растений (низкие или высокие температуры, недостаток или избыток влаги, высокие кислотность и плотность почвы, слабое развитие корневой системы) элементы минерального питания почвы становятся труднодоступными для растений. Например, при затяжных весенних холодах почва становится физиологически бедной питательными веществами, молодые растения плохо усваивают фосфор. Происходит задержка в росте растений кукурузы, их листья приобретают фиолетово-пурпурную окраску. В ряде случаев, если азота в почве достаточно, листья молодых растений окрашиваются в тёмно-зелёный цвет с краевым фиолетово-пурпурным оттенком [6, 8].

При низких температурах, когда жизнедеятельность растений сильно подавлена, внесение удобрений в почву или на её поверхность существенно не улучшает питание. Учитывая высокую потребность растений в сбалансированном питании в критический период развития и сложность в усвоении необходимых элементов корневой системой в это время, даже при их наличии в почве, особое значение приобретает некорневая подкормка специальными поликомпонентными водорастворимыми комплексами. Особенность таких подкормок состоит в том, что их эффективность зависит в большей степени от температуры воздуха, а не почвы. Некорневая подкормка оказывает антистрессовый эффект, снимает кратковременный дефицит элементов питания в критические периоды роста и развития растений, повышает их способность усваивать питательные вещества из почвы и основного удобрения. При внекорневых подкормках важно наличие всех макроэлементов, так как они участвуют в основных обменных и синтетических процессах, одновременно происходящих в растительном организме и одновременно необходимых растениям, что не всегда может обеспечить корневое питание.

В определённой степени повысить устойчивость растений кукурузы к неблагоприятным факторам внешней среды можно также за счет биологического воздействия на растения. Установлено, что определенного рода ферменты принимают активное участие в регулировании многих биохимических и физиологических

процессов в растениях как в нормальных, так и при стрессовых (неблагоприятных) воздействиях, позволяют растению осуществлять реакции в значительно более широком диапазоне температур. Биологическое регулирование физиологических процессов в растениях направлено как на снижение отрицательного воздействия погодных условий, складывающихся в течение периода вегетации, так и на оптимизацию их роста и развития [6, 21–22].

Таким образом, важнейшим условием повышения эффективности сельского хозяйства является достижение его устойчивости по отношению к погодноклиматическим изменениям. Использование благоприятных последствий потепления климата возможно только в сочетании с проведением адаптационных мер, направленных на предотвращение (снижение) потерь от его негативных последствий. Повысить устойчивость кукурузы и других сельскохозяйственных растений к неблагоприятным погодным условиям возможно за счёт совершенствования технологий их возделывания. И одним из наиболее важных ее элементов является оптимизация минерального питания по основным фазам онтогенеза на основании сбалансированного применения удобрений в основное внесение и в виде внекорневых подкормок макро- и микроудобрениями в сочетании с физиологически активными веществами, регуляторами роста и пестицидами.

Необходимость поиска возможностей для снижения отрицательного влияния неблагоприятных погодных условий в критические периоды развития растений, актуализирует научные исследования в этой области.

Цель исследований – установить влияние гидротермических условий и режима минерального питания на продукционный процесс кукурузы, возделываемой на дерново-подзолистой почве суглинистой почве с высоким содержанием подвижных фосфатов и калия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые исследования проводили в стационарном опыте РУП «Институт почвоведения и агрохимии» в ОАО «Гастелловское» Минского района Минской области, заложенном в 2020 г. на дерново-подзолистой суглинистой почве.

Агрохимическая характеристика пахотного слоя (в среднем): рН – 6,2, содержание гумуса – 2,0 %, подвижных соединений фосфатов – 1076 и калия – 344, меди – 3,0, бора – 0,8, цинка – 2,9 мг/кг почвы. Согласно агрохимическим градациям почв Беларуси, по степени кислотности изучаемая почва относится к близким к нейтральным со средним содержанием гумуса, повышенным – калия, очень высоким – фосфатов [23]. Содержание меди – среднее, бора – высокое, цинка – низкое.

Опытная культура – кукуруза зернового направления F1 Фродо. Предшественник – яровая пшеница.

Опыт был развернут в пространстве в трёх полях. Схема опыта включала 10 вариантов в 4-кратной повторности. Общий размер делянки – 36,0 м² (6,0 м · 6,0 м).

Соломистый навоз в дозе 60 т/га был внесен осенью 2020, 2021 и 2022 гг. Минеральные удобрения (карбамид, аммонизированный суперфосфат и хлористый калий) применяли в основное внесение, кроме того азотные (карбамид) согласно схеме опыта – в подкормку в фазу 4–6 листьев кукурузы.

В качестве некорневой подкормки в посевах кукурузы применяли: микроудобрение МикроСтим-Цинк, Бор (м/л) – в фазу 4–6 листьев (2 л/га), органоминеральное

удобрение Форкроп Голден 10-14-4 (ОМУ) – в фазы 6–8 и 8–10 листьев (1,5 + 1,5 л/га) и регулятор роста растений Агропон С (РР) – в фазу 6–8 листьев (0,02 л/га).

Форкроп Голден 10-14-4 – жидкое органоминеральное удобрение, биостимулятор. Содержит, помимо азота, фосфора и калия также магний, марганец, бор и цинк, свободные аминокислоты растительного происхождения и специфически природные активаторы. Применение удобрения в стрессовых погодных условиях, а также в течении вегетативного роста и цветения способствует увеличению урожайности и улучшению качества продукции.

Биостимулятор растений Агропон С представляет собой прозрачный бесцветный водно-спиртовой раствор. Этот препарат биологического происхождения, содержит сбалансированный комплекс фитогормонов ауксиновой, цитокининовой природы, аминокислот, углеводов, жирных кислот, микроэлементов. Является высокоэффективным биостимулятором роста растений широкого спектра действия, продукт биотехнологического выращивания грибов-эпифитов, выделенных из корневой системы лекарственных растений. Повышает устойчивость растений к стрессовым факторам (высоким и низким температурам, засухе, фитотоксическому действию пестицидов), повышает урожай и улучшает качество растительной продукции.

Дозы удобрений под кукурузу и схема опыта представлена в таблицах 4, 5.

В ходе исследований проводили фенологические наблюдения с отметкой дат наступления фаз развития растений кукурузы: всходы, 4–6, 8–10 листьев, цветение, молочная и полная спелость зерна. В течение вегетации растений осуществлялся мониторинг за динамикой температуры воздуха и выпадением осадков.

Для оценки условий роста и развития растений использовали данные комплексного показателя влагообеспеченности по периодам вегетации условий роста и развития растений (Р), включающего суммарное водопотребление (расход) продуктивной влаги почвы и атмосферных осадков за исследуемый период.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидротермические условия вегетационных периодов в годы проведения исследований существенно различались. Так, начало вегетации кукурузы 2021 и 2022 гг. характеризовалось избыточным увлажнением (115–175 % нормы осадков) на фоне оптимальных и/или повышенных температур, сменяемых в фазу 8–10 листьев – начало цветения в течение 20 (2021 г.) – 43 (2022 г.) дней засушливыми условиями, которые вновь, вплоть до уборки урожая, сменялись обильными дождями с пониженным температурным фоном. В погодных условиях вегетации кукурузы 2023 года распределение осадков происходило кардинально наоборот: межфазные периоды посев – 8–10 листьев и молочная – полная спелость проходили в засушливых условиях с повышенными температурами воздуха, а в период 8–10 листьев – начало молочной спелости отмечалось избыточное выпадение осадков (165–192 % нормы) на фоне оптимальных или повышенных температур.

Рассмотрим более подробно сложившиеся погодные условия вегетационных периодов возделывания кукурузы.

2021 год. Кукуруза – засухоустойчивое растение и потребность во влаге у нее невысокая. В начале вегетации до образования 7–8-го листа воды потребляется мало и влаги, запасенной от осенне-зимних осадков, бывает достаточно. При минимуме осадков, но при теплой погоде культура в поисках влаги развивает мощную корневую

систему [6–8]. В условиях 2021 года количества запасов влаги (124 % нормы) к посеву кукурузы оказалось достаточным для дружных всходов и дальнейшего благоприятного развития культуры, несмотря на засушливые условия с повышенными суточными температурами в период 8–10 листьев – начало цветения культуры (табл. 1).

Таблица 1

Гидротермические условия вегетации кукурузы

Показатели	Годы	Межфазные периоды					
		посев – 5–6 листьев	5–6 – 8–10 листьев	8–10 листьев – цветение	цветение – молочная спелость	молочная – полная спелость	посев – полная спелость
Средние t за период	2021	14,3	21,9	22,0	19,3	12,1	17,9
	2022	14,8	19,3	17,3	20,7	12,1	16,8
	2023	15,0	20,6	18,3	19,8	17,4	18,2
Σ t > 10 °C (активных)	2021	465,3	349,8	549,5	426,0	403,2	2193,8
	2022	473,5	522,1	329,2	496,2	260,2	2081,2
	2023	485,0	287,9	568,3	396,1	694,5	2431,8
Сумма осадков, мм	2021	104,2	83,3	22,5	57,6	153,6	401,2
	2022	115,2	92,7	21,7	8,5	93,3	331,4
	2023	0,4	37,0	147,5	88,3	31,9	305,1
Влагообеспеченность растений (коэффициент Р)	2021	1,7 (удовл.)		2,0 (оптим.)	1,7 (удовл.)	1,3 (удовл.)	1,7 (удовл.)
	2022	1,7 (удовл.)		1,4 (удовл.)	1,7 (удовл.)	1,3 (удовл.)	1,6 (удовл.)
	2023	0,8 (низкая)		2,3 (оптим.)	1,8 (удовл.)	0,5 (низкая)	1,2 (удовл.)

Оптимальная температура со времени цветения метёлок и появления нитей на початках – 22–23 °C. Температура +25 °C и выше неблагоприятна, а при температуре более +30 °C и относительной влажности воздуха около 30 % происходит преждевременное подсыхание листьев, нарушаются нормальные процессы цветения и оплодотворения, обезвоживается пыльца, подсыхают нити початков, в результате женские цветки оплодотворяются не полностью, что приводит к череззернице [6–8]. Следует отметить, что рекордные температуры воздуха в июне–июле (более 35 °C) оказали отрицательное влияние на ожидаемую эффективность комплекса некорневых подкормок посевов.

Критический период потребности в воде начинается за 10–14 дней до образования метелки и заканчивается в середине молочной спелости зерна. В это время расходуется до 70 % воды, так как растения быстро растут в высоту, и происходит основное накопление биомассы урожая. В этот период хорошо развитые растения обеспечивают себя влагой с глубоких слоев почвы [6–8]. Обильные осадки (138–233 % к норме) и благоприятный температурный режим от фазы цветения до полной спелости культуры обусловили быстрый рост растений и интенсивное накопление биомассы, обеспечив максимальное накопление сухого вещества

к уборке за годы исследований. Коэффициент влагообеспеченности P за период вегетации варьировал от 1,3 до 2,0 и характеризует условия как удовлетворительные, близкие к оптимальным.

2022 год. Избыточное количество осадков (162 % к норме) в начальный период роста растений ингибировало их развитие и растянуло сроки прохождения фазы посев 8–10 листьев на 64 дня, тогда как в 2021 г. этот период длился 50 дней, а в 2023 г. – 47 дней (табл. 2).

Таблица 2

Длительность прохождения отдельных фаз роста и развития кукурузы, сутки

Межфазный период	Годы		
	2021	2022	2023
Посев – 4–6 листьев	34	37	33
4–6 листьев – 8–10 листьев	16	27	14
8–10 листьев – цветение	25	20	31
Цветение – молочная спелость	22	23	20
Молочная спелость – полная спелость	43	41	40
Весь период от посева до созревания	140	148	138

Тем не менее обильные осадки (115 % нормы) в период 4–6 – 8–10 листьев и благоприятный температурный режим способствовали быстрому росту растений и интенсивному накоплению сухого вещества. Засушливые условия от фазы 8–10 листьев и вплоть до молочной спелости зерна (16–39 % к норме), благодаря хорошей влагоудерживающей способности суглинистой почвы и достаточному количеству выпавших ранее осадков, не оказали отрицательного влияния на рост и развитие растений. Коэффициент влагообеспеченности P за период вегетации варьировался от 1,3 до 1,7, что характеризует вегетационные условия как удовлетворительные (табл. 1).

2023 год. Первая половина вегетации растений кукурузы проходила в условиях недостатка влаги (1–89 % нормы) на фоне повышенных температур (15,0–20,6 °С). Обильные осадки (165–192 % к норме) и благоприятный температурный режим от фазы 8–10 листьев и до начала молочной спелости культуры способствовали быстрому росту растений и интенсивному накоплению сухой биомассы, что характеризует этот период как оптимальный ($P = 2,3$). В дальнейшем, в течение 40 дней от фазы начала молочной спелости до уборки в условиях дефицита осадков (34 % нормы) на фоне повышенных температур (+3,4 °С к норме) происходило усыхание растений кукурузы, характеризующееся потерей сухого вещества листостебельной массы. Коэффициент влагообеспеченности в этот период составил $P = 0,5$, а за весь период вегетации варьировал от 0,5 до 2,3 и характеризует вегетационные условия в целом как удовлетворительные ($P = 1,2$) (табл. 1).

Таким образом, в условиях благоприятного температурного режима вегетационного периода основным лимитирующим фактором при возделывании кукурузы в опыте явилось чередование засушливых и избыточно увлажнённых условий.

Одним из основных показателей фотосинтетической деятельности растений считается накопление сухого вещества. В своих исследованиях Д. В. Ефанов отмечал, что продолжительность периода формирования зерна и скорость накопления сухого вещества зависит от сортовых особенностей и реакции гибрида

на складывающиеся агроклиматические условия [17]. В наших исследованиях скорость формирования сухого вещества кукурузы зависела от складывающихся погодных условий в основные фазы вегетации кукурузы с учетом биологических особенностей культуры. Так, в начальный период образования и роста вегетативных органов в условиях дефицита осадков в 2023 г., среднесуточная скорость образования сухого вещества на гектар была максимальной (1,33 кг – 99 ц), а длительность прохождения периода – минимальной (47 дней) (табл. 3).

Таблица 3

Динамика накопления сухого вещества, кг/га/сутки

Год	Межфазные периоды				
	посев – 4–6 листьев	4–6 листьев– 8–10 листьев	8–10 листьев – цветение	цветение – молочная спелость	молочная – полная спелость
2021	1,27	63	309	367	261
2022	0,65	78	252	407	140
2023	1,33	99	185	412	–90

В дальнейшем в условиях избытка осадков (165 % нормы) развитие растений до начала цветения было более растянутым, среднесуточная скорость накопления сухой биомассы хотя и возросла почти в 2 раза, но была ниже относительно показателей предшествующих лет исследования. Растения кукурузы в условиях дефицита осадков в этот период на фоне благоприятных температур в 2021 и 2022 гг. эффективно использовали продуктивные влагозапасы, скорость формирования сухого вещества возросла в 3–5 раз к предыдущему периоду (табл. 3).

В межфазный период цветение–молочная спелость скорость формирования сухой биомассы возросла в 1,2–2,2 раза с максимальным значением в 2023 г., когда избыточное количество осадков (192 % нормы) на фоне повышенных температур обусловило быстрый рост растений (табл. 3).

Вследствие особенностей роста и развития кукуруза предъявляет определенные требования к обеспечению питательными веществами. В начальный период, до образования первого надземного стеблевого узла, кукуруза растёт очень медленно, кроме того, сказывается стрессовое воздействие гербицидов на молодое растение. Потребление питательных элементов слаборазвитой корневой системой невысокое. Однако недостаток и несбалансированность элементов питания в этот период (от 3-х до 5–7 листьев) впоследствии невосполним, так как именно в это время формируются генеративные органы, определяющие урожайность [6–8]. В условиях складывающихся гидротермических факторов применение удобрений оказало определенное влияние на скорость накопления сухой биомассы. От полных всходов до фазы 5–6 листьев во все годы исследования развитие растений в вариантах с применением удобрений проходило равномерно и низкими темпами – вес сухой биомассы растений по опыту в среднем за годы исследований составил 0,35–0,42 ц/га, что в 1,5 раза выше относительно контроля (табл. 4).

Интенсивный рост и потребление питательных веществ корневой системой начинается от фазы 7–9 листьев (после того, как будут сформированы зачаточные генеративные органы), достигая максимума к моменту выбрасывания метёлок и рылец [6–8].

Таблица 4

Накопление сухого вещества растениями кукурузы по основным фазам, ц/га

Варианты опыта	4–6 листьев	8–10 листьев	Цветение	Молочная спелость	Полная спелость	Полная спелость		
	среднее за 2021–2023 гг.					2021 г.	2022 г.	2023 г.
Контроль, без удобрений	0,26	6,7	60,3	105,6	137,1	175,2	163,8	72,2
Соломистый навоз (СН), 60 т/га – Фон	0,35	14,6	73,4	132,3	176,2	253,8	185,1	89,8
Фон + N ₆₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у)'	0,40	16,2	81,5	159,0	205,9	276,2	222,9	118,7
Фон + N ₉₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у)'	0,39	19,2	82,0	166,5	219,8	288,3	242,1	129,1
Фон + N ₉₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у + РР)'	–	16,9	82,9	187,3	229,7	308,7	250,5	130,0
Фон + N ₉₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ +м/у + ОМУ)' + (ОМУ)"	–	16,4	79,3	186,6	235,0	313,7	232,3	159,1
Фон + N ₁₂₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у)'	0,41	15,5	83,7	165,6	210,3	287,6	219,0	124,0
Фон + N ₉₀ + (N ₃₀ + м/у)'	0,42	16,3	79,3	169,7	215,7	287,5	223,3	136,4
Фон + N ₉₀ + (N ₃₀ + м/у + РР)'	–	16,1	81,1	184,9	226,3	306,8	245,7	126,3
Фон + N ₉₀ + (N ₃₀ + м/у + ОМУ)' + (ОМУ)"	–	15,9	83,5	184,5	232,8	310,4	243,2	144,9
НСР ₀₅	–	0,9	4,3	9,2	9,7	34,7	10,8	12,4

' подкормка посевов кукурузы в фазу 4–6 листьев; " подкормка посевов кукурузы в фазу 8–10 листьев.

Каждый элемент системы удобрения кукурузы вносит свой вклад в формирование урожая. Наши исследования показали, что применение органического удобрения усиливало накопление сухого вещества в течение вегетации в 1,2–2,2 раза относительно контроля (табл. 4).

За счет минеральных удобрений, применяемых в комплексе с микроудобрением, скорость накопления сухой биомассы в период цветение – молочная спелость кукурузы увеличилась на 11–25 % относительно органического фона.

Эффект от однократного применения регулятора роста растений Агропон С в фазу 6–8 листьев кукурузы отмечен от фазы молочной спелости, выраженный дополнительным приростом биомассы на 5–13 %. Двукратное применение органоминерального удобрения Форкроп Голден 10-14-4 усиливало процесс накопления сухого вещества от фазы молочной спелости на 9–12 %.

Применение азотного удобрения в комплексе с микроудобрением (N₉₀₊₃₀ + м/у) по эффективности не уступало полному минеральному удобрению (N₉₀₊₃₀P₂₀K₆₀ + м/у) в течение вегетации. Так, к фазе цветения кукурузы в варианте с полной минеральной системой удобрения в комплексе с микроудобрением было сформировано 166,5 ц/га сухого вещества, а в варианте с применением только азота в сочетании с микроудобрением – 169,7 ц/га.

Максимальный по опыту суммарный сбор сухого вещества основной продукции и листостебельной массы до 235,0 ц/га установлен в вариантах с комплексным

применением минеральных удобрений, микроудобрения, регулятора роста растений и органоминерального удобрения на фоне солоमистого навоза (табл. 4).

Следует отметить, что в 2021 г. в условиях достаточного увлажнения повышение доз азотных удобрений от 90 до 150 кг д. в./га обусловило тенденцию к усилению накопления сухого вещества, а полное минеральное удобрение ($N_{90+30}P_{20}K_{60} + м/у$) не имело преимущества перед моноазотом ($N_{90+30} + м/у$). Применение регулятора роста растений к уборке кукурузы обеспечило получение дополнительных 19,3–20,4 ц/га (+7 %) зерна, органоминерального удобрения – 22,9–25,4 ц/га (+8–9 %) сухой биомассы.

В условиях 2022 г. повышение допосевной дозы азотных удобрений с 90 до 120 кг д. в./га в какой-то мере ингибировало нарастание биомассы (–9 %), а полная минеральная система удобрения была достоверно эффективнее моноазотной (+18,8 ц/га). Применение регулятора роста растений обеспечило к уборке получение дополнительных 8,4–22,4 ц/га (+4–10 %) зерна, а эффект от применения органоминерального удобрения (+9 % сухой биомассы) отмечен только при моноазоте.

В 2023 г. повышение допосевной дозы азотных удобрений от 60 до 90 кг д. в./га обусловило тенденцию к усилению накопления сухого вещества, дальнейшее повышение дозы азота было неэффективным. Применение полного минерального удобрения не имело преимущества перед моноазотом. В сложных погодных условиях наилучший эффект получен в варианте с применением органоминерального удобрения Форкроп Голден 10-14-4: к уборке дополнительный сбор сухого вещества на фоне полного удобрения составил 30,0 ц/га (+23 %), на фоне моноазота – 8,6 ц/га (+6 %) (табл. 4).

В зависимости от гидротермических условий вегетационного периода к фазе полной спелости кукурузы в разные годы сформировано разное количество сухой биомассы. Наименьший показатель отмечен в 2023 г. – 72,2–159,1 ц/га, когда от фазы начала молочной спелости до уборки засушливые условия (34 % осадков от нормы) на фоне повышенных температур (+3,4 °С к норме) в течение 40 дней происходило усыхание растений кукурузы и опад листостебельной массы, характеризующееся потерей сухого вещества. К уборке соотношение зерно/листочесельная масса (в сухом веществе) составило 1:0,2.

Следует отметить, что в 2021 и 2022 гг. накопление сухой биомассы кукурузы продолжалось вплоть до уборки, хотя и более низкими темпами, чему способствовала тёплая (12,1 °С) и влажная (93,3–153,6 мм осадков) погода (табл. 1–3).

Основным показателем эффективности применения тех или иных агротехнических мероприятий является величина урожая. За счет плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы урожайность культуры в среднем за 3 года исследований формировалась на уровне 68,5 ц/га. Значимое достоверное влияние на повышение урожайности кукурузы оказало применение соломистого навоза, за счет чего дополнительно получено 24,7 ц/га зерна, или +36 % к контролю (табл. 5). За счет применения полного минерального удобрения в комплексе с микроудобрением ($N_{90-150}P_{20}K_{60} + м/у$) на фоне соломистого навоза дополнительная прибавка составила 13,7–22,7 ц/га (+15–26 %) при окупаемости 1 кг удобрения 8,1–12,3 кг зерна. По эффективности моноазот практически не уступал полному минеральному удобрению – урожайность зерна кукурузы составила 115,8 ц/га против 117,8 ц/га, различия недостоверны (табл. 5).

Здесь следует отметить, что исследования, проведенные нами ранее на данной почве в течение пятилетнего периода, показали, что для сохранения сформированного плодородия длительность непрерывного применения моноазотной системы удобрения не должна превышать 3 года, так как в последующие 2 года отмечается существенный сдвиг в сторону преобладания процесса минерализации над гумификацией [17]. Другими словами, в хозяйствах, испытывающих дефицит фосфорных и калийных удобрений, при возделывании кукурузы на почвах с высоким содержанием подвижных фосфатов и калия, допустимо в течение 1–3 лет применение моноазотной системы удобрения на фоне соломистого навоза без риска снижения урожая и качества зерна.

Повышение суммарной дозы азотных удобрений с 90 до 120 кг д. в./га обеспечило достоверный рост урожая зерна на 10,9 ц/га (+10 %). Дальнейшее увеличение основной дозы азотного удобрения на 30 кг д. в./га оказалось неэффективным приемом при тенденции снижения урожая кукурузы на 1,9 ц/га (табл. 5).

Таблица 5

Урожайность зерна кукурузы

Варианты	Урожайность, ц/га			Среднее	Прибавка к фону	Оплата 1 кг N/P/K, кг
	2021 г.	2022 г.	2023 г.			
Контроль (без удобрений)	66,3	62,3	76,8	68,5	–	–
Соломистый навоз (СН), 60 т/га – Фон	108,4	82,2	89,0	93,2	–	–
Фон + N ₆₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у)'	116,6	98,1	105,9	106,9	13,7	8,1
Фон + N ₉₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у)'	124,9	105,2	123,4	117,8	24,6	12,3
Фон + N ₉₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у + РР)'	135,5	112,5	138,0	128,7	35,5	17,8
Фон + N ₉₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у + ОМУ)' + (ОМУ)"	137,0	108,7	141,0	128,9	35,7	17,9
Фон + N ₁₂₀ P ₂₀ K ₆₀ + (N ₃₀ + м/у)'	117,9	102,6	127,2	115,9	22,7	9,9
Фон + N ₉₀ + (N ₃₀ + м/у)'	124,5	99,0	123,8	115,8	22,6	18,9
Фон + N ₉₀ + (N ₃₀ + м/у + РР)'	132,8	109,1	127,0	123,0	29,8	24,9
Фон + N ₉₀ + (N ₃₀ + м/у + ОМУ)' + (ОМУ)"	127,9	104,3	137,5	123,2	30,0	25,0
НСР ₀₅	19,3	11,9	12,0	10,4	–	–

' подкормка посевов кукурузы в фазу 4–6 листьев; " подкормка посевов кукурузы в фазу 8–10 листьев.

Двукратные подкормки посевов органоминеральным удобрением Форкроп Голден 10-14-4 в фазы 6–8 и 8–10 листьев способствовали повышению урожайности и получению дополнительных 7,4–11,1 ц/га зерна, или +6–10 % по отношению к базовым системам удобрения. Однократная обработка посевов кукурузы регулятором роста растений Агропон С в фазу 6–8 листьев культуры обеспечила получение дополнительных 7,2–10,9 ц/га зерна, или 6–9 % (табл. 5).

Следует отметить, что эффективность применяемых минеральных удобрений и стимуляторов роста растений зависела от складывающихся погодных условий вегетационных периодов. Так, за счёт комплекса минеральных удобрений и микроудобрений на фоне соломистого навоза в относительно благоприятных погодных условиях 2021 и 2022 гг. (Р = 1,3–2,3) прибавка урожая зерна составила 12–14 %

по отношению к органическому фону, а влияние регулятора роста растений и органоминерального удобрения проявилось в повышении урожайности зерна на 5–9 % (табл. 1, 5).

При наименее благоприятных погодных условиях 2023 года (смена засушливых периодов ливневыми дождями на фоне повышенных температур воздуха, $P = 0,5-2,3$) эффективность как минеральных удобрений, так и стимуляторов роста растений проявилась в большей мере. За счет комплекса минеральных макро- и микроудобрений (относительно фона) прибавка урожая зерна достигла 35 %, регулятора роста растений и органоминерального удобрения – 13 % относительно полного минерального удобрения в комплексе с микроудобрением и 7 % – моноазота (табл. 1, 5).

Научный и практический интерес представляют результаты анализа влияния отдельных факторов на формирование урожайности зерна кукурузы при меняющихся погодных условиях. Наши исследования, проведенные ранее на дерново-подзолистой высоко окультуренной почве с высоким содержанием подвижного калия и очень высоким – фосфатов, показали, что при неблагоприятных погодных условиях доля участия почвенного плодородия в формировании урожая возделываемых культур снижалась с 70 до 54 %, или в 1,3 раза. При этом эффективность удобрений повышалась – в наименее благоприятных условиях 37 % продукции было получено за счет минеральных удобрений, из них 28 % обеспечили азотные удобрения, 9 % – фосфорные и калийные [20].

Известно, что фосфорные и калийные удобрения в засушливых условиях снижают расход воды на образование единицы урожая на 10–20 % и более. Калий удобрений удерживает воду, повышая оводненность цитоплазмы, а фосфор удобрений в условиях недостатка влаги более доступен растениям, чем фосфаты почвы. Это тем более важно, что обеспеченность растений азотом в засуху достаточно высока, так как азот поступает в растения преимущественно путем массового потока и меньше зависит от количественной обеспеченности почвы водой. Результаты наших исследований свидетельствуют, что без использования удобрений величина урожайности кукурузы по годам различается до 93 %. Применение минеральных удобрений как отдельно, так и на фоне органических, способствует повышению устойчивости культуры к неблагоприятным погодным условиям со снижением варьирования продуктивности по годам до 44 %. В то же время другие исследователи отмечают, что при остром дефиците влаги прибавка урожая зерна кукурузы от азота может уменьшиться в 6 раз по сравнению с влажным годом, от калия – в 2 раза, а применение фосфорных удобрений вообще может быть неэффективным [6, 8, 20].

На примере оптимального варианта системы удобрения рассмотрим влияние отдельных факторов (почва, действие солоमистого навоза, минеральных удобрений, регулятора роста растений) на урожайность зерна в зависимости от погодных условий вегетации кукурузы.

При максимальной сумме осадков (401,2 мм) на фоне благоприятных температур вегетационного периода 2021 г. доля участия почвы в формировании урожайности составила 48 %, применения соломистого навоза – 31 %. Прибавка урожая зерна от минеральных удобрений в комплексе с микроудобрением составила 16,5 ц/га (12 % от общей), от регулятора роста растений – 12,1 ц/га (+9 %) (табл. 1, рис. 2).

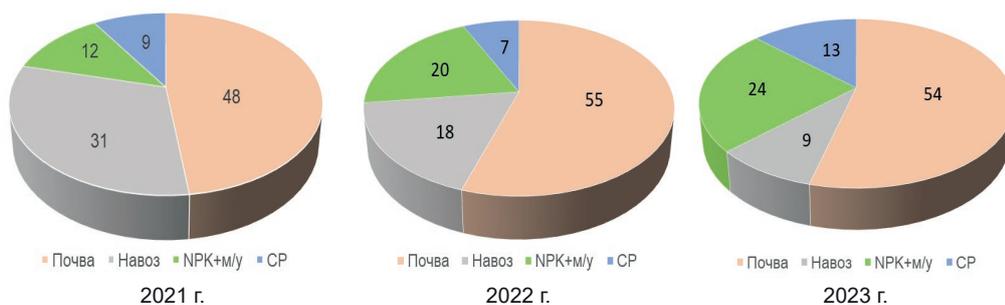


Рис. 2. Долевое участие факторов в формировании урожайности зерна кукурузы при различных погодных условиях вегетации растений, %

В условиях снижения суммы осадков (331,4 мм) в 2022 г. на фоне более низкого температурного фона доля участия почвы в формировании урожайности кукурузы повысилась до 55, или в 1,2 раза, снизилась роль участия органических удобрений в 1,7 раза, возросла роль минеральных удобрений в комплексе с микроудобрением до 20 % от общей (табл. 1, рис. 2).

В более засушливых погодных условиях 2023 года (305,1 мм осадков, 2431,8 °С активных температур) доля участия солоमистого навоза снизилась до 9 %, или в 2,0–3,5 раза по отношению к предыдущим годоопытам, минеральных удобрений в комплексе с микроудобрением возросла в 1,2–2,0 раза, составив 24 % от общей, обработок посевов регулятором роста растений (или подкормок органоминеральным удобрением) увеличилась до 13 % (табл. 1, рис. 2).

Исследования, проведенные нами ранее на дерново-подзолистой суглинистой почве с высоким содержанием подвижных фосфатов и калия, показали, что при неблагоприятных погодных условиях доля участия минеральных удобрений в формировании урожая сельскохозяйственных культур повышается, способствуя усилению устойчивости уровня продуктивности и снижению ее вариабельности по годам [19, 20].

ВЫВОДЫ

В условиях дефицита осадков на фоне повышенных температур в период развития вегетативных органов кукурузы ускоряется образование сухой биомассы и сокращается длительность прохождения фаз, а в период созревания зерна происходит потеря сухого вещества. Теплая и влажная погода в межфазный период молочная-полная спелость кукурузы способствует накоплению сухого вещества вплоть до уборки.

Применение соломистого навоза усиливает накопления сухого вещества в течение вегетации в 1,2–2,2 раза, минеральные удобрения в комплексе с микроудобрением – на 11–25 %, регулятор роста растений Агропон С – 5–13 %, органоминеральное удобрение Форкроп Голден 10-14-4 – 9–12 %. Повышение суммарной дозы азотного удобрения с 90 до 150 кг д. в./га эффективно в годы с достаточным увлажнением. В накоплении сухого вещества полное минеральное удобрение в основном не имеет преимуществ перед моноазотом. Эффект от некорневых обработок посевов кукурузы органоминеральным удобрением Форкроп

Голден 10-14-4 в большей мере проявляется в засушливые годы на фоне полного минерального удобрения.

Максимальный суммарный сбор сухого вещества основной продукции и листостебельной массы до 235,0 ц/га установлен в вариантах с комплексным использованием минеральных удобрений, микроудобрения, регулятора роста растений или органоминерального удобрения, применяемых на фоне солоमистого навоза.

Изучаемые системы удобрения оказывают существенное влияние на повышение урожайности зерна кукурузы: дополнительный сбор урожая от применения соломистого навоза составляет 36 %, комплекса минеральных макро- и микроудобрений (на фоне навоза) – 15–26 %, регулятора роста растений и органоминерального удобрения (на фоне комплекса макро- и микроудобрений) – 6–10 %;

Максимальная урожайность зерна кукурузы 123,0–128,9 ц/га получена при применении на фоне соломистого навоза как полного минерального удобрения ($N_{90+30}P_{20}K_{60}$), так и только азотного (N_{90+30}) в комплексе с некорневыми подкормками посевов микроудобрением МикроСтим-Цинк, Бор, регулятором роста растений Агропон С или органоминеральным удобрением Форкроп Голден 10-14-4, где каждый килограмм минеральных удобрений окупается 17,8–25,0 кг зерна.

В условиях достаточного количества осадков за вегетационный период (более 400 мм) доля участия плодородия почвы в формировании урожайности зерна кукурузы составляет 48 %, органического удобрения – 31 %, минеральных удобрений с микроудобрениями – 12 %. При снижении суммы осадков (около 330 мм) доля участия плодородия почвы в формировании урожайности увеличивается до 55 %, органического удобрения – снижается в 1,7 раза, минеральных удобрений в сочетании с микроудобрением возрастает до 20 %. В более засушливых условиях (около 300 мм осадков) доля участия почвы в формировании урожайности составляет 54 %, органического удобрения – снижается до 9 %, минеральных удобрений – возрастает в 1,2–2 раза, достигая 24 %.

Долевое участие стимуляторов роста растений в системе удобрения кукурузы варьирует на уровне 7–13 %, повышая устойчивость растений в процессе их роста и развития к стрессовым погодным условиям и обеспечивая в комплексе с минеральными удобрениями на фоне соломистого навоза получение максимальной урожайности зерна кукурузы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапа, В. В. Роль погодных условий в формировании продуктивности с/х культур / В. В. Лапа, В. Н. Босак, Н. Н. Ивахненко // Изменения климата и использование климатических ресурсов. – Минск, 2001. – С.147 – 154.
2. Стратегия адаптации Республики Беларусь к изменению климата: согласование рабочего документа Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/4-Minselxozprod-Strategija-adaptatsii-s-x.pdf>. – Дата доступа: 08.02.2020.
3. Логинов, В. Ф. Климатические исследования в Институте / В. Ф. Логинов // Природопользование. – 2012. – Вып. 22. – С. 123–140.
4. Мельник, В. И. Возможные изменения климатических и агроклиматических характеристик в XXI веке на территории Беларуси и их влияние на сельское

хозяйство / В. И. Мельник, Я. А. Соколовская, Е. В. Комаровская // Природные ресурсы – Вып. 2. – 2017. – С. 118–125.

5. Сабинин, Д. А. Физиологические основы питания растений. / Д. А. Сабинин. – М.: АН СССР, 1955. – 512 с.

6. Кукуруза / Д. Шпаар [и др.]. – Минск: ФУАинформ, 1999. – 192 с.

7. Кравченко, Р. В. Агробиологическое обоснование получения стабильных урожаев зерна кукурузы в условиях степной зоны Центрального Предкавказья: монография / Р. В. Кравченко. – Ставрополь, 2010. – 208 с.

8. Надточаев, Н. Ф. Кукуруза на полях Беларуси / Н. Ф. Надточаев; НПЦ НАН Беларуси по земледелию. – Минск: ИВЦ Минфина, 2008. – 412 с.

9. Сельское, лесное и рыбное хозяйство Беларуси. Статистический сборник [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoe-hozyaistvo/selskoe-khozyaistvo>. – Дата доступа 08.01.2024 г.

10. Никитишен, В. И. Минеральное питание кукурузы при взаимодействии азотного и фосфорного удобрения / В. И. Никитишен, В. И. Личко // Агрохимия. – 2012. – № 11. – С. 9–15.

11. Никитишен, В. И. Взаимосвязи в питании кукурузы при длительном применении удобрений на серой лесной почве ополья / В. И. Никитишен, В. И. Личко. – Агрохимия, 2014. – № 12. – С. 16–2.

12. Наумкин, В. Н. Эффективные безопасные приемы повышения урожайности кукурузы на зерно / В. Н. Наумкин, Л. А. Наумкина, А. М. Хлопяников, А. Н. Крюков // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2017. – № 3(23). – С. 81–87.

13. Регламент применения удобрений под кукурузу на дерново-подзолистых высококультуренных суглинистых и супесчаных почвах / Е. Г. Мезенцева [и др.]; НАН Беларуси; Институт почвоведения и агрохимии. – Минск: Институт системных исследований в АПК Беларуси, 2023. – 11 с.

14. Удобрение кукурузы при возделывании на зерно. Раздел отраслевого технологического регламента по возделыванию кукурузы / Т. М. Серая [и др.]; НАН Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. – Минск: Институт системных исследований в АПК Беларуси, 2020. – 8 с.

15. Справочник агрохимика / В. В. Лапа [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 260 с.

16. Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси: сб. науч. материалов / РУП «Научно-практический центр НАН по земледелию». – 3-е изд. доп. и перераб. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – 688 с.

17. Ефанов, Д. В. Формирование урожая гибридов кукурузы под влиянием природных факторов, предшественников и способов основной обработки почвы в зоне каштановых почв Волгоградской области: дис. ...канд. с.-х. наук / Д. В. Ефанов. – Волгоград, 2003. – 155 с.

18. Семененко, Н. Н. Научные основы совершенствования системы управления производственным процессом зерновых культур / Н. Н. Семененко // Земляробства і ахова раслін. – 2019. – № 1. – С. 3–12.

19. Семененко, Н. Н. Урожайность, вынос и коэффициенты возмещения выноса элементов питания в зависимости от погодных условий и применения системы удобрения под яровой ячмень / Н. Н. Семененко, О. Г. Кулеш, Е. Г. Мезенцева // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 1(62). – С. 120–132.

20. Действие удобрений в зернопропашном севообороте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с очень высокими запасами фосфора и калия при различных погодных условиях / О. Г. Кулеш [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 1(62). – С. 109–118.

21. Сабинин, Д. А. Физиологические основы питания растений. / Д. А. Сабинин. – М.: АН СССР, 1955. – 512 с.

22. Кефели, В. И. Природные и синтетические регуляторы онтогенеза растений / В. И. Кефели. – ВИНТИ, 1990. – 157 с.

23. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2017–2020 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 276 с.

**INFLUENCE OF HYDROTHERMAL CONDITIONS
AND MINERAL NUTRITION REGIME ON THE PRODUCTION
PROCESS OF CORN ON SODDY-PODZOL
HIGHLY CULTIVATED LOAM SOIL**

**E. G. Mezentseva, O. G. Kulesh, A. A. Gracheva,
S. M. Zenkova, Y. S. Krasnozhenova**

Summary

The influence of hydrothermal conditions and mineral nutrition regime on the corn production process was assessed in a technological experiment on highly cultivated loamy soddy-podzolic soil. It was revealed that in drier conditions of the growing season, the share of mineral fertilizers in the formation of the crop increases by 2 times, plant growth stimulants – varies at the level of 7–13 %, reaching maximum values in the least favorable weather conditions, increasing the resistance of plants to stress in the process of their growth and development.

It has been established that when using a full mineral fertilizer ($N_{90+30}P_{20}K_{60}$) or only one nitrogen fertilizer (N_{90+30}) in combination with MicroStim-Zinc microfertilizer, Boron, plant growth regulator Agropon S or organomineral fertilizer Forkrop Golden 10-14-4 against a background of 60 t/ha of straw manure forms more than 120 c/ha of the biological yield of corn grain.

Поступила 26.02.24

ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПИТАНИЯ ЛЮЦЕРНЫ ЦИНКОМ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЭТИМ ЭЛЕМЕНТОМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ

М. В. Рак, Е. Н. Пукалова, В. В. Корсакова, Кляусова Ю. В.,
Л. Н. Гук, С. Г. Кудласевич

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние бобовые травы играют существенную роль в решении проблемы дефицита растительного белка и повышении эффективности кормопроизводства. Люцерна – основная бобовая кормовая культура с высокой кормовой ценностью и продуктивностью в земледелии Беларуси. В настоящее время ее роль возрастает благодаря высокому кормовому достоинству, способности формировать высокую урожайность и значительно обогащать почву азотом. Возделывание люцерны позволяет минимизировать расход азотных удобрений для последующих в севообороте культур. Высокая продуктивность люцерны достигается при оптимизации питания макро- и микроэлементами [1–4].

Цинк является одним из важных биогенных микроэлементов. Этот элемент играет большую роль в окислительно-восстановительных процессах, принимает участие в синтезе хлорофилла и витаминов, положительно влияет на белковый и углеводный обмен в растениях. Несбалансированность микроэлементного состава кормов приводит к нарушению минерального обмена, что в свою очередь является причиной возникновения многих заболеваний животных. При недостатке цинка в кормах снижается продуктивность животных и развивается эндемическое заболевание паракератоз [5–8].

Эффективность цинковых удобрений зависит от содержания подвижных форм в почве. По данным крупномасштабного агрохимического обследования пахотных почв Беларуси средневзвешенное содержание подвижного цинка составляет 2,99 мг/кг почвы. При этом доля пахотных почв с низким содержанием цинка составляет 64,3 % от общей площади. Отрицательный баланс цинка в почвах обусловлен оптимизацией кислотности почвы, постоянным выносом урожаями при внесении азотных, фосфорных и калийных удобрений [9].

Значимость проблемы цинкового питания растений определяется также его дефицитом в травяных кормах республики, который составляет 20–30 % от потребности. Поэтому обогащение травяных кормов цинком позволит предупредить проявление его дефицита в рационах и обеспечить животных этим микроэлементом в наиболее усвояемой форме.

В республике практически не изучены закономерности распределения в почвах цинка и потребление его люцерной в зависимости от уровней обеспеченности им почвы и некорневых подкормок цинковым удобрением в период

вегетации. В связи с этим, разработка теоретической базы для оптимизации питания растений цинком является актуальной и имеет практическую значимость в эффективном использовании цинковых удобрений в технологии возделывания люцерны.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования по изучению потребления цинка растениями люцерны в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы цинком и доз цинкового удобрения проводили в 2021–2023 гг. в ПРУП «Экспериментальная база им. Котовского» Узденского района на дерново-подзолистой супесчаной почве. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы: pH_{KCl} – 6,1, содержание гумуса – 2,6 %, P_2O_5 – 218 мг/кг, K_2O – 301 мг/кг.

Полевой опыт с люцерной включает варианты с применением в некорневую подкормку возрастающих доз цинкового удобрения (0,05, 0,10 и 0,15 кг/га д. в.) на 4-х уровнях обеспеченности супесчаной почвы цинком: 1 – низкий уровень (< 3,0 мг/кг), 2 – средний уровень (3,1–5,0 мг/кг), 3 – высокий уровень (5,1–10,0 мг/кг), 4 – избыточный уровень (> 12,0 мг/кг). Исследования с люцерной проводили на фоне минеральных удобрений в дозе $P_{90}K_{180}$. Площадь делянки – 36 м², повторность – 4-кратная.

Схема опыта:

1. Контроль без удобрений;
2. $P_{90}K_{180}$ – фон
3. Фон + $Zn_{0,05}$;
4. Фон + $Zn_{0,10}$;
5. Фон + $Zn_{0,15}$.

Некорневая подкормка люцерны проводилась в фазе ветвление под каждый укос. В качестве микроудобрения для некорневой подкормки применялось жидкое удобрение МикроСтим-Цинк с содержанием цинка 50 г/л. Расход рабочего раствора – 200 л/га.

Период исследований (2021–2023 гг.) отличался от среднемноголетних значений по температурному режиму и влагообеспеченности. В 2021 г. в вегетационный период отмечено повышение температуры до экстремально высоких показателей воздуха в июне и июле, а также избыток осадков в мае и сентябре по сравнению со средними многолетними показателями. Гидротермический коэффициент за вегетационный период люцерны составил 1,8.

В вегетационный период 2022 г. гидротермический коэффициент составил 1,6, и формирование урожайности проходило в нормальных условиях увлажнения. Исключением является июнь и август, которые оказались засушливыми в сравнении со среднемноголетними показателями.

В 2023 г. за весенний период выпало 45 мм осадков, что составляет 41 % от нормы. Отрастание люцерны второго укоса проходило в условиях умеренного температурного режима и недостаточного увлажнения в июне, где ГТК составил лишь 0,8. В среднем в вегетационный период люцерны сложились благоприятные погодные условия при гидротермическом коэффициенте 1,4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показали, что в дерново-подзолистой супесчаной почве валовые и подвижные формы цинка аккумулируются в верхней части гумусового горизонта с дальнейшим снижением их содержания вниз по профилю почвы (рис.). При повышении валового содержания цинка в почве от низкого (23,3 мг/кг) до избыточного уровня (35,7 мг/кг) закономерно увеличивается и количество подвижного цинка с 2,6 до 11,1 мг/кг. На долю подвижного цинка приходится от 11,1 до 31,1 % его валового содержания. На низком уровне обеспеченности почвы цинком содержание подвижного цинка составляет 2,6 мг/кг, среднем – 3,8, высоком – 6,5 и избыточном – 11,1 мг/кг.

Изучение динамики подвижного цинка в течение 3-х лет показали, что его концентрация в почве по годам варьирует слабо и связана больше с погодными условиями.

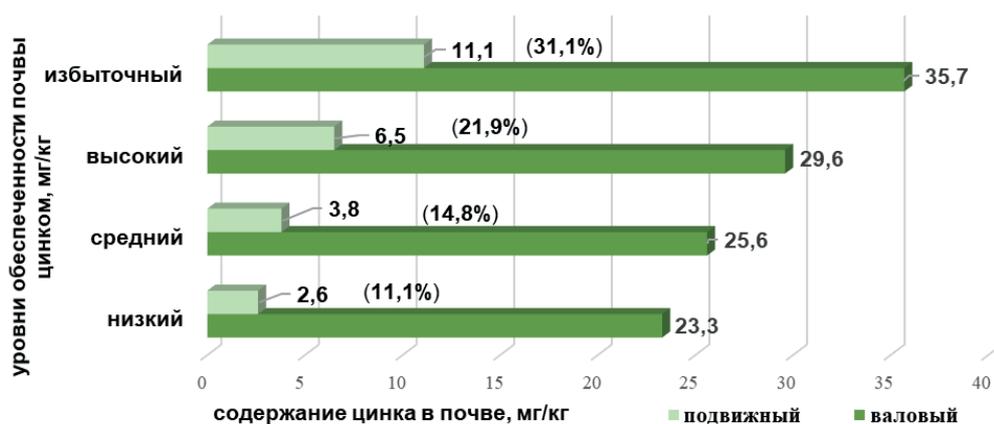


Рис. Содержание валового и подвижного цинка в пахотном горизонте в зависимости от уровня обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы, среднее за 2021–2023 гг.

Анализ результатов исследований показал, что при возделывании люцерны на дерново-подзолистой супесчаной почве урожайность зависела от уровня обеспеченности почвы подвижным цинком и доз внесения цинкового удобрения в некорневые подкормки в период вегетации. По мере увеличения содержания подвижного цинка в супесчаной почве от низкого до среднего уровня урожайность люцерны повышалась на 15,4 ц/га, белка – на 2,3 %. Высокие концентрации подвижного цинка в почве не обеспечивают дальнейшего повышения урожайности и качества продукции (табл.1).

Некорневые подкормки цинковым удобрением увеличивают урожайность люцерны на 15,7–24,7 % при низком содержании подвижного цинка в почве и на 9,1–9,3 % при средней обеспеченности цинком. Так, на супесчаной почве с низким содержанием подвижного цинка внесение в некорневые подкормки микроудобрения МикроСтим-Цинк в дозах 0,05, 0,10 и 0,15 кг/га д. в. повышало урожайность сухой

массы люцерны на 11,1, 13,1 и 17,4 ц/га соответственно. Наиболее высокая прибавка урожайности отмечается при внесении микроудобрения в дозе 0,15 кг/га д. в. и составляет 17,4 ц/га.

При средней обеспеченности супесчаной почвы цинком некорневая подкормка люцерны микроудобрением МикроСтим-Цинк достоверно повышала урожайность сухой массы на 7,9–8,0 ц/га в дозах 0,10–0,15 кг/га д. в. соответственно. На высоком уровне обеспеченности супесчаной почвы подвижным цинком внесение микроудобрения МикроСтим-Цинк в некорневые подкормки люцерны не приводило к повышению урожайности люцерны.

Таблица 1

Влияние микроудобрения МикроСтим-Цинк на урожайность и содержание белка в люцерне при различной обеспеченности почвы цинком (среднее 2021–2023 гг.)

Обеспеченность почвы цинком	Варианты	Сухая масса, ц/га		Содержание белка, %	Сбор белка, ц/га
		урожайность	прибавка		
1. Контроль без удобрений		59,5	–	15,6	8,9
Низкая, 2,6 мг/кг	P ₉₀ K ₁₈₀ – фон	70,5	–	17,1	11,4
	Фон + Zn _{0,05}	81,6	11,1	18,0	14,2
	Фон + Zn _{0,10}	83,6	13,1	18,3	14,7
	Фон + Zn _{0,15}	87,9	17,4	18,6	15,8
Средняя, 3,8 мг/кг	P ₉₀ K ₁₈₀ – фон	85,9	–	19,4	16,6
	Фон + Zn _{0,05}	90,7	4,8	18,5	15,8
	Фон + Zn _{0,10}	93,8	7,9	18,1	16,0
	Фон + Zn _{0,15}	93,9	8,0	18,3	15,9
Высокая, 6,5 мг/кг	P ₉₀ K ₁₈₀ – фон	85,7	–	18,9	15,6
	Фон + Zn _{0,05}	85,8	0,1	17,6	14,4
	Фон + Zn _{0,10}	86,9	1,2	17,7	14,4
	Фон + Zn _{0,15}	85,1	–	17,8	14,4
НСР ₀₅ вариантов		7,9		1,9	2,2
НСР ₀₅ уровней обеспеченности		6,4		1,9	2,8

При увеличении концентрации подвижного цинка в почве от низкого до среднего уровня содержание белка в растениях люцерны повышалось на 2,3 % (табл. 1). Применение цинкового удобрения в некорневую подкормку при низкой обеспеченности почвы цинком способствовало увеличению белка в растениях на 0,9–1,5 %. Сбор белка зависел в основном от урожайности люцерны и увеличивался в среднем с 11,4 до 16,6 ц/га с повышением содержания цинка в почве от низкой до средней обеспеченности этим элементом. На фоне внесения минеральных удобрений в дозе P₉₀K₁₈₀ микроудобрение МикроСтим-Цинк в возрастающих дозах увеличивало сбор сырого белка на 2,8–4,4 ц/га.

Максимальное содержание цинка в растениях отмечается в начале весенней вегетации люцерны. По мере развития растений количество цинка постепенно снижается и достигает минимума в фазу цветения.

Накопление цинка растениями люцерны зависело как от уровня содержания элемента в почве, так и дозы цинкового удобрения (табл. 2). Потребление цинка растениями люцерны возрастает линейно с повышением его концентрации в почве.

Так, повышение содержания подвижного цинка в почве от низкого до избыточного увеличивает накопление элемента в растениях люцерны в среднем с 19,7 до 30,3 мг/кг сухой массы.

Таблица 2

Влияние цинкового удобрения на накопление цинка в растениях люцерны при различной обеспеченности супесчаной почвы этим элементом (среднее 2021–2023 гг.)

Варианты	Обеспеченность почвы цинком			
	низкая, 2,6 мг/кг	средняя, 3,8 мг/кг	высокая, 6,5 мг/кг	избыточная, 11,1 мг/кг
содержание цинка, мг/кг сухой массы				
P ₉₀ K ₁₈₀ – фон	19,7	21,2	24,9	30,3
Фон + Zn _{0,05}	21,4	22,5	26,0	31,2
Фон + Zn _{0,10}				
Фон + Zn _{0,15}	23,2	24,0	27,9	34,4
Фон + Zn _{0,15}	25,6	27,0	29,5	35,8
коэффициент биологического поглощения				
P ₉₀ K ₁₈₀ – фон	7,6	5,6	3,8	2,7
Фон + Zn _{0,05}	8,2	5,9	4,0	2,8
Фон + Zn _{0,10}				
Фон + Zn _{0,15}	8,9	6,3	4,3	3,1
Фон + Zn _{0,15}	9,8	7,1	4,5	3,2

Интенсивность накопления цинка в растениях люцерны под влиянием некорневой подкормки цинковым удобрением снижалась по мере повышения концентрации цинка в почве. Так, на низком уровне обеспеченности почвы подвижным цинком при некорневой подкормке удобрением МикроСтим-Цинк концентрация элемента в растениях в среднем за 3 года составила 21,4–25,6 мг/кг сухой массы, что на 8,6–30,0 % выше фонового варианта и соответствует оптимальным значениям (20–60 мг/кг сухой массы).

При среднем уровне обеспеченности почвы цинком накопление его в растениях было в пределах 22,5–27,0 мг/кг сухой массы (повышение на 6,1–27,4 %). На высоком уровне обеспеченности почвы цинком внесение цинкового удобрения в некорневую подкормку люцерны способствовала повышению его концентрации в растениях на 4,6 мг/кг, или на 18,5 %, на избыточном – на 5,5 мг/кг, или на 18,2 %.

Коэффициент биологического поглощения характеризует интенсивность поглощения растениями элементов питания. По мере увеличения концентрации цинка в почве от низкого до избыточного уровня, коэффициент биологического поглощения снижается с 7,6 до 2,7. Некорневые подкормки цинковым удобрением повышали коэффициент биологического поглощения при низкой обеспеченности почвы цинком с 7,6 до 9,8, при средней – с 5,6 до 7,1.

Для оценки экономической эффективности некорневых подкормок люцерны жидкими микроудобрениями МикроСтим использованы полученные в полевом опыте прибавки урожайности, нормативные данные затрат и цены на текущий год [10]. Расчет экономической эффективности показал, что применение цинкового удобрения в некорневую подкормку люцерны экономически оправдано только при низком и среднем уровнях обеспеченности супесчаной почвы подвижным цинком (табл. 3).

Таблица 3

Экономическая эффективность применения микроудобрения МикроСтим-Цинк при возделывании люцерны на различных уровнях обеспеченности почвы цинком

Уровни обеспеченности почвы цинком	Варианты	Прибавка ц/га к. ед.	Стоимость прибавки, руб./га	Общие затраты, руб./га	Условно чистый доход, руб./га	Рентабельность, %
Низкий, 2,6 мг/кг	Фон* + Zn _{0,05}	5,7	182,4	104,6	77,8	74,4
	Фон + Zn _{0,10}	6,6	211,2	122,8	88,4	71,9
	Фон + Zn _{0,15}	8,9	284,8	152,2	132,6	87,2
Средний, 3,8 мг/кг	Фон + Zn _{0,05}	2,4	76,8	78,2	–	–
	Фон + Zn _{0,10}	4,0	128,0	102,0	26,0	25,5
	Фон + Zn _{0,15}	4,1	131,2	113,8	17,4	15,3

* Фон – P₉₀K₁₈₀.

При низком содержании подвижного цинка в супесчаной почве более высокие экономические показатели обеспечивало внесение в некорневую подкормку люцерны микроудобрения в дозе 0,15 кг/га д. в. Прибавка урожайности от применения микроудобрения в этой дозе составила 8,9 ц/га к. ед., условно чистый доход – 132,6 руб./га при рентабельности 87 %.

На среднем уровне обеспеченности почвы подвижным цинком наиболее высокую эффективность обеспечивала внесение в некорневую подкормку люцерны микроудобрения в дозе 0,10 кг/га д. в. при условно чистом доходе 26,0 руб./га и рентабельности 25,5 %.

На основании экспериментальных данных полевых и лабораторных исследований разработаны параметры оптимизации питания люцерны цинком (табл. 4).

Таблица 4

Параметры оптимизации питания люцерны цинком при различной обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы этим микроэлементом (среднее 2021–2023 гг.)

Обеспеченность почвы цинком	Дозы удобрений, кг/га д. в.	Срок некорневой подкормки цинком	Урожайность, ц/га сухой массы	Прибавка, ц/га	Содержание цинка, мг/кг сухой массы
Низкая, 2,6 мг/кг	P ₉₀ K ₁₈₀	–	70,5	–	19,7
	P ₉₀ K ₁₈₀ +Zn _{0,15}	фаза ветвление	87,9	17,4	25,6
Средняя, 3,8 мг/кг	P ₉₀ K ₁₈₀	–	85,9	–	21,2
	P ₉₀ K ₁₈₀ +Zn _{0,10}	фаза ветвление	93,8	7,9	24,0
Высокая, 6,5 мг/кг	P ₉₀ K ₁₈₀	–	85,7	–	24,9
Избыточная, 11,1 мг/кг	P ₉₀ K ₁₈₀	–	82,8	–	30,3

При низкой и средней обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы цинком для повышения урожайности и увеличения содержания этого элемента

в растениях люцерны рекомендуется проведение некорневой подкормки в фазе ветвление цинковыми удобрениями в дозе 0,15 и 0,10 кг/га д. в. соответственно. При высокой обеспеченности почвы цинком некорневая подкормка цинковыми удобрениями нецелесообразна.

ВЫВОДЫ

В дерново-подзолистой супесчаной почве при повышении валового содержания цинка от низкого (23,3 мг/кг) до избыточного уровня (35,7 мг/кг) закономерно увеличивается и количество подвижного цинка с 2,6 до 11,1 мг/кг. На долю подвижного цинка приходится от 11,1 до 31,1 % его валового содержания.

При возделывании люцерны на супесчаной почве урожайность зависела от уровня обеспеченности почвы цинком и доз внесения цинкового удобрения в некорневую подкормку. По мере повышения подвижного цинка в почве до среднего уровня урожайность сухой массы люцерны повышалась на 15,4 ц/га соответственно. При низкой обеспеченности подвижным цинком, некорневая подкормка микроудобрением МикроСтим-Цинк в фазу стеблевания в дозе 0,15 кг/га д. в. повышала урожайность сухой массы на 17,4 ц/га, сбор белка – на 4,4 ц/га, при условно чистом доходе 132,6 руб./га и рентабельности 87 %.

Внесением цинка в некорневые подкормки можно регулировать не только минеральное питание растений, но и повышать его концентрацию в урожае до оптимальных значений. Потребление цинка растениями люцерны возрастает линейно с повышением его концентрации в почве. Повышение содержания подвижного цинка в почве от низкого до избыточного уровня увеличивает накопление элемента в растениях люцерны с 19,7 до 30,3 мг/кг сухой массы. На низком уровне обеспеченности почвы подвижным цинком при некорневой подкормке удобрением МикроСтим-Цинк концентрация элемента в растениях в среднем за 3 года составила 21,4–25,6 мг/кг сухой массы, что на 8,6–30,0 % выше фонового варианта и соответствует оптимальным значениям для кормов (20–60 мг/кг сухой массы).

В технологии возделывания люцерны на дерново-подзолистой супесчаной почве, низко- и среднеобеспеченной цинком, рекомендуется некорневая подкормка в фазе ветвление цинковым удобрением в дозах 0,15 и 0,10 кг/га д. в., обеспечивающая повышение урожайности сухой массы на 17,4 и 7,9 ц/га, увеличение содержания цинка в растениях до 25,6 и 24,0 мг/кг при рентабельности 87,2 и 25,5 % соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикун, П. Т. Люцерна и ее возможности / П. Т. Пикун. – Минск: Беларус. наука, 2012. – 310 с.
2. Карпей, О. Н. Люцерна – в резерве земледелия и кормопроизводства / О. Н. Карпей // Наше сельское хозяйство. – 2015. – Шеуджен, А. Х. Люцерна / А. Х. Шеуджен, Л. М. Онищенко, Х. Д. Хурум. – ОАО «Полиграфиздат «Адыгея», 2007.
3. Левахин, Ю. И. Ценность кормов из люцерны разных стадий развития / Ю. И. Левахин // Зоотехния. – 2004. – № 3. – С. 12–13.
4. Сычев В. Г. Цинк в агроэкосистемах России. Мониторинг и эффективность применения / В. Г. Сычев, А. Н. Аристархов, Т. А. Яковлева. – М.: ВНИИА, 2015. – 204 с.

5. Косолапов, В. М. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа: монография / В. М. Косолапов, В. А. Чуйков, Х. К. Худякова. – Москва: ООО «Угрешская типография», 2019. – 272 с.

6. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

8. Синдирева, А. В. Критерии и параметры действия микроэлементов в системе почва–растение–животное: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / А. В. Синдирева. – Тюмень, 2012. – 32 с.

9. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2013–2016 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – С. 31–32.

10. Методика определения агрономической и экономической эффективности минеральных и органических удобрений / И. М. Богдевич [и др.]. – Минск: Институт почвоведения и агрохимии, 2010. – 24 с.

PARAMETERS OF OPTIMIZATION OF ALFALFA NUTRITION WITH ZINC AT DIFFERENT AVAILABILITY OF THIS ELEMENT IN SOD-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL

**M. V. Rak, E. N. Pukalova, V. V. Korsakova, Yu. V. Kliausava,
L. N. Guk, S. G. Kudlasevich**

Summary

In a field experiment on sod-podzolic sandy loam soil, it was established that when the gross zinc content increases from low (23,3 mg/kg) to excessive level (35,7 mg/kg), the amount of mobile zinc increases from 2,6 to 11,1 mg/kg. The share of mobile zinc accounts for from 11,1 to 31,1 % of its total content. Zinc uptake by alfalfa plants increases linearly with increasing zinc concentration in the soil. An increase in the content of mobile zinc in the soil from low to excessive levels increases the accumulation of the element in alfalfa plants from 19,7 to 30,3 mg/kg dry weight.

In the technology of alfalfa cultivation on sod-podzolic sandy loam soil, low- and medium-provided zinc, foliar feeding in the branching phase with zinc fertilizer in doses of 0,15 and 0,10 kg/ha a. i. increases the yield of dry mass by 17,4 and 7,9 c/ha and increases the zinc content in plants to 25,6 and 24,0 mg/kg with a profitability of 87,2 and 25,5 %, respectively.

Поступила 26.04.24

ВЛИЯНИЕ СЛИЗЕОБРАЗУЮЩИХ БАКТЕРИЙ Р. *BACILLUS* НА АКТИВНОСТЬ ФОТОСИНТЕЗА БОБОВ КОРМОВЫХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ГЛИФОСАТА В ПОЧВЕ

Н. А. Михайловская¹, С. А. Касьянчик², Т. Б. Барашенко¹,
Т. В. Погирницкая¹, С. В. Дюсова¹

¹Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

²Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Среди объектов хранения исследовательской коллекции ризосферных бактерий Института почвоведения и агрохимии имеются представители слизиобразующих бактерий, относящиеся к роду *Bacillus*. Слизеобразующие бациллы широко распространены в почвах зоны умеренного климата [1–3]. Интерес к этим ризобактериям обусловлен их способностью улучшать калийное питание растений за счет мобилизации почвенных запасов калия, входящего в состав первичных и вторичных минералов [1, 3–5]. К настоящему времени установлено, что трансформация почвенных минералов происходит под действием микробных слизей [1, 3, 6], минеральных и органических кислот биогенного происхождения [1–3, 6] или других продуктов метаболизма ризобактерий, способных к образованию комплексных [1, 4–6] или хелатных [1, 3] соединений с элементами кристаллической решетки почвенных минералов. Образование слизи служит также защитным фактором при неблагоприятных экологических условиях и способствует выживанию бактерий в конкурентных условиях ризосферы.

По результатам наших многолетних исследований применение коллекционных штаммов слизиобразующих бацилл в качестве инокулянтов обеспечивало значительный гормональный эффект, проявляющийся в увеличении объема и массы корней и надземной части растения на ранних этапах онтогенеза [7–10]. Коллекционные штаммы *Bacillus* spp. характеризуются способностью к мобилизации труднодоступных форм почвенного калия [9], значительной ростостимулирующей активностью [7] и способностью к мобилизации фосфора из нерастворимых ортофосфатов кальция [8]. Благодаря наличию разнообразных приспособительных механизмов слизиобразующие *Bacillus* spp. оказывают разностороннее положительное влияние на инокулированные растения в разных экологических условиях.

Недавно установлена способность коллекционных штаммов слизиобразующих бацилл метаболизировать гербицид глифосат как источник фосфора, что значительно повышает интерес к этим ризобактериям [11].

В настоящее время глифосат применяется в глобальных масштабах. Это обусловлено его эффективностью, невысокой стоимостью, а также наличием устойчивых к гербициду трансгенных сортов основных сельскохозяйственных культур. В связи с этим отмечается практически повсеместное присутствие остаточных количеств глифосата и его первичного метаболитического продукта, аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), в окружающей среде [12–15]. Микробные методы

детоксикации этого гербицида являются наиболее приемлемыми с экологических и экономических позиций и могут обеспечить биотехнологию защиты окружающей среды [13, 16].

Цель настоящей работы – установить влияние слизиобразующих ризосферных бактерий р. *Bacillus* на показатели активности фотосинтеза бобов кормовых в зависимости от содержания глифосата в почве.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объекты исследований – штаммы слизиобразующих *Bacillus* spp. из фонда исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии. Исследования проведены путем постановки серии инокуляционных *in vitro* экспериментов.

Методика проведения модельного инокуляционного эксперимента с тест-культурой в искусственно контролируемых условиях (почвенный микрокосм). Для установления влияния ГФ-утилизирующих ризобактерий *Bacillus* sp. Кт и *Bacillus circulans* К-81 (инокуляция семян) на физиологический статус растений и показатели активности фотосинтеза в условиях почвенного микрокосма проведен модельный эксперимент. В дерново-подзолистой супесчаной почве искусственно созданы разные уровни содержания глифосата: С₁, С₂ и С₃; для этого в почву вносили водные растворы гербицида Торнадо: 2,30 мг ГФ/кг, 7,70 мг ГФ/кг и 38,50 мг ГФ/кг почвы соответственно. Концентрация С₁ соответствует внесению в почву 3,0 л/га, концентрация С₂ – 10 л/га гербицида. Опытная концентрация С₃ соответствует пятикратному превышению максимальной дозы гербицида 50 л/га при условии пересчета на слой пахотного горизонта 0–5 см. Внесение гербицида в почву проведено за 7 дней до посева бобов. Контроль (С₀) – почва без внесения глифосата. Длительность эксперимента – 2,5 месяца, повторность в эксперименте четырехкратная.

В модельном эксперименте в качестве тест-культуры использованы бобы кормовые ТРАМПЕТ. Поверхностно стерилизованные (10 % раствор H₂O₂, 30 мин.) семена были инокулированы суспензиями штаммов бактерий *Bacillus* sp. Кт и *Bacillus circulans* К-81 (титры $8,5 \cdot 10^7$ КОЕ/мл). Бактериальные суспензии готовили путем смыва двухсуточных культур, выращенных на плотной питательной среде. Контроль – семена без инокуляции. В каждый сосуд (Ø 9 см, h = 11 см, объем почвы 500 г) высевали по 5 семян тест-культуры.

Оценка влияния глифосата на фотосинтетический потенциал растений. Фотосинтетические показатели тест-культуры изучали в течение 2-х месяцев (от посева семян до уборки). Фотосинтетическую активность бобов кормовых оценивали по следующим показателям: динамика роста (метод замеров), масса надземной части растений (метод высушивания до постоянной массы) [17], площадь листовой поверхности (метод измерений с определением поправочного коэффициента для бобов K = 0,73). Содержание хлорофиллов в листьях бобов кормовых определяли по методу Г. С. Посыпанова [18]. По окончании эксперимента определены сырая и сухая масса корней растений. Повторность в эксперименте четырехкратная.

Методика определения содержания хлорофилла в листьях. В соответствии с методом Г. С. Посыпанова [18] навеску листьев (0,2 г) растирали в фарфоровой ступке с добавлением отмытого речного песка, к полученной массе приливали 4–5 мл этилового спирта (96 %) и продолжали растирание в течение нескольких

минут. После отстаивания раствор фильтровали в мерную колбу объемом 25 мл, полученный фильтрат доводили до метки этиловым спиртом и определяли оптическую плотность экстрактов на спектрофотометре Metertech UV/VIS SP 8001.

Содержание хлорофилла а, хлорофилла b и каротиноидов в листьях растений определяли в вытяжках при длинах волн, соответствующих максимумам спектра поглощения исследуемых пигментов в указанном растворителе. Для хлорофилла а в вытяжке этилового спирта максимум поглощения отмечается при длине волны 665 нм, для хлорофилла b – при 649 нм. Каротиноиды определяли при длине волны 441 нм. Концентрацию пигментов в экстракте рассчитывали по формулам [19]:

$$C_a \text{ (мг/л)} = 13,70 \cdot OD_{665} - 5,76 \cdot OD_{649}; C_b \text{ (мг/л)} = 25,80 \cdot OD_{649} - 7,60 \cdot OD_{665},$$

где OD_{665} – оптическая плотность раствора при длине волны 665 нм;
 OD_{649} – оптическая плотность раствора при длине волны 649 нм.

Концентрацию каротиноидов (Скар., мг/л) рассчитывали по формуле:

$$\text{Скар.} = 4,695 \cdot OD_{441} - 0,268 \cdot (C_a + C_b),$$

где OD_{441} – оптическая плотность раствора при длине волны 441 нм;
 $C_a + C_b$ – суммарное содержание хлорофиллов а и b в растворе, мг/л.

Количественное содержание пигментов (мг/г сух. в-ва) в экстракте рассчитывали по формуле:

$$X = V \cdot C \cdot 100 : m \cdot 1000 \cdot (100 - W),$$

где V – объем спиртовой вытяжки (мл);
 C – концентрация пигмента в спиртовом растворе (мг/л);
 m – навеска (г); W – потеря веса при высушивании навески листьев (%).

В лабораторных исследованиях использовали гербицид Торнадо 500: в.р., 500 г/л глифосата кислоты (изопропиламинная соль). Изготовитель: АО Фирма «Август», Россия, ТУ 20.20.12-071-18015953-2017 г.

Для стерилизации химических реактивов и посуды используются стерилизатор паровой ГК-100-3, стерилизатор паровой ГК-10-1, облучатели ультрафиолетовые УГД-2, УГД-3.

Для культивирования бактерий и приготовления бактериальных суспензий используются: термостат ТПС – 1, шейкер орбитальный KS-501 digital IKA WERKE (GmbH & Co.KG), перемешивающее устройство ЛАБ-ПУ-01.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние глифосата на PGP-потенциал глифосат-утилизирующих ризобактерий *Bacillus* spp. В задачи исследований входила оценка влияния глифосата на стимулирующий потенциал коллекционных ГФ-утилизирующих бактерий (PGP-потенциал по международной терминологии) по показателям всхожести семян тест-культуры (яровая пшеница), длине coleoptile и суммарной длине корней проростков. Результаты экспериментов показали, что под действием глифосата

снижается процент всхожести семян, длина coleoptиле и суммарная длина корней проростков. Инокуляция семян штаммами *Bacillus* spp. К-62, К-65, К-81 и Кт оказывала значимое стимулирующее действие на фоне глифосатного стресса, указывающее на сохранение их PGP-потенциала: всхожесть семян повышалась на 3,3–10 %, длина coleoptиле – на 0,12–0,81 см и общая длина корней проростка – на 0,01–1,70 см. Наибольший стимулирующий эффект отмечен для штамма *Bacillus* sp. Кт: всхожесть семян повышалась на 10,0–13,3 %, длина coleoptиле – на 0,61–0,81 см и длина корней проростка – на 1,17–1,70 см в зависимости от концентрации глифосата (табл. 1).

Таблица 1

Влияние ризобактерий *Bacillus* spp. на показатели всхожести и развития проростков тест-культуры (яровая пшеница) в зависимости от концентрации глифосата

Вариант	Всхожесть, %			Длина coleoptиле, см			Суммарная длина корней 1 растения, см		
	C ₀	C ₁	C ₂	C ₀	C ₁	C ₂	C ₀	C ₁	C ₂
Контроль	73,3	70,0	56,7	2,80	2,50	1,77	9,43	8,80	5,94
<i>Bacillus</i> sp. К-62	80,0	73,3	66,7	3,38	2,63	1,89	10,67	9,09	6,07
<i>Bacillus</i> sp. К-65	86,7	70,0	66,7	3,27	2,76	1,73	12,06	9,41	5,95
<i>Bacillus circulans</i> К-81	76,7	70,0	66,7	4,08	2,62	2,30	11,24	9,14	6,89
<i>Bacillus</i> sp. Кт	90,0	80,0	70,0	3,71	3,31	2,38	11,96	10,50	7,11
НСР _{0,95} Фактор А (ГФ)	7,64			0,39			0,67		
Фактор В (инокуляция)	8,83			0,51			0,87		

Влияние ГФ-утилизирующих ризобактерий р. *Bacillus* на показатели активности фотосинтеза бобов кормовых в зависимости от содержания глифосата в почве. Для абсолютного большинства гербицидов основной мишенью являются процессы фотосинтеза в растениях. Глифосат – единственный гербицид, действующий по механизму ингибирования биосинтеза ароматических аминокислот и белка [16]. Однако к настоящему времени опубликован целый ряд исследований, свидетельствующих, что глифосат воздействует на разные физиологические процессы растений, в том числе на фотосинтетическую активность. По современным данным глифосат способен ингибировать биосинтез хлорофиллов, каротиноидов, жирных кислот, снижая их содержание в растениях, а также индуцировать окислительный стресс, который считается вторичным эффектом блокирования шикиматного пути биосинтеза белка. Применение глифосата может вызывать негативные изменения в функционировании фотосинтетического аппарата, приводящие к снижению фотохимической активности и накоплению перекиси водорода H₂O₂ [20–23].

В модельном эксперименте в условиях почвенного микрокосма изучено влияние штаммов *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт на рост и показатели фотосинтетической активности бобов кормовых в зависимости от концентрации глифосата в почве.

Всходы бобов появились на 6-е сутки; в вариантах с инокуляцией семян – на 5-е сутки. На начальных стадиях повышение концентрации глифосата в почве оказывало негативное воздействие на рост бобов. Высота растений при первом замере на 6–7 % меньше по сравнению с контролем на фоне C₀. Тенденция снижения высоты растений сохранилась до окончания эксперимента.

Инокуляция семян слизеобразующими бациллами оказывала антистрессовое действие, которое усиливалось при повышении концентрации глифосата в почве. Стимулирующее действие инокуляции на динамику роста ко времени уборки составило 4–17 % на фонах С₁–С₃ с внесением глифосата в почву. По показателям линейного роста наиболее эффективным инокулянт для бобов кормовых ТРАМПЕТ был штамм *Bacillus circulans* К-81 (табл. 2, рис.).

Таблица 2

Влияние ризобактерий р. *Bacillus* на динамику линейного роста бобов кормовых в зависимости от содержания глифосата в почве

С _{ГФ}	Инокуляция	Высота растений, см							
		19.05.23		23.05.23		02.06.23		22.06.23	
		см	%*	см	%*	см	%*	см	%*
С ₀	Без инокуляции	3,85	100	9,97	100	22,97	100	51,20	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	4,07	106	11,25	113	27,96	122	56,16	110
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	4,17	108	10,05	101	25,01	109	53,53	105
С ₁	Без инокуляции	3,57	100	8,38	100	22,64	100	50,72	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	4,31	121	11,09	132	28,05	124	55,78	110
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	3,85	108	9,35	112	24,32	107	52,68	104
С ₂	Без инокуляции	3,57	100	9,43	100	21,49	100	45,20	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	4,40	123	11,93	127	28,79	134	52,85	117
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	3,64	102	9,92	105	24,19	113	51,55	114
С ₃	Без инокуляции	3,62	100	9,81	100	19,05	100	45,80	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	4,43	122	12,35	126	24,15	127	51,92	113
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	4,34	120	10,82	110	20,89	110	48,45	106
НСР ₀₅ Фактор А (инокуляция)		0,25		0,32		0,90		2,11	
Фактор В (доза ГФ)		0,29		0,27		0,78		2,44	

* Действие по отношению к контролю



а)

б)

Рис. Влияние ризобактерий р. *Bacillus* (контроль, штаммы Кт и К-81) на рост бобов кормовых в зависимости от содержания ГФ в почве
 а) – фон С₀ (3 сосуда слева) и С₂ (3 сосуда справа);
 б) фон С₀ (3 сосуда слева) и С₃ (3 сосуда справа)

По данным модельного эксперимента не отмечено отрицательного действия почвенного глифосата на сырую и сухую массу бобов кормовых из расчета на 1 растение, а на фонах С₂ и С₃ отмечено даже увеличение сухой надземной массы растений на 20–23 %.

Прием инокуляции штаммами ризобактерий *Bacillus* sp. Кт и *Bacillus circulans* К-81 способствовал накоплению биомассы растений при всех изученных уровнях содержания глифосата в почве. Стимулирующее действие инокуляции на сухую массу бобов кормовых на фонах С₁–С₃ составило 5–16 %. Наибольший антистрессовый эффект обеспечивал штамм *Bacillus circulans* К-81: прибавка сухой массы бобов на фоне С₀ составила 11 %, на фоне С₁ –15 %, на фоне С₂ – 7 % и на фоне С₃ – 15 % по сравнению с соответствующими вариантами без инокуляции (табл. 3).

Установлено существенное положительное действие ризобактерий *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт на развитие корневой системы кормовых бобов. В целом по опыту показатели сухой массы корней были в пределах 0,27–0,44 г. Увеличение массы корней за счет применения штамма *Bacillus circulans* К-81 составило 7 % на блоках С₀ и С₁, 32 % и 33 % на блоках С₂ и С₃ соответственно по отношению к контрольным вариантам. Применение штамма-инокулянта *Bacillus* sp. Кт увеличивало массу корней от 9 до 37 % в целом по опыту (табл. 3).

Таблица 3

Влияние ризобактерий *Bacillus* spp. на массу надземной части и корней бобов кормовых (в расчете на 1 растение) в зависимости от содержания глифосата в почве

С _{ГФ}	Инокуляция	Масса надземной части				Масса корней растений			
		сырая масса		сухая масса		сырая масса		сухая масса	
		г	%*	г	%*	г	%*	г	%*
С ₀	Контроль	4,86	100	0,55	100	2,35	100	0,27	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	5,56	114	0,61	111	2,65	113	0,29	107
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	5,01	103	0,58	105	3,12	133	0,35	130
С ₁	Контроль	5,22	100	0,59	100	2,44	100	0,27	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	5,89	113	0,68	115	2,72	111	0,29	107
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	5,26	101	0,63	107	3,48	143	0,37	137
С ₂	Контроль	5,07	100	0,68	100	3,09	100	0,31	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	5,45	107	0,73	107	3,36	109	0,41	132
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	5,37	106	0,79	116	3,43	111	0,35	113
С ₃	Контроль	5,12	100	0,66	100	2,36	100	0,33	100
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	5,56	109	0,76	115	3,18	135	0,44	133
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	5,31	104	0,69	105	2,54	108	0,36	109
НСР ₀₅ Фактор А (инокуляция)		0,25		0,05		0,14		0,03	
Фактор В (доза ГФ)		0,29		0,05		0,14		0,03	

* Действие по отношению к контролю.

Повышение содержания глифосата в почве на фонах С₁–С₃ негативно влияло на ассимиляционную поверхность листьев на вариантах без внесения ризобактерий по сравнению с фоном С₀. Антистрессовое действие штаммов *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт на фотосинтетический потенциал бобов кормовых проявлялось в широком диапазоне содержания глифосата в почве. Инокуляция

калиймобилизующими бактериями приводила к увеличению площади листьев на 13 % (*Bacillus* sp. Кт) по сравнению с контролем на фоне С₀ и на 6–13 % на фонах С₁–С₃ (*Bacillus circulans* К-81).

Установлено положительное действие штаммов *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт на содержание разных форм хлорофиллов в листьях бобов кормовых в широком диапазоне содержания глифосата в почве (табл. 4).

Таблица 4

Влияние ризобактерий *Bacillus* spp. на фотосинтетический потенциал бобов кормовых в зависимости от содержания глифосата в почве

С _{ГФ}	Инокуляция	Площадь листовой поверхности		Содержание (мг/г сух. в-ва)			
		см ² /1 раст.	%*	хлорофиллы			каротиноиды
				a	b	a + b	
С ₀	Без инокуляции	130,4	100	11,73	7,17	18,90	7,75
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	133,5	102	12,06	7,58	19,64	6,64
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	146,8	113	11,18	6,72	17,90	6,19
С ₁	Без инокуляции	125,7	100	9,18	5,98	15,16	6,83
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	142,3	113	10,57	6,47	17,04	7,32
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	131,1	104	10,95	6,37	17,32	6,63
С ₂	Без инокуляции	125,1	100	10,09	6,06	16,15	4,18
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	132,7	106	10,80	6,18	16,98	4,57
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	131,2	105	10,88	6,64	17,52	4,28
С ₃	Без инокуляции	123,3	100	10,09	5,85	15,94	4,52
	<i>Bacillus circulans</i> К-81	135,1	110	9,61	5,60	15,21	4,87
	<i>Bacillus</i> sp. Кт	136,8	111	10,89	6,20	17,09	4,79
НСР ₀₅ Фактор А (инокуляция)		5,35		0,40	0,24	0,63	0,39
Фактор В (доза ГФ)		4,63		0,35	0,21	0,54	0,36

* Действие по отношению к контролю.

Биологические механизмы антистрессового действия ризосферных бактерий *Bacillus* spp.: стимуляция роста (гормональный эффект, растворение ортофосфатов кальция, биологический контроль) и деструкция глифосата. Антистрессовое действие ризосферных бактерий обусловлено их полезными свойствами и богатым биохимическим потенциалом.

ВЫВОДЫ

Проведена серия модельных инокуляционных экспериментов по культивированию бобов кормовых ТРАМПЕТ в условиях почвенного микрокосма с искусственно созданными уровнями содержания глифосата в почве, соответствующими применению: 0; 3; 10 и 50 л/га гербицида в полевых условиях. Экспериментальные данные свидетельствуют о стрессовом действии почвенного глифосата на развитие растений, установлено снижение высоты, замедление роста и снижение показателей активности фотосинтеза бобов кормовых. Применение слизиобразующих

ризосферных бактерий *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт для инокуляции семян оказывало полифункциональное антистрессовое действие на растения в широком диапазоне концентраций глифосата в почве. Отмечены стимуляция роста и развития корневой системы, повышение фотосинтетического потенциала за счет увеличения ассимиляционной поверхности листьев бобов кормовых и содержания хлорофиллов и каротиноидов. Антистрессовое действие слизиобразующих ризосферных бактерий *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт усиливалось при повышении содержания глифосата в почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристовская, Т. В. Микробиология процессов почвообразования / Т. В. Аристовская. – Л.: Наука, 1980. – 187 с.
2. Звягинцев, Д. Г. Биология почв / Д. Г. Звягинцев, И. Л. Бабьева, Г. М. Зенова. – М.: МГУ, 2005. – 445 с.
3. Александров, В. Г. Силикатные бактерии / В. Г. Александров. – М.: Сельхозгиз, 1953. – 115 с.
4. Berthelin, J. Microbial weathering processes / J. Berthelin // *Microbial Geochemistry* / Editor W.E. Krumbein. – Blackwell, London. – 1983. – P. 223–262.
5. Laboratory evidence for microbially mediated silicate mineral dissolution in nature / W. J. Ullman [et al.] // *Chemical Geology*. – 1996. – Vol. 132. – P. 11–17.
6. Терновская, М. И. Теоретические и практические основы роли *Bacillus mucilaginosus* в увеличении урожайности сельскохозяйственных культур: автореф. ... дис. д-ра. с.-х. наук: 06.01.04 / М. И. Терновская; Одесса, 1975. – 49 с.
7. Влияние силикатных бактерий на развитие проростков ячменя и пшеницы / Н. А. Михайловская [и др.] // *Почвенные исследования и применение удобрений*. – 2003. – Вып. 27. – С. 316–324.
8. Михайловская, Н. А. Количественная оценка активности калиймобилизующих бактерий и их эффективность на посевах озимой ржи / Н. А. Михайловская // *Весці НАН Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2006. – № 3. – С. 41–46.
9. Лапа, В. В. Эффективность бактериального удобрения Калиплант на дерново-подзолистой супесчаной почве с разной обеспеченностью подвижным калием / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко // *Агрохимия*. – 2016. – № 6. – С. 29–38.
10. Михайловская, Н. А. Влияние бактериального удобрения Калиплант на урожайность и качество яровой пшеницы на эродированных почвах / Н. А. Михайловская, А. Ф. Черныш, С. А. Касьянчик // *Весці НАН Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2010. – № 2. – С. 51–58.
11. Скрининг способности калиймобилизующих ризобактерий метаболизировать гербицид глифосат / Н. А. Михайловская [и др.] // *Почвоведение и агрохимия*. – 2022. – № 1(68). – С. 200–212.
12. Шушкова, Т. В. Биодеструкция глифосата почвенными бактериями: дис. ... канд. биол. наук / Т. В. Шушкова; ВАК РФ 03.01.06; Ин-т биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г. К. Скрыбина РАН. – Пущино, 2010. – 128 с.
13. Shushkova, T. Glyphosate bioavailability in soil / T. Shushkova, I. Ermakova, A. Leontievsky // *Biodegradation*. – 2010. – Vol. 21(3). – P. 403–410.
14. Микробная деградация гербицида глифосата / А. В. Свиридов [и др.] // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2015. – Т. 51. – Вып. 2. – С. 183–190.

15. Bioremediation of glyphosate contaminated soils / I. Ermakova [et al.] // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2010. – Vol. 88(2). – P. 585–594.
16. Кононова, С. В. Фосфонаты и их деградация микроорганизмами / С. В. Кононова, М. А. Несмеянова // Биохимия. – 2002. – Т. 67. – Вып. 2. – С. 220–233.
17. Лапа, В. В. Применение удобрений и качество урожая / В. В. Лапа, В. Н. Босак. – Минск, 2006. – 120 с.
18. Посыпанов, Г. С. Методы изучения биологической фиксации азота воздуха: справ. пособие / Г. С. Посыпанов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 300 с.
19. Lichtenthaler, H. K., Bussman C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. Curr. Protoc. Food Anal. Chem. – 2001. – P. 1–8.
20. Haslam, E. The shikimate pathway: biosynthesis of natural products series / E. Haslam // Elsevier, New York. – 2014.
21. Fedtke, K. Herbicides / K. Fedtke, S. Duke // Plant toxicology / Hock B, Elstner E, eds. – New York: Marcel Dekker. – 2005. – P. 247–330.
22. Glyphosate-Dependent Inhibition of Photosynthesis in Willow / M. P. Gomes [et al.] // Front. Plant Sci. – 2016. – Vol. 8. – P. 150–164.
23. Gomes, M. P. Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: an overview / M. P. Gomes [et al.] // J. Exp. Bot. – 2014. – Vol. 65, № 17. – P. 4691–4703.

EFFECT OF MUCUSFORMING BACTERIA *P. BACILLUS* ON ACTIVITY OF PHOTOSYNTHESIS IN FODGE BEANS UNDER DIFFERENT GLYPHOSATE CONTENT IN SOIL

**N. A. Mikhailouskaya, S. A. Kasyanchyk, T. B. Barashenko,
T. V. Pogirnitskaya, S. V. Dyusova**

Summary

Model inoculation experiments for cultivation of fodge beans were conducted in conditions of soil microcosm with artificially created levels of glyphosate content in soil: 0; 3; 10 and 50 l/ha in the field conditions. Stress effect of glyphosate on the growth, development and photosynthesis parameters of plants was observed. Application of strains *Bacillus circulans* K-81 and *Bacillus* sp. Kт for seed inoculation resulted in significant anti stress effects on plants at wide diapason of glyphosate content in soil. Plant's growth stimulation, the increase of assimilation leafs square as well as chlorophyll and carotenoid contents in leafs were observed.

Поступила 25.03.24

ОСАДКИ СТОЧНЫХ ВОД: ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Н. В. Емельяненко¹, Т. М. Германович²

*¹Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова, г. Минск, Беларусь*

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы производственной деятельности, расширения сферы взаимодействия человека и природы, обусловленные научно-техническим прогрессом, сопровождаются истощением сырьевых и энергетических ресурсов, неуклонным возрастанием демографической нагрузки на природу, ухудшением качества окружающей природной среды, нарушением естественных экологических балансов саморегуляции биосферы.

В первой половине XXI в. последствия антропогенного воздействия человека на окружающую его природную среду, имеющие, как правило, негативный характер, как для самого человечества, так и для окружающей его природной среды, достигли планетарного, или глобального масштаба, когда они стали сказываться на жизнедеятельности каждого живущего на Земле человека, вызывая необходимость охраны среды обитания.

Охрана окружающей среды является приоритетным направлением государственной политики Республики Беларусь. Экологическое законодательство, обеспечивающее правовую защиту природной среды – основа государственного регулирования природоохранной деятельности.

Одной из глобальных проблем мира является обращение с производственными и коммунальными отходами, переход на малоотходные и безотходные экологически чистые технологии производства высококачественной продукции, максимальное использование вторичных ресурсов, что будет способствовать оздоровлению окружающей среды и человека, дальнейшему прогрессивному и гармоничному развитию техногенного мира.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование базируется на анализе литературных источников, связанных с проблематикой образования отходов и их недостаточной утилизацией. В качестве объекта исследования были выбраны осадки сточных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Беларуси создана правовая база для деятельности по обращению с отходами. Система обращения с отходами ориентирована на соблюдение принципа приоритетности использования отходов по отношению к их захоронению и на их вовлечение в гражданский оборот, на максимальное использование ресурсного потенциала отходов.

В соответствии с Законом Республики Беларусь от 20 июля 2007 г. № 271-3 «Об обращении с отходами» координацию деятельности в сфере обращения с ВМР осуществляет Министерство жилищно-коммунального хозяйства путем создания государственной некоммерческой специально уполномоченной организации – оператора в сфере обращения со вторичными материальными ресурсами.

Согласно Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами, уровень использования ТКО в 2025 г. должен составить 50 %, в 2030 г. – 70 %, а в 2035 г. – 90 % от общего числа отходов [4].

Образование отходов производства на территории Беларуси происходит неравномерно. Значительные колебания характерны для отходов производства, объемы твердых коммунальных отходов варьируют от 20,6 до 22,7 кг/1000 \$ ВВП (рис. 1).



Рис. 1. Образование отходов производства и ТКО в расчете на единицу ВВП по ППС в Республике Беларусь (килограммов на тысячу долларов, ВВП по ППС в сопоставимых ценах 2017 г.)

Все большую остроту и актуальность в мире приобретает в последние годы проблема утилизации осадков сточных вод, так как рост осадков сточных вод крайне негативно влияет на природную окружающую среду в районах, где они накапливаются и размещаются.

ЮНЕП – мировая экологическая организация, совместно с GRID-Arendal, центром экологической информации рекомендуют правительствам и предприятиям рассматривать сточные воды как возможность для экономической модели замкнутого цикла, указывая на возможность извлечения дополнительных ресурсов, которые уже приносят пользу различным отраслям промышленности, в том числе сырье для производства бумаги, полимеров, пестицидов, резины, красок, биодизельного топлива, пищевых консервантов и ароматизаторов, огнеупорных и гидроизоляционных тканей, медицинских и ювелирных изделий, упаковки пищевых продуктов, средств гигиены и других товаров сельскому хозяйству, благодаря повторному использованию азота, фосфора и калия, добытых из сточных вод, уменьшению зависимости от синтетических удобрений и компенсации 13,4 % мирового спроса на сельскохозяйственные удобрения [3].

Потребление воды – одного из основных компонентов природной среды, имеющего для человека первостепенное значение, постоянно возрастает, так как она является неотъемлемой частью технологического процесса для большинства видов экономической деятельности. В результате использования водных ресурсов в производстве и быту образуются сточные воды, содержащие различные загрязняющие вещества и показатели.

Качество поверхностных и подземных вод Беларуси формируется под влиянием комплекса факторов природного и антропогенного происхождения, среди которых отведение коммунально-бытовых и производственных сточных вод, вынос загрязняющих веществ с поверхностным стоком с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий [6].

В Республике Беларусь сброс сточных вод осуществляется преимущественно в поверхностные водные объекты. Его доля составляет 89,8 % от общего объема сброса сточных вод в окружающую среду. За последние пять лет данный показатель снизился на 1,3 % и составляет $1034,5 \cdot 10^6$ м³, из них $1018,2 \cdot 10^6$ м³ – в водотоки.

Сброс сточных вод в поверхностные водные объекты осуществляется через 635 выпусков, их количество за последние пять лет увеличилось на 107 выпусков в результате организации учета и контроля поверхностных сточных вод. Больше всего выпусков сточных вод организовано в бассейнах рек Неман и Днепр, меньше всего – в бассейне реки Западный Буг.

В структуре сточных вод наибольший объем занимают нормативно очищенные сточные воды – $692,5 \cdot 10^6$ м³, или 66,9 % от объема сброса сточных вод в поверхностные водные объекты. Сброс недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты в 2020 г. составил $2,7 \cdot 10^6$ м³, или 0,3 % от общего объема сброса сточных вод в поверхностные водные объекты. В целом за последние пять лет сброс недостаточно очищенных сточных вод сократился на 57,8 %.

Для организации сброса сточных вод в окружающую среду применяется 2741 очистное сооружение, из них на 319 проводится искусственная биологическая очистка с выпуском в поверхностные водные объекты. Строительство сооружений биологической очистки, на эксплуатацию которых необходимо получать разрешение на специальное водопользование, значительно сократило объем сточных вод, которые направлялись на поля фильтрации, однако до настоящего времени поля фильтрации продолжают оставаться самым распространенным видом очистных сооружений.

Очистка в естественных условиях в 2020 г. осуществлялась с применением 1752 полей фильтрации суммарной площадью 3677 га и фактическим объемом сброса сточных вод $48,3 \cdot 10^6$ м³ [6].

Для республики поля фильтрации, представляющие очистные сооружения сточных вод, включающие сооружения механической очистки и сооружения естественной биологической очистки путем фильтрации через почвенный слой грунта, устраиваемые в виде спланированных участков земли (карт) с песчаными грунтами, супесями и легкими суглинками, разделенных ограждающими земляными валиками, являются традиционными очистными сооружениями, которые до конца 60-х годов прошлого столетия использовались повсеместно и были единственным и универсальным видом сооружений, применяемым для очистки сточных вод как промышленных предприятий, так и населенных пунктов. Во многих небольших

городах и агрогородках сточные воды очищаются на полях фильтрации, так как строительство подобных очистных сооружений экономически менее затратно.

Перечень нормируемых загрязняющих веществ в составе сточных вод, а также порядок установление нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод закреплены постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26 мая 2017 г. № 16 «О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод». Документ устанавливает максимально допустимые значения показателей и концентрации загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых, городских сточных вод, удаляемых в процессе биологической очистки, а также максимально допустимые значения показателей и концентраций загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод при их сбросе в поверхностные водные объекты в зависимости от видов экономической деятельности [2].

Оценка соответствия технологических процессов и этапов (видов) очистки сточных вод проводится в соответствии с экологическими нормами и правилами ЭкоНИП 17.06.06-005-2022 «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Требования по обеспечению экологической безопасности при эксплуатации очистных сооружений сточных вод, сбрасываемых в окружающую среду», утвержденными постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 13.12.2022 г. № 28-Т и предусматривает наблюдения за содержанием загрязняющих веществ в составе сточных вод, удаляемых в процессе их очистки, осуществляется путем отбора проб и проведения измерений концентраций загрязняющих веществ, показателей в составе сточных вод испытательными лабораториями, по методикам измерений, в соответствии с законодательством об обеспечении единства измерений, исправностью технологического оборудования, подачей на очистные сооружения реагентов, теплоносителей, топлива.

В Беларуси, в рамках реализации подпрограммы «Обращение с коммунальными отходами и использование вторичных материальных ресурсов» Государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2016–2020 годы, проделана масштабная работа по реконструкции и введению на предприятиях очистных сооружений, что позволило в 2022 г. достичь показателя нормативно очищенных сточных вод 99,8 % из $1,2 \cdot 10^6$ м³ сброса сточных вод в поверхностные водные объекты (рис. 2).

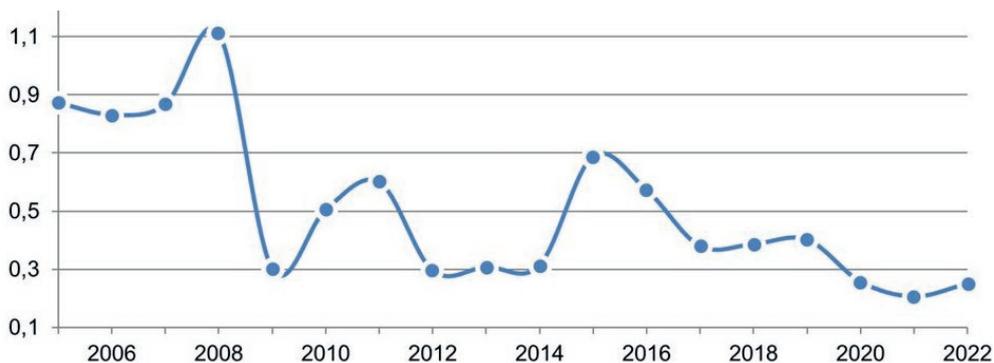


Рис. 2. Доля сточных вод с превышением нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в общем объеме стоков, (%)

Выполнению задачи повышения качества очистки сточных вод и надежности систем водоотведения будет способствовать реализация подпрограммы «Чистая вода» Государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 годы, предусматривающей реконструкцию и строительство 70 объектов.

В целях выполнения обязательств, принятых Республикой Беларусь по Протоколу по проблемам воды и здоровья, Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер 1992 г. до 2030 г. разработан комплекс мер, включающий перечень целевых показателей по Протоколу со сроками их достижения, мероприятий по их достижению, исполнителей мероприятий из числа республиканских органов государственного управления, иных организаций, подчиненных Правительству по компетенции, исполнительных и распорядительных органов, осуществляющих эксплуатацию систем водоотведения и других заинтересованных. В числе мероприятий наиболее значимы организация приборного учета сточных вод, сбрасываемых в централизованные коммунальные системы водоотведения населенных пунктов, сокращение массы сброса тяжелых металлов в составе сточных вод в поверхностные водные объекты после очистных сооружений, создания механизмов экономического стимулирования сокращения сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод, включая проработку вопроса об установлении ставок экологического налога за сброс сточных вод в зависимости от массы сброса загрязняющих веществ в сточных водах, внедрение экономически и экологически обоснованных методов переработки и использованию осадков сточных вод.

В последние десятилетия в мировой практике наметилась тенденция к максимальному вовлечению осадков очистных сооружений в хозяйственный оборот для получения ценной продукции. Средний процент осадков, используемых в сельском хозяйстве, в странах ЕС составляет около 40 % [4].

Осадки сточных вод содержат значительное количество биогенных веществ – азота, фосфора, калия. Наряду с органическим веществом и микроэлементами они определяют удобрительную ценность различных видов осадков.

По мнению некоторых авторов, химический состав осадков сточных вод (ОСВ) сильно варьируется и зависит от вида сточных вод (промышленные или бытовые сточные воды), способа их обработки, сезона накопления и т. д. Для ОСВ характерна загрязненность токсичными веществами, склонность к загниванию и зараженность патогенными микроорганизмами. В общей проблеме очистки сточных вод обработка осадков представляет собой наиболее сложный и еще окончательно не решенный вопрос, однако современные технологии позволяют избежать нерационального, материалоемкого, экологически опасного процесса полной ликвидации ОСВ путем их сжигания или неквалифицированного размещения в геосредах. Рациональное использование осадков подразумевает их утилизацию, с получением вторичных материальных ресурсов, применяемых в различных отраслях экономики [1].

Для производства органических удобрений не требуется высоких затрат энергии и материалов, дорогостоящего и сложного оборудования, так как в его основе биологические процессы взаимодействия осадка сточных вод и возможных дополнительных компонентов, позволяющих исключить негативное воздействие токсичных веществ, патогенных микроорганизмов организмов.

Ежегодно в нашей республике при очистке сточных вод образуется около $180\text{--}197 \cdot 10^3$ т осадков сточных вод по сухому веществу. Из них используется

в народном хозяйстве 4–5 % от всего объема. В основном осадки складываются и хранятся на территории очистных сооружений.

В международной правовой практике осадки очистных сооружений канализации и близкие им по составу осадки сточных вод ряда производств, относятся к группе отходов, обращение с которыми регулируется отдельными нормативными правовыми актами.

Большое влияние на практику обращения с осадками сточных вод и нормы, закрепленные в актах законодательства многих стран, оказали Директива ЕЭС 86/278/ЕЭС от 12 июня 1986 года по охране окружающей среды, в частности, почвы, при использовании осадков сточных вод в сельском хозяйстве. Документ устанавливает систему требований, ограничений и условий, выполнение которых должно обеспечить защиту здоровья человека и окружающей среды при использовании осадков; регламентирует: технологии обработки осадков перед их использованием; максимальное количество осадков (по сухому веществу), вносимых в почву на единицу площади в год; определяет условия, при которых может быть разрешено использование необработанного осадка; устанавливает минимальную частоту (периодичность) анализа состава осадков; требует получения разрешения на использование необработанных осадков на почве и др. Специальному регулированию подлежат предельные значения концентраций тяжелых металлов (кадмий, медь, никель, свинец, цинк, ртуть, хром) в почвах, которые не должны превышать при использовании осадков; предельные значения концентраций тяжелых металлов в осадках; максимальная годовая нагрузка по каждому нормируемому тяжелому металлу, создаваемую при внесении осадка в почву [5].

В 2017 г. 51 % общего объема осадка сточных вод в Европе было утилизировано в качестве органического удобрения (35 % в виде обработанного осадка, 16 % в виде компоста), 44 % было направлено на сжигание и 5 % захоронено на полигонах.

В странах ЕС утилизация осадка сточных вод путем внесения продукта в почву признана устойчивой и в целом поддерживается, однако на практике не одинакова.

В Республике Беларусь деятельность по обращению с осадками сточных вод не выделяется отдельными нормативными актами, регламентируется Законом «Об обращении с отходами», общими для отходов НПА и ТНПА, однако необходимость пересмотра подходов к нормативному правовому регулированию обращения с осадками очистных сооружений канализации актуальна.

ВЫВОДЫ

При эксплуатации биологических очистных сооружений очистки городских сточных вод образуются осадки сточных вод, утилизация которых является сложной экологической и технологической проблемой.

В настоящее время основной способ утилизации осадков сточных вод заключается в складировании обезвоженных осадков на очистных сооружениях, где в течение длительного времени протекает биодegradация отходов. Такой метод не отвечает современным экологическим и техническим требованиям, приводит к отчуждению значительных земельных ресурсов, сопровождается экологическими рисками загрязнения подземных вод в зоне влияния мест складирования отходов.

Основной негативной составляющей, определяющей качество ОСВ, является наличие в них тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов. Однако наличие

в них таких элементов, как азот и фосфор положительно влияет на показатели плодородия почвы и дает возможность использования в качестве удобрительных смесей.

На данный момент в Республике Беларусь не регулируется применение осадка в качестве удобрения в сельском хозяйстве. При этом имеется документ, в котором установлены применимые требования по содержанию загрязняющих веществ в почве и допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов, М. М. Выбор оптимального и актуального для сельского хозяйства метода переработки осадков сточных вод / М. М. Гаврилов, А. А. Пименов, П. Е. Красников // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 63–67.

2. Голод, Ю. В. Совершенствование подходов к нормированию сбросов сточных вод в окружающую среду через системы канализации населенных пунктов / Ю. В. Голод, С. А. Дубенок // Природные ресурсы. – 2021. – № 2. – С. 49–58.

3. Доклад ООН: канализация таит в себе многообещающее решение проблемы изменения климата и утраты природы [Электронный ресурс] // Российский национальный комитет содействия Программе ООН по окружающей среде. – Режим доступа // <http://www.unepcom.ru/news/news2023/5633-230823wastes.html> – Дата доступа: 19.11.2023.

4. Зеленые принципы в действии [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды. – Режим доступа // <https://minpriroda.gov.by/printv/ru/news-ru/view/pervye-rezultaty-realizatsii-programmy-zelenoj-ekonomiki-mozhno-nazvat-uspeshnymi-ivan-prihodko-4940/>. – Дата доступа: 19.11.2023.

5. Марцуль, В. Н. Нормативное правовое регулирование обращения с осадками очистных сооружений канализации / В. Н. Марцуль // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения: материалы Международной конференции, посвященной 145-летию УП «Минскводоканал», Минск, 13–14 февраля 2019 г.: в 2 ч. – Минск: БГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 195–200.

6. О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 22 фев. 2022, № 91 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: 19.11.2023.

SEWAGE SLUDGE: PROBLEMS AND OPPORTUNITIES FOR THEIR USE IN AGRICULTURE

N. V. Emelyanenko, T. M. Germanovich

Summary

In world practice, there are many waste processing technologies. However, the use of most of them leads to an increasing accumulation in nature of gaseous, liquid and solid components, causing irreversible damage to the environment. In the Republic of Belarus, the problem of recycling wastewater sludge from industrial enterprises is quite acute due to the increased content of highly toxic substances in them. In this regard, there is a need to develop rational ways for their safe processing.

Поступила 21.05.24

ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА В ДЕЙСТВИИ И ПОСЛЕДЕЙСТВИИ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

В. И. Сороко, Г. В. Пироговская, С. С. Хмелевский,
А. С. Лемешевская, Т. В. Гарбузова, И. Н. Некрасова, Д. Г. Переход

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

По своему значению сера находится в одном ряду с азотом, фосфором и калием. Она участвует в процессах азотного обмена, синтеза белка, круговороте калия, кальция, магния, повышает содержание хлорофилла. Роль серы возросла в интенсивном высокоурожайном земледелии, так как при низкой урожайности вынос серы компенсируется за счет высвобождения ее из минеральных и органических соединений почвы, а также за счет привнесения с атмосферными осадками. Возросший вынос с высокими урожаями, снижение выбросов серы в промышленности и применение более концентрированных удобрений обусловили научный интерес к изучению агротехнических приемов повышения содержания серы в почве и внесению серосодержащих удобрений под сельскохозяйственные культуры [1–13].

В условиях интенсивного земледелия серосодержащие удобрения рекомендуется вносить на почвах с низкой и средней обеспеченностью серой и, в первую очередь, под требовательные или отзывчивые на ее внесение культуры [2, 3, 6, 10, 12].

Исследователями, изучающими данную проблему, были установлены существенные прибавки урожая зерна бобовых культур от внесения серосодержащих удобрений в почву и некорневых подкормок сульфатами, разработаны параметры почвенной и растительной диагностики питания серой и магнием, позволяющие выявить необходимость внесения серосодержащих удобрений в почву и некорневых подкормок сульфатами [3, 6]. В определенной степени изучено применение серосодержащих удобрений под сахарную свеклу, рапс [8, 11, 12]. Имеются сведения о влиянии видов и доз удобрений на вынос и баланс элементов питания, в том числе и серы, при возделывании капусты белокочанной [13]. Разрабатываются методические подходы к расчету и картированию критических нагрузок серы и азота на экосистемы Беларуси [14], что может быть актуально при высоких дозах внесения мелиорантов, минеральных и органических удобрений.

Предыдущими исследователями установлено, что под культуры, требовательные к сере необходимо ее вносить от 40–60 до 140 кг/га д. в. Сера в почве в основном (75–90 % от общего содержания) находится в органической форме в составе гумуса и других соединений и доступна после минерализации. Процент почв с низким и средним (1 + 2 группа) содержанием серы в почвах республики в последние годы снизился до 90 %, поэтому урожай и качество сельскохозяйственных культур в значительной степени зависит от внесения серосодержащих удобрений.

В мировой практике применяется широкий ассортимент серосодержащих удобрений. В Республике Беларусь, а также в других странах основным серосодержащим удобрением является сульфат аммония (20,5 % азота и 24,0 % серы). Применяются также микроудобрения – марганец сернокислый (14–17 % S), сульфат цинка (11,2 % S), сульфат магния (18,6 % S), разработаны и производятся жидкие формы серосодержащих удобрений для применения в основное внесение и подкормки [2–4, 6, 7, 12]. Из-за высокой стоимости минеральных удобрений вызывают интерес более дешевые источники серы в качестве удобрений для сельскохозяйственных культур. Важным резервом восполнения дефицита серы является фосфогипс (23,4 % S), влияние которого на урожай и качество культур в сравнении с другими серосодержащими удобрениями недостаточно изучено. Также не до конца решены вопросы внесения фосфогипса в условиях хозяйств.

В связи с изменением климата, увеличение засушливых периодов вегетации представляет интерес изучение последствий серы, внесенной с удобрениями, в том числе и с фосфогипсом, на урожай последующих культур.

Исследования, направленные на разработку рациональных приемов внесения фосфогипса в качестве серосодержащего удобрения с оценкой действия на рост, развитие и урожайность растений, качество продукции в сравнении с промышленными серосодержащими удобрениями (сульфат аммония, сульфоаммофос) приобретают особую актуальность, что и определило цель наших исследований, проведенных на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной и легкосуглинистой почвах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования по изучению сравнительной эффективности серосодержащих удобрений в форме фосфогипса, сульфата аммония и сульфоаммофоса проводились в полевых опытах с пшеницей озимой и рапсом яровым в 2022–2023 гг. на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ОАО «Гастелловское» Минского района Минской области) и в опытах с картофелем и тритикале яровой на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве (экспериментальная база им. Котовского Узденского района Минской области). Последствие фосфогипса, вносимого под картофель изучалось на тритикале яровой.

Перед закладкой опытов почва имела следующие агрохимические показатели:

- в опыте с пшеницей озимой сорта Бонанза (2022–2023 гг.): гумус – 2,81 % (среднее по делянкам); кислотность pH_{KCl} – 6,02, P_2O_5 – 516 и K_2O – 273 мг/кг почвы, Ca – 1220, Mg – 107 мг/кг почвы;
- с рапсом яровым сорта Гедемин (2022–2023 гг.): гумус – 2,35 %, кислотность pH_{KCl} – 5,83, P_2O_5 – 518 и K_2O – 367 мг/кг почвы, Ca – 1367, Mg – 138 мг/кг почвы;
- с картофелем сорта Рубин (2022 г.) и яровой тритикале Гелио (2023 г.): гумус – 2,43–2,69 %, pH_{KCl} – 5,39–5,43, P_2O_5 – 239–293 и K_2O – 211–295 мг/кг почвы, Ca – 644–737, Mg – 68–78 мг/кг.

Содержание серы в почве перед закладкой полевых опытов низкое – от 2,6 до 6,2 мг/кг почвы, что в среднем соответствует первой группе (< 6,0) обеспеченности [15].

Исследования проводили согласно существующим методикам по закладке полевых опытов [16,17].

Схемы опытов представлены в таблицах результатов исследований.

Серу в опытах вносили под предпосевную культивацию в виде фосфогипса (23,5 % S), сульфата аммония (24 %) и сульфоаммофоса (14 %). В варианте без серы азотные удобрения вносили в виде мочевины. В опыте с пшеницей фосфогипс вносился двумя способами – в один и два срока, в первую и вторую подкормку.

Почвенные образцы отбирали из пахотного горизонта, пробы анализировали в соответствии с общепринятыми методиками:

- гумус – по методу И. В. Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-84);
- обменная кислотность pH_{KCl} – потенциометрический (ГОСТ 26483-85);
- содержание подвижного фосфора – по Кирсанову на фотоэлектроколориметре (ГОСТ 26207-84);
- содержание подвижного калия – по Кирсанову на пламенном фотометре (ГОСТ 280207-84);
- кальций и магний – на атомно-абсорбционном спектрофотометре;
- содержание серы – по ГОСТ 26490-85;
- отбор проб – ГОСТ 26483-85.

Отбор растительных образцов (основной и побочной продукции) и их анализ проводили, согласно существующих ГОСТ и ОСТ:

- отбор проб – ГОСТ 18691-83;
- определение азота, фосфора, калия, кальция, магния, серы после мокрого озоления (смесью серной кислоты и перекиси водорода) общепринятыми методами: азот – ГОСТ 13496.4-93 п. 2; фосфор – спектрофотометрически; калий – на пламенном фотометре; кальций – ГОСТ 26570-95; магний ГОСТ 30502-97 – на атомно-адсорбционном спектрофотометре; сера – фотоколориметрическим методом.

Агротехника возделываемых культур общепринятая для Республики Беларусь [18, 19].

Уход за посевами проводили препаратами, внесенными в Государственный реестр [20].

Статистическая обработка результатов исследований проведена по Б. А. Доспехову с использованием соответствующих программ дисперсионного анализа на персональном компьютере, наименьшая существенная разность рассчитывалась с помощью компьютерной программы Excel [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метеорологические условия 2022–2023 гг. были следующими. При возделывания озимой пшеницы и ярового рапса на легкосуглинистой почве количество выпавших атмосферных осадков в 2022 г. составляло: в апреле – 111,0 мм (257,5 % от среднемноголетних значений), в мае – 74,7 мм (113,5 %), июне – 57,5 мм (72,6 %), июле – 73,1 мм (75,0 %), августе – 4,0 мм (5,6 %). За вегетационный период (апрель–август) количество осадков составило 320,3 мм (89,8 % от нормы). В 2023 г. осадки в апреле были на уровне среднемноголетних значений, май и июнь были засушливыми, в июле–августе выпало 62,5 и 81,2 мм, что составляло 64,1–114,4 % от среднемноголетних значений, а за вегетационный период выпало 214,7 мм (60,2 %).

При возделывании картофеля в 2022 г. на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве в апреле выпало 125,3 мм (322,9 % от среднееголетних значений), мае – 55,8 мм (88,9 %), июне – 48,7 мм (64,6 %), июле – 85,7 мм (96,3 %), августе – 29,9 (44,3 %). В целом за апрель-август выпало 345,4 мм (95,2 %) от среднееголетних значений. При возделывании на этой же почве в 2023 г. яровой тритикале май и июнь были засушливыми, в июле-августе выпало 50,6 и 61,8 мм (62,5–94,1 %) и за вегетационный период – 213,8 мм, или 58,9 % от уровня среднееголетних значений.

Урожайность озимой пшеницы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в период исследований была высокой и в среднем за два года находилась в пределах: в блоке 1 ($N_{60+40+40+20}$) – от 65,9 до 72,1 ц/га, в блоке 2 ($N_{70+40+40+20}$) – от 68,2 до 73,0 ц/га, при урожайности на контрольном варианте – 44,7 ц/га (табл. 1).

Таблица 1

Урожайность зерна озимой пшеницы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в ОАО «Гастелловское» Минского района, 2022–2023 гг.

Варианты	Внесено серы, кг/га	Урожайность зерна, ц/га (14 % влажности)			Прибавка, от серы ц/га
		2022	2023	среднее	
1. Контроль без удобрений	0	55,6	33,8	44,7	–
блок 1 – $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{160} (N_{60} + N_{40} + N_{40} + N_{20})$					
2. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{60} + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	0	73,7	58,1	65,9	–
4. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{60} (S_{69}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	69	76,6	60,9	68,7	2,8
5. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{60} + N_{40} + N_{40} + N_{20} + Cu$ и Mn (по 50 г/га) в стадию первого узла	69	77,5	63,4	70,5	4,6
8. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{60} (S_{69} - \text{фосфогипс}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	69	75,4	62,2	68,8	2,9
7. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{60} (S_{69}) + Naa_{40} (S_{45,6}) + N_{40} + N_{20}$	114,6	77,7	66,4	72,1	6,2
10. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{60} (S_{69} - \text{фосфогипс}) + N_{40} (S_{45,6} - \text{фосфогипс}) + N_{40} + N_{20}$	114,6	77,9	65,5	71,7	5,8
блок 2 – $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{170} (N_{70} + N_{40} + N_{40} + N_{20})$					
3. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{70} + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	0	76,9	59,4	68,2	–
6. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{70} (S_{80}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	80	79,8	66,1	73,0	4,8
9. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{70} (S_{80} - \text{фосфогипс}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	80	77,9	65,4	71,7	3,5
НСР _{0,5}	–	4,01	3,90	3,96	–

Качество зерна озимой пшеницы оценивалось по содержанию протеина, клейковины, массе 1000 зерен и содержанию элементов питания в зерне (табл. 2, 3).

Таблица 2

**Влияние удобрений на показатели качества зерна озимой пшеницы
на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве
в ОАО «Гастелловское» Минского района, 2022–2023 гг.**

Варианты	Протеин, %			Клейковина, %			Масса 1000 зерен, г
	2022	2023	среднее	2022	2023	среднее	среднее за 2 года
1. Контроль без удобрений	11,6	8,8	10,2	18,0	17,4	17,7	40,3
блок 1 – $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{160} (N_{60} + N_{40} + N_{40} + N_{20})$							
2. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{60} + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	12,9	12,6	12,8	25,3	22,6	24,0	45,6
4. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{60} (S_{69}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	13,8	13,3	13,6	24,9	25,1	25,0	45,3
5. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{60} + N_{40} + N_{40} + N_{20} + Cu$ и Mn (по 50 г/га) в стадию первого узла	14,4	13,6	14,0	27,5	25,1	26,3	48,6
8. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{60} (S_{69} - \text{фосфогипс}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	13,8	13,2	13,5	27,7	24,1	25,9	46,2
7. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{60} (S_{69}) + Naa_{40} (S_{45,6}) + N_{40} + N_{20}$	13,6	12,9	13,3	25,9	23,6	24,8	46,9
10. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{60} (S_{69} - \text{фосфогипс}) + N_{40} (S_{45,6} - \text{фосфогипс}) + N_{40} + N_{20}$	14,7	13,0	13,9	28,2	24,4	26,3	48,6
блок 2 – $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{170} (N_{70} + N_{40} + N_{40} + N_{20})$							
3. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{70} + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	13,6	12,6	13,1	25,6	22,9	24,3	46,0
6. $N_{30}P_{60}K_{130} + Naa_{70} (S_{80}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	14,2	12,9	13,6	27,0	23,9	25,5	45,5
9. $N_{30}P_{60}K_{130} + N_{70} (S_{80} - \text{фосфогипс}) + N_{40} + N_{40} + N_{20}$	14,0	12,9	13,5	28,6	23,7	26,2	46,1
НСР ₀₅	0,69	0,57	0,63	1,51	1,32	1,41	2,41

Исследованиями установлено, что при внесении серы в дозах 69 и 80 кг/га в вариантах с сульфатом аммония и фосфогипсом в первую ранневесеннюю подкормку (в эквивалентных по сере дозах), урожайность зерна пшеницы была в близких пределах (68,7–68,8 и 71,7–73,0 ц/га), а незначительные различия находились в пределах наименьшей существенной разности. Аналогичная закономерность наблюдалась и в вариантах с внесением более высоких доз серы (114,6 кг/га, вар. 7 и 10), где урожайность составила 72,1 и 71,7 ц/га соответственно.

Прибавка зерна пшеницы от внесения 69 кг/га серы на фоне N_{60} в первую подкормку (блок 1) составила в среднем за два года 2,8–2,9 ц/га, при более высокой дозе серы 114,6 кг/га, внесенной в два приема (69 + 45,6), повышалась до 5,8–6,2 ц/га

при НСР = 3,96 ц/га. Внесение дозы серы 80 кг/га в форме фосфогипса и сульфата аммония на фоне N_{70} в первую подкормку (блок 2) обеспечивало тенденцию или достоверную прибавку урожая зерна на уровне 3,5–4,8 ц/га (табл. 1).

Содержание протеина в зерне озимой пшеницы в варианте без внесения удобрений (контроль) в оба года исследований было наименьшим и составляло в среднем 10,2 % (от 8,8 до 11,6 %), с наиболее высоким содержанием в 2022 г. Внесение в опыте удобрений увеличило содержание протеина до 12,8–13,9 %. Серосодержащие удобрения, внесенные в первую или первую и вторую подкормки, способствовали преимущественно увеличению содержания протеина на 0,5–1,2 % (блок 1) или тенденции его увеличения на 0,4–0,5 % (блок 2) по отношению к вариантам без внесения серы. Существенных различий между формами серосодержащих удобрений не отмечалось (табл. 2).

Внесение серосодержащих удобрений повышало содержание клейковины. Увеличение было близким к достоверному или достоверным в зависимости от формы и дозы применяемых удобрений и метеорологических условий. В более благоприятном 2022 г. содержание клейковины варьировало от 24,9 до 28,6 %, с наименьшим содержанием на контроле (18,0 %). Внесение дозы серы S_{69} в форме фосфогипса на фоне карбамида в первую ранневесеннюю подкормку и $S_{114,6}$ (S_{69} и $S_{45,6}$) в первую и вторую подкормки обеспечивало существенное увеличение содержания клейковины в зерне озимой пшеницы – на 2,4–2,9 % (блок 1). Однократное применение фосфогипса (S_{80}) в блоке 2 способствовало увеличению содержания клейковины на 3,0 %, при внесении сульфата аммония в той же дозе (S_{80}) ее содержание увеличивалось в меньшей степени на 1,4 %. В засушливом 2023 г. содержание клейковины в удобренных вариантах было ниже – 22,6–25,1 %, однако влияние серосодержащих удобрений имело такую же закономерность – при дозе серы 69 кг/га увеличивалось содержание клейковины от 22,6 до 24,1–25,1 % (на 1,5–2,5 %) без существенных различий между сульфатом аммония и фосфогипсом. Увеличение дозы серы в форме фосфогипса и сульфата аммония до 114,6 кг/га приводило к тенденции повышения содержания клейковины в зерне на 0,8–1,0 % (от 22,9 до 23,9–23,7 %). В среднем за два года серосодержащие удобрения повысили содержание клейковины на 1,0–2,3 % (табл. 2).

Удобрения оказали влияние на массу 1000 зерен озимой пшеницы, которая различалась по вариантам опыта и находилась пределах от 40,3 (контроль) до 45,3–48,6,0 г (NPK). Следует отметить, что в среднем за два года различия между вариантами с сульфатом аммония и фосфогипсом, внесенных в аналогичных по сере дозах, были статистически не значимы (табл. 2).

Урожайность маслосемян рапса ярового на легкосуглинистой почве в варианте без внесения серы (вар. 2) в среднем за годы исследований составляла 16,4 ц/га (табл. 4). Внесение серы в дозах 91 и 114 кг/га в виде сульфата аммония и фосфогипса (вар. 3–7) приводило к тенденции или достоверному увеличению урожайности семян рапса на 1,5–3,3 ц/га, по отношению к варианту без ее применения, при этом внесение серы с фосфогипсом в дозах S_{91-114} по эффективности было равноценным действию сульфата аммония, вносимого в эквивалентных дозах серы. Различия в урожайности (0,4–0,9 ц/га) находились в пределах наименьшей существенной разницы ($НСР_{0,5} = 1,65$ ц/га) (табл.3).

Таблица 3

Урожайность семян ярового рапса на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в ОАО «Гастелловское» Минского района, 2022–2023 гг.

Варианты	Внесено серы, кг/га	Урожайность зерна, ц/га (8 % влажности)			Прибавка от серы, ц/га
		2022	2023	среднее	
1. Контроль без удобрений	–	13,1	8,4	10,8	–
2. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ (базовый)	–	17,7	15,0	16,4	–
3. Naa ₈₀ (S ₉₁)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀	91	18,2	17,5	17,9	1,5
4. Naa ₁₀₀ (S ₁₁₄)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀	114	19,0	19,3	19,2	2,8
5. Naa ₁₀₀ (S ₁₁₄)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + В (40 г/га) и Мп (50 г/га) в стадию бутонизации	114	19,7	18,8	19,3	2,9
6. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + фосфогипс (S ₉₁)	91	19,1	18,4	18,8	2,4
7. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + фосфогипс(S ₁₁₄)	114	20,3	19,0	19,7	3,3
НСР _{0,5}		1,29	1,94	1,65	–

Влияние фосфогипса и сульфата аммония на качество урожая ярового рапса приведено в таблице 4. Так, в благоприятном 2022 г. внесение серы с сульфатом аммония в дозах 91 и 114 кг/га повышало масличность семян рапса на 0,7–1,0 %. Внесение серы с фосфогипсом в эквивалентных дозах обеспечивало лишь тенденцию увеличения масличности семян. В среднем за два года исследований сульфат аммония повысил масличность семян с 43,6 до 44,3–44,6 % (на 0,7–1,0 %), фосфогипс – до 43,9–44,5 % (0,3–0,9 %) (табл.4).

Таблица 4

Влияние серосодержащих удобрений на качество семян ярового рапса на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в ОАО «Гастелловское» Минского района, 2022–2023 гг.

Вариант	Масличность семян, %				Масса 1000 зерен, грамм			
	2022	2023	среднее	± к базовому	2022	2023	среднее	± к базовому
1. Контроль без удобрений	46,8	42,8	44,8	–	5,80	4,61	5,21	–
2. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ (базовый)	46,5	40,6	43,6	–	5,40	4,62	5,01	–
3. Naa ₈₀ (S ₉₁)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀	47,2	41,9	44,6	1,0	5,43	4,90	5,17	0,16
4. Naa ₁₀₀ (S ₁₁₄)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀	47,5	41,0	44,3	0,7	5,53	4,79	5,16	0,15
5. Naa ₁₀₀ (S ₁₁₄)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + В (40 г/га) и Мп (50 г/га) в стадию бутонизации	47,6	40,9	44,3	0,6	5,80	4,92	5,36	0,35
6. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + фосфогипс (S ₉₁)	47,0	42,0	44,5	0,9	5,40	5,06	5,23	0,22
7. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + фосфогипс(S ₁₁₄)	46,6	41,1	43,9	0,3	5,65	4,74	5,20	0,19
НСР _{0,5}	0,60	2,40	1,75	–	0,33	0,28	0,31	–

Масса 1000 семян ярового рапса на контрольном варианте в 2022 г. составляла 5,80 г. Внесение удобрений снижало этот показатель на 0,15–0,40 г. При этом внесение серосодержащих удобрений приводило к тенденции повышения массы 1000 семян на 0,03–0,25 г по отношению к варианту, где сера не вносилась. В 2023 г. наблюдалась тенденция или достоверное повышение массы семян (0,12–0,44 г) и в среднем за два года серосодержащие удобрения повысили массу 1000 семян на 0,15–0,22 г при $HCP_{0,5} = 0,31$ (табл. 4).

Содержание элементов питания в семенах рапса ярового, в первую очередь, азота изменялось при внесении NPK и серосодержащих удобрений. Содержание общего азота в варианте без удобрений составляло в среднем за 2 года 1,61 % и возрастало в вариантах с удобрениями до 1,99–2,10 %. Серосодержащие удобрения обеспечивали тенденцию или достоверное увеличение (на 0,03–0,20 %) содержания общего азота в сравнении с вариантом без серы. Следует отметить, что фосфогипс в дозе S_{114} достоверно увеличил содержание общего азота относительно варианта с сульфатом аммония на 0,17 %. В 2023 г. влияние серосодержащих удобрений на содержание азота прослеживалось в меньшей степени, отмечена лишь тенденция его увеличения. В среднем за два года содержания азота повышалось от 1,99 % до 2,00–2,10 % – на 0,01–0,11 % при $HCP_{0,5} = 0,14$ (табл. 5).

Содержание фосфора изменялось от 1,90 % на контроле до 1,85–2,00 % без значимых различий между вариантами. Другие показатели химического состава семян рапса ярового при внесении удобрений изменялись в следующих пределах: содержание калия – от 1,01 % до 1,14 %, кальция – от 0,35 до 0,41 % (с увеличением от серосодержащих удобрений на 0,03–0,06 %) и магния – от 0,34 до 0,42 % (табл. 5).

Содержание протеина в варианте без удобрений было минимальным – 10,1 %, и достоверно увеличивалось в удобренных вариантах – до 12,4–13,1 %. Внесение в опыте эквивалентных доз серы с фосфогипсом и сульфатом аммония показало равное их влияние на содержание протеина в семенах рапса, разница в 0,4–0,5 % находилась на уровне тенденции (табл. 5).

Таблица 5

Влияние фосфогипса на содержание элементов питания и протеина в семенах рапса на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в ОАО «Гастелловское» Минского района, 2022–2023 гг.

Варианты	Содержание, % на сухое вещество					
	N общ.	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Протеин
1. Контроль без удобрений	1,61	1,90	1,01	0,36	0,34	10,1
2. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ (базовый)	1,99	2,00	1,11	0,35	0,41	12,4
3. Naa ₈₀ (S ₉₁)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀	2,00	1,93	1,12	0,38	0,38	12,5
4. Naa ₁₀₀ (S ₁₁₄)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀	2,03	1,88	1,10	0,38	0,38	12,7
5. Naa ₁₀₀ (S ₁₁₄)P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + В (40 г/га) и Мп (50 г/га) в стадию бутонизации	2,06	1,85	1,06	0,62	0,40	12,8
6. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + фосфогипс (S ₉₁)	2,08	1,94	1,11	0,38	0,38	13,0
7. N ₁₀₀ P ₆₀ K ₁₁₀ + N ₄₀ + фосфогипс(S ₁₁₄)	2,10	1,95	1,14	0,41	0,42	13,1
HCP _{0,5}	0,14	0,12	0,08	0,027	0,024	0,83

На дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве фосфогипс вносился под первую культуру звена севооборота (картофель, 2022 г.), а первый год последствия изучался на яровом тритикале (2023) (табл. 7, 9). Схема включала три системы удобрения – минеральную, органическую и органоминеральную с различными формами серосодержащих удобрений (сульфат аммония, сульфоаммофос экстра (17-17-0-16S-CaO) и фосфогипс). Дозы серы вносимые под картофель с удобрениями составили S_{78} и S_{91} кг/га д. в.

Влияние серосодержащих удобрений на урожайность картофеля на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве приведено в таблице 6. В условиях 2022 г. в зависимости от систем и форм применяемых удобрений, сформировался достаточно высокий урожай клубней: в варианте без удобрений получено 165 ц/га клубней, на минеральной системе удобрения – 189–256 ц/га, на органической – 184–213 ц/га, на органоминеральной – 251–266 ц/га.

Внесение серы в дозе 71 кг/га д. в. с сульфоаммофосом на минеральной системе удобрения, повышало урожай клубней картофеля до 250 ц/га – на 18 ц/га. Применение фосфогипса в такой же дозе (S_{71}) обеспечивало урожайность клубней картофеля в размере 256 ц/га, что свидетельствует об одинаковой эффективности с сульфоаммофосом (табл. 6).

Таблица 6

Влияние серосодержащих удобрений на урожайность клубней картофеля на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве в ПРУП «Экспериментальная база им. Котовского» Узденского района, 2022 г.

Варианты	Урожайность клубней	Прибавка, ц/га	
		к контролю	к NPK ст (вар.3)
1. Контроль без удобрений	165	–	–
Минеральная система удобрения			
2. $N_{20}P_{75}K_{140}$ (базовый)	189	24	–
3. $N_{100}P_{75}K_{140}$ ст	232	67	–
4. $N_{100}P_{75}$ (сульфоаммофос) (S_{71}) + K_{140}	250	85	18
5. $N_{100}P_{75}K_{140}$ ст + фосфогипс (S_{71})	256	91	24
Органическая система удобрения			
6. OY_1 (12 т/га)*	199	34	–
7. OY_1 (12 т/га) + фосфогипс (S_{71})	213	48	14
8. OY_2 (16 т/га)	184	19	–
9. OY_2 (16 т/га) + фосфогипс (S_{71})	200	35	16
Органоминеральная система удобрения			
10. OY_1 + $N_{100}P_{75}K_{140}$ + фосфогипс(S_{80})	260	95	28
11. OY_1 + $N_{100}P_{75}K_{140}$ + фосфогипс (S_{91})	266	101	34
12. OY_1 + Naa_{80} (S_{91}) + N_{20} + $P_{75}K_{140}$	258	93	26
13. OY_2 + $N_{100}P_{75}K_{140}$ + фосфогипс (S_{91})	251	86	19
14. OY_2 + Naa_{80} (S_{91}) + N_{20} + $P_{75}K_{140}$	252	87	20
$HCP_{0,5}$	16,9	–	–

* среднегодовая доза органических удобрений (OY) в пятипольном севообороте.

Фосфогипс, применяемый на органической системе удобрения в дозе S_{71} , повышал урожайность клубней на 14–16 ц/га ($НСР_{0,5} = 16,9$ ц/га).

Внесение фосфогипса (S_{91}) на органоминеральной системе удобрения обеспечило получение урожайности клубней от 251 до 266 ц/га, что равноценно вариантам с сульфатом аммония в эквивалентной дозе (S_{91}) – 252–258 ц/га. Внесение дозы S_{80} в форме фосфогипса (вар. 10) обеспечило урожай на уровне S_{91} – 260 ц/га клубней (табл. 6).

Качество клубней картофеля оценивалось по содержанию крахмала, нитратов, протеина, товарности клубней (табл.7), а также по содержанию основных элементов питания.

Таблица 7

Влияние серосодержащих удобрений на качество клубней картофеля на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве в ПРУП «Экспериментальная база им. Котовского» Узденского района, 2022 г.

Вариант	Крахмал, %	Товарность, %	Нитраты, мг/кг
1. Контроль без удобрений	15,3	78,5	28,6
Минеральная система удобрения			
2. $N_{20}P_{75}K_{140}$	15,3	90,3	53,2
3. $Nm_{100}P_{75}K_{140}$ ст – базовый	15,0	88,5	93,0
4. $N_{100}P_{75}$ (сульфоаммофос) (S_{71}) + K_{140}	15,3	89,7	46,3
5. $Nm_{100}P_{75}K_{140}$ ст + фосфогипс (S_{71})	15,6	89,3	59,7
Органическая система удобрения			
6. OY_1 (12 т/га)	15,0	78,7	106,0
7. OY_1 (12 т/га) + фосфогипс (S_{71})	15,6	88,7	70,1
8. OY_2 (16 т/га)	15,3	79,4	129,5
9. OY_2 (16 т/га) + фосфогипс (S_{71})	15,8	85,0	109,0
Органоминеральная система удобрения			
10. OY_1 + $Nm_{100}P_{75}K_{140}$ + фосфогипс(S_{80})	15,3	89,2	70,7
11. OY_1 + $Nm_{100}P_{75}K_{140}$ + фосфогипс (S_{91})	14,6	92,1	57,0
12. OY_1 + Naa_{80} (S_{91}) + Nm_{20} + $P_{75}K_{140}$	13,8	92,5	80,3
13. OY_2 + $Nm_{100}P_{75}K_{140}$ + фосфогипс (S_{91})	15,4	90,5	67,0
14. OY_2 + Naa_{80} (S_{91}) + Nm_{20} + $P_{75}K_{140}$	14,9	92,0	70,1
$НСР_{0,5}$	0,58	3,2	–
ПДК	–	–	150

Содержание крахмала в зависимости от вариантов опыта изменялось от 13,8 до 15,8 %. На минеральной системе удобрения разные формы серосодержащих удобрений способствовали тенденции или достоверному увеличению содержания крахмала в клубнях картофеля (0,3–0,6 %), без существенных различий между вариантами с сульфоаммофосом и фосфогипсом. На органической системе удобрений (вар. 6–9) фосфогипс обеспечивал тенденцию или достоверное увеличение содержания крахмала – 0,5–0,6 %. На органоминеральной системе внесение фосфогипса (S_{80} и S_{91}) повышало содержания крахмала в клубнях в сравнении с сульфатом аммония (табл. 7).

Товарность клубней на контроле составляла 78,5 %, в удобренных вариантах – от 78,7 до 92,5 %. Внесение серы в форме фосфогипса не оказывало существенного влияния на изменение товарности клубней относительно сульфоаммофоса (вар. 4–5) или сульфата аммония (вар. 10–14) в эквивалентных по сере дозах. Применение фосфогипса (S_{71}) на органической системе удобрений способствовало увеличению товарности клубней на 5,6–10,0 % (85,0–88,7 %).

Содержание нитратов изменялось от 28,6 мг/кг в контрольном варианте до 53,2–129,5 мг/кг в вариантах с удобрениями и не превышало ПДК (ПДК = 150 мг/кг сырой массы клубней) (табл. 7).

Исследования по изучению последствий серосодержащих удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур немногочисленны [21]. В условиях республики рекомендовалось проведение кратковременных опытов с предварительным анализом содержания подвижной (сульфатной) серы в почве, а данные по последствию фосфогипса практически отсутствуют [22].

Последствие фосфогипса (первый год) изучалось в 2023 г. в опыте с яровой тритикале, где фосфогипс вносился под предшествующую культуру (картофель). Урожайность яровой тритикале была достаточно высокой для дерново-подзолистых рыхлосупесчаных почв: на контроле без удобрений получено 28,4 ц/га зерна, на фоне NPK – 42,4–45,1 ц/га. В первый год последствия не отмечено существенного влияния фосфогипса на урожайность зерна яровой тритикале, прослеживалась лишь тенденция ее увеличения: на 2,7 ц/га – на минеральной системе, на органической – 2,8–2,9 ц/га и 1,9–2,3 ц/га – на органоминеральной системе удобрения при $НСР_{0,5}$ – 3,29 ц/га (табл. 8).

Таблица 8

Влияние последствия фосфогипса (1-й год) на урожайность зерна яровой тритикале на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве, 2023 г.

Варианты	Урожайность зерна, ц/га (14 % влажности)	± к базовому
1. Контроль без удобрений	28,4	–
Минеральная система удобрения		
2. $N_{90}P_{60}K_{110}$ ст. – базовый	42,4	–
3. $N_{90}P_{60}K_{110}$ ст. (фосфогипс (S_{71}))	45,1	2,7
Органическая система удобрения (ЗУ)		
4. OY_1 (12 т/га)*	29,4	–
5. OY_1 (12 т/га) (фосфогипс (S_{71}))	32,3	2,9
6. OY_2 (16 т/га)*	29,8	–
7. OY_2 (16 т/га) (фосфогипс (S_{71}))	32,6	2,8
Органоминеральная система удобрения		
8. $OY_1 N_{90}P_{60}K_{110}$ (фосфогипс (S_{80}))	44,3	1,9
9. $OY_1 N_{90}P_{60}K_{110}$ (фосфогипс (S_{91}))	44,7	2,3
10. $OY_1 N_{90}P_{60}K_{110}$ (сульфат аммония (S_{91}))	42,9	0,5
$НСР_{05}$	3,29	

* 12 и 16 т/га – среднегодовая доза в пятипольном севообороте

Полученные данные свидетельствуют о необходимости ежегодного внесения серосодержащих удобрений под яровые зерновые, а также под другие сельскохозяйственные культуры на почвах с низким содержанием подвижной серы. В рекомендациях латвийских ученых отмечалось, что серосодержащие удобрения достаточно вносить один раз в 2–3 года [22].

Исследования показали, что фосфогипс в первый год последействия оказывает определенное влияние на качество зерна яровой тритикале. В большей степени это заметно на органической системе удобрения. Так, содержание протеина в зерне тритикале на органической системе удобрений без внесения серы находилось на уровне 11,1–12,5 % (вар.4, 6), на фоне последействия фосфогипса (S_{71}) – 14,5–16,2 % (вар.5, 7), что свидетельствует о благоприятном его влиянии на потребление азота растениями (табл. 9).

На минеральной системе удобрения ($N_{90}P_{60}K_{110}$) последействие фосфогипса отмечается в виде слабовыраженной тенденции увеличения содержания протеина от 17,9 до 18,7 % ($НСР_{0,5} = 1,09$). При органоминеральной системе удобрения также прослеживалась тенденция или достоверное увеличение содержания протеина от 17,9 % в базовом варианте до 18,3–19,6 % (на 0,4–1,7 %).

Таблица 9

Влияние последействия фосфогипса на качество зерна яровой тритикале, 2023 г.

Варианты	Содержание, %					
	Нобщ.	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg	Протеин
1. Контроль без удобрений	2,22	0,76	0,79	0,03	0,08	13,9
Минеральная система удобрения						
2. $N_{90}P_{60}K_{110}$ ст.	2,87	0,85	0,79	0,04	0,09	17,9
3. $N_{90}P_{60}K_{110}$ ст. (фосфогипс (S_{71}))	3,00	0,63	1,04	0,04	0,09	18,7
Органическая система удобрения (ЗУ)						
4. OY_1 (60 т/га)*	1,78	0,90	0,75	0,02	0,09	11,1
5. OY_1 (60 т/га) (фосфогипс (S_{71}))	2,32	0,75	0,76	0,03	0,08	14,5
6. OY_2 (80 т/га)*	2,00	0,75	0,70	0,03	0,07	12,5
7. OY_2 (80 т/га) (фосфогипс (S_{71}))	2,60	0,73	0,89	0,04	0,07	16,2
Органоминеральная система удобрения						
8. $OY_1 N_{90}P_{60}K_{110}$ (фосфогипс (S_{80}))	3,09	0,99	1,16	0,05	0,12	19,3
9. $OY_1 N_{90}P_{60}K_{110}$ (фосфогипс (S_{91}))	2,92	0,71	0,88	0,04	0,08	18,3
10. $OY_1 N_{90}P_{60}K_{110}$ (сульфат аммония (S_{91}))	3,14	0,89	1,05	0,05	0,10	19,6
$НСР_{0,5}$	0,17	0,05	0,06	0,003	0,01	1,09

* среднегодовая доза в пятипольном севообороте

Таким образом, последействие фосфогипса на качество зерна яровой тритикале значительно прослеживалось на органической системе без внесения NPK. При минеральной и органоминеральной системе удобрения наблюдалась лишь тенденция увеличения урожайности и содержания протеина в зерне тритикале, что указывает на необходимость ежегодного внесения серосодержащих удобрений, в том числе и фосфогипса (S_{70} – S_{90}) под зерновые культуры на почвах с низким содержанием серы.

ВЫВОДЫ

В ходе исследований на дерново-подзолистой легкосуглинистой и рыхлосупесчаной почвах установлено, что применение фосфогипса в качестве серосодержащего удобрения в технологии возделывания сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы, рапса, картофеля и яровой тритикале) на низкообеспеченных серой почвах (3–6 мг/кг) оказывало равнозначное с сульфатом аммония влияние на урожайность и качество полученной продукции:

– доза серы 69 и 80 кг/га под озимую пшеницу в форме фосфогипса и сульфата аммония обеспечила на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве увеличение урожайности зерна от 65,9–68,2 ц/га (базовые без серы) до 68,8–73,0 ц/га, с тенденцией улучшения качества зерна по содержанию протеина и клейковины. Увеличение дозы серы до 114,6 кг/га, внесенной в два приема (69 + 45,6), обеспечило достоверную прибавку зерна (5,8–6,2 ц/га) с увеличением содержания протеина от 12,8 до 13,3–13,9 ц/га, клейковины – от 24,0 до 24,8–26,3 % и тенденцией увеличения массы 1000 зерен от 45,6 до 46,9–48,6 г, при несущественных различиях между формами серосодержащих удобрений;

– внесение фосфогипса под рапс яровой в дозе S_{91} и S_{115} при возделывании на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве обеспечивало одинаковую с сульфатом аммония урожайность (18,8–19,7 и 17,5–19,3 ц/га) с равноценными показателями качества маслосемян (содержание масла – 44,3–44,6 и 43,9–44,3 %, масса 1000 семян – 5,20–5,23 и 5,16–5,17 г). Доза $S_{114,6}$ применяемых серосодержащих удобрений не имела преимуществ перед дозой S_{91} ;

– фосфогипс, внесенный под картофель (S_{71}), обеспечивал на минеральной системе удобрения получение равных с сульфаммофосом прибавок урожайности клубней (18–24 ц/га.). Прибавки от внесения доз S_{91} и S_{80} в форме фосфогипса и сульфата аммония на органоминеральной системе удобрения также находились в близких пределах – от 19 до 34 ц/га клубней;

– последствие фосфогипса (S_{71} – S_{91}) на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве обеспечило тенденцию увеличения урожайности ярового тритикале (от 1,9 до 2,9 ц/га) и улучшения показателей качества зерна.

Следует отметить, что эффективность высоких доз серы зависит не только от степени отзывчивости культур, но также и от уровня урожайности. Так, на озимой пшенице с высоким уровнем урожайности (65,9–73,0 ц/га) из применяемых доз (S_{69} , S_{80} и $S_{114,6}$) более эффективной дозой была $S_{114,6}$. При невысоком уровне урожайности рапса, более требовательного к сере по сравнению с пшеницей, дозы S_{91} и $S_{114,6}$ были равноценны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдевич, И. М. Влияние серосодержащих удобрений на урожайность и качество сельскохозяйственных культур: сборник научных трудов / И. М. Богдевич, Т. М. Германович // Почвоведение и агрохимия. – 1998. – Вып. 30. – С. 141–146.
2. Применение новых форм жидких азотно-серосодержащих удобрений под сельскохозяйственные культуры: рекомендации / Г. В. Пироговская [и др.] // Институт почвоведения и агрохимии; Светлогорскхимволокно. – Минск, 2012. – 31 с.
4. Богдевич, И. М. Динамика обеспеченности магнием и серой пахотных почв

Беларуси и отзывчивость гороха на магний и серосодержащие удобрения / И. М. Богдевич, Ю. В. Путятин, И. С. Станилевич // Плодородие почв и эффективное применение удобрений: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–25 июня 2021 г., в 2 ч. / НАН Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. – Минск: Институт системных исследований в АПК Беларуси, 2021. – Ч. 2. – С. 18–22.

5. Полтораднев, М. С. Эффективность азотного серосодержащего удобрения NS 30:7 при возделывании ярового рапса в Северной Европе / М. С. Полтораднев, Т. В. Гребенникова // Земледелие. – 2015. – № 8. – С. 37–38.

6. Гилязов, М. Ю. Вариабельность химического состава урожая яровой пшеницы в зависимости от серосодержащих удобрений и погодных условий / М. Ю. Гилязов, И. Р. Сулейманов, И. М. Надршин // ФГБОУ ДПОС «Татарский институт переподготовки кадров агробизнеса». – Казань, 2015. – Вып. 9: Проблемы развития аграрного сектора в условиях экономических санкций, импортозамещения: вопросы стратегии и тактики. – С. 360–366.

7. Богдевич, И. М. Урожайность и качество зерна гороха в зависимости от условий минерального питания магнием и серой на дерново-подзолистых суглинистых почвах / И. М. Богдевич, И. С. Станилевич, Ю. В. Путятин // Почвоведение и агрохимия. – 2021. – № 1(66). – С. 91–105.

8. Докшин, Я. В. Влияние хлор- и магний-серосодержащих удобрений на продуктивность картофеля / Я. В. Докшин // Агрэкологічныя асновы прымянення ўдобраў у савярэньным зямледэліі: матэрыялы 48-й Міждунар. науч. конф. моладых учэных, спецыялістаў-агрэхімікаў і экалягоў, Москва, 24 апр. 2014 г. / Фэдаральнае агеьтства наўчных арганізацыяў, Вьсеросыйскі наўчна-ісьсьледавельскі інстытут агрэхіміі ім. Д. Н. Прынішнікова. – Москва, 2014. – С. 69–72.

9. Применение серосодержащих удобрений под сахарную свеклу / В. П. Курганский [и др.] // Состояние и пути развития производства сахарной свеклы в Республике Беларусь: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2003. – С. 110–115.

10. Захарова, Д. Продуктивность и показатели качества зерна яровой пшеницы в зависимости от предпосевной обработки семян серосодержащими соединениями / Д. Захарова, В. Смывалов // Главный агроном. – 2016. – № 9. – С. 14–17.

11. Диапазон оптимального уровня содержания обменного магния в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах и эффективность серосодержащих удобрений при возделывании кукурузы / О. М. Таврыкина [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2014. – № 1(52). – С. 268–278.

12. Курганская, С. Д. Влияние микроэлементов и серы на рост и развитие растений ярового рапса / С. Д. Курганская, С. П. Кукреш // Приемы повышения плодородия почв, эффективности удобрений и средств защиты растений: материалы Международной научно-практической конференции. – Горки, 2003. – Ч. 2. – С. 179–181.

13. Мишук, О. Л. Влияние магния и серы на урожайность и качество семян ярового рапса на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04. Агрохимия / О. Л. Мишук // НАН Беларуси, НПЦ НАН Беларуси по земледелию, РУП «Институт почвоведения и агрохимии». – Минск, 2008. – 21 с.

14. Степура, М. Ф. Влияние видов и доз удобрений на вынос и баланс элементов питания капусты белокочанной / М. Ф. Степура, Т. В. Матюк, И. П. Добровольская // Овощеводство: сб. науч. тр. / Национальная академия наук Беларуси, РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству», РУП «Институт овощеводства». – Минск, 2008. – Т. 13. – С. 208–212.

15. Сенько, А. С. Методические подходы к расчету и картированию критических нагрузок азота и серы на экосистемы Беларуси / А. С. Сенько, Н. А. Лысухо, В. С. Зубрицкий // Природные ресурсы: межведомственный бюллетень. – 2004. – № 4. – С. 83–92.

16. Справочник агрохимика / В. В. Лапа [и др.]; Ин-т почвоведения и агрохимии; под ред. В. В. Лапа. – 2-е изд. – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – 260 с.

17. Методические указания по проведению регистрационных испытаний макро-, микроудобрений и регуляторов роста растений в посевах сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь / В. В. Лапа [и др.]; РУП «Институт почвоведения и агрохимии». – Минск, 2008. – 36 с.

18. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – 6-е изд. – М.: ИД Альянс, 2011. – 352 с.

19. Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси: сб. науч. мат. / НПЦ НАН Беларуси по земледелию – Минск: ИВЦ Минфина, 2007. – 448 с.

20. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных, комовых и технических растений: сб. отраслевых регламентов / Нац. акад. наук Беларуси, Науч. практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по земледелию; под общ. ред. В. Г. Гусакова, Ф. И. Привалова. – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – 531 с.

20. Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь. – Минск: Промкомплекс, 2020. – 742 с.

21. Применение серных удобрений: рекомендации / Управление НТИ МСХ Латвийской ССР. – Рига, 1980. – 11с.

22. Применение серосодержащих удобрений на дерново-подзолистых почвах Белоруссии: рекомендации. – Минск: Ураджай, 1988. – 17 с.

IMPACT AND AFTEREFFECT OF PHOSPHOGIPS ON THE YIELD AND QUALITY OF AGRICULTURAL CROPS

**V. I. Saroka, G. V. Piragouskaya, S. S.Khmelevskij,
A. S. Lemeshevskaya, T. V.Garbuzova, I. N. Nekrasova, D. G. Perekhod**

Summary

The article presents the data on the influence of various forms of sulfur-containing mineral fertilizers (phosphogips. Sulphurammophos, ammonium sulphate) on productivity and grain quality of winter wheat. And spring rape, potato tubers and spring triticale (seeds) growing on podzoluvisol loamy sand soil. And sod-podzolic light loamy soil. Impact and aftereffect of phosphogips were established (found).

Поступила 21.05.24

3. ЮБИЛЕИ

ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА ЦЫТРОН



В 2024 г. отмечает юбилей ученый в области классификации, диагностики и оценки почв доктор сельскохозяйственных наук, доцент **Цытрон Галина Станиславовна**.

Галина Станиславовна Цытрон родилась 27 мая 1954 г. в д. Калиновка Дубровенского района Витебской области в семье рабочих. Успешно окончив школу, в 1971 г. Г. С. Цытрон поступила на географический факультет Белорусского государственного университета. В студенческие годы была награждена значком «Отличник учебы», участвовала в работе научного кружка кафедры почвоведения, сочетала учебу с работой в лаборатории факультета. После окончания БГУ научная деятельность продолжилась в Белорусском научно-исследовательском институте почвоведения и агрохимии, в секторе географии и картографии почв.

С 1976 по 2015 годы, за 39 лет работы в Институте, Галина Станиславовна Цытрон прошла путь от лаборанта до заведующего сектором.

В 1990 г. Галина Станиславовна защитила кандидатскую диссертацию по специальности «агрочесоведение, агрофизика» на тему: «*Антропогенно-преобразованные почвы, их диагностические признаки, классификация и производительная способность*», в которой впервые для условий Беларуси были диагностированы антропогенно-преобразованные почвы, составлена классификационная схема и шкала их пригодности для возделывания отдельных сельскохозяйственных культур.

В феврале 2005 г. Г. С. Цытрон защитила докторскую диссертацию по теме: «*Условия формирования, классификация, диагностика и качественная оценка антропогенно-преобразованных почв Беларуси*». Эта работа представляет собой научный труд, посвященный разработке новых подходов и принципов создания классификационной схемы всего разнообразия антропогенно-преобразованных почв Беларуси и установлению их диагностических признаков для целей крупномасштабного почвенного картографирования. Результаты этих исследований освещены в монографии «*Антропогенно-преобразованные почвы Беларуси*» (2004 г.).

На основании экспериментального материала, полученного в ходе 25-летних научных исследований всего разнообразия почв республики с учетом природной и хозяйственной специфики, Галина Станиславовна в соавторстве с Николаем Ивановичем Смяном разработали новую классификацию почв Беларуси, опубликованную в монографии «*Классификация, диагностика и систематический список почв Беларуси*» (2007 г.), которая была отмечена премией Национальной академии наук (2007 г.).



К настоящему времени Цытрон Галина Станиславовна лично и с соавторами опубликовала более 320 научных работ, методик, рекомендаций, справочных и практических пособий, которые широко используются на практике, вносят значительный вклад в решение вопросов рационального использования почв Беларуси. Подготовила трех кандидатов наук.

Галина Станиславовна долгие годы осуществляла научно-методическую и практическую учебу специалистов РУП «Проектный институт Белгипрозем», участвовала в разработке методических положений кадастровой оценки и проведении землеоценочных работ.

До 2015 г. являлась заместителем председателя Ученого Совета по защите диссертаций института. На протяжении многих лет она проводила большую научно-организаторскую работу по подготовке конференций и съездов Белорусского общества почвоведов, являлась секретарем белорусской ячейки Докучаевского общества почвоведов при Российской академии наук, заместителем председателя Белорусского общества почвоведов.

И сейчас, находясь на заслуженном отдыхе, Галина Станиславовна со своими учениками активно участвует в подготовке монографий и научных статей.

Поздравляем Галину Станиславовну с юбилеем,
желаем крепкого здоровья и благополучия!

Коллеги и сотрудники сектора

РЕФЕРАТЫ

1. ПОЧВЕННЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 633.34:631.47

Азарёнок Т. Н., Матыченкова О. В., Дыдышко С. В., Воробей М. В. Территориальные особенности размещения посевов и анализ урожайности сои в Республике Беларусь // Почвоведение и агрохимия. – 2024 – № 1(72). – С. 7.

Установлены территориальные особенности размещения посевов сои (на зерно) по областям республики на основе анализа посевных площадей культуры. Проанализированы данные урожайности сои с 2015 по 2023 гг. Проведен анализ территории республики по сумме активных температур выше 15 °С. Рассчитан коэффициент устойчивости получения урожая по областям республики. Результаты исследований служат основой для планирования и разработки структуры посевных площадей сои с учетом агроклиматических показателей.

Табл. Рис. 3. Библиогр. 7.

УДК 631.44.06:631.459.3

Цырибко В. Б., Устинова А. М., Логачев И. А. Влияние дефляции на горизонтальную миграцию ^{137}Cs на сельскохозяйственных землях // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 13.

В статье приведены данные по изменению удельной активности ^{137}Cs в верхнем горизонте почв в результате дефляционных процессов. Установлено, что характер землепользования играет ключевую роль в интенсивности горизонтальной миграции ^{137}Cs в ходе дефляционных процессов. Изменения удельной активности на луговых землях более, чем в два раза ниже, чем на пахотных.

На пахотных землях вдоль естественных и антропогенных преград формируются зоны аккумуляции дефляционного (навеечного) материала с повышенным содержанием в нем радионуклида. На песчаных почвах разница в удельной активности пахотного горизонта между зоной переноса и аккумуляции достигает на пахотных землях 45,7 %, а на луговых – 22,3 %.

Степень подверженности дефляционным процессам находится в тесной взаимосвязи с уровнем деградации торфяных почв. На торфяных и торфяно-минеральных почвах разница в удельной активности цезия-137 между зоной переноса и аккумуляции на пахотных землях составляет до 37,5 %, на луговых – 18,3 %, а на остаточно-торфяных и постторфяных почвах – достигает 77,6 % и 30,7 % соответственно на пахотных и луговых землях.

Табл. 2. Рис. Библиогр. 10.

УДК 332.33:631.15

Веремейчик Л. А. Экологическая модернизация земельных ресурсов как фактор повышения эффективности сельскохозяйственного производства // Почвоведения и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 20.

В статье представлены ключевые элементы экологической модернизации земельных ресурсов Республики Беларусь, основанные на государственной экологической политике, целью и принципами которой является сочетание высокого уровня экономического развития сельскохозяйственного производства и незначительного уровня воздействия на окружающую среду. Результатом исследований является анализ экологической модернизации земельных ресурсов в рамках реализации стратегии, предусматривающей сохранение и повышение плодородия почв сельскохозяйственных земель за счет оптимизации структуры посевов сельскохозяйственных культур, внедрения адаптивно-ландшафтных систем земледелия и введения системы почвенно-экологических севооборотов, сбалансированного применения органических и минеральных удобрений, активного применения новых эффективных удобрений и пестицидов с низкой токсичностью.

Библиогр. 8.

УДК 631.415:631.821.1

Воробей М. В., Киндеев А. Л. Геоestatистический анализ внутрипольной неоднородности почвенной кислотности для проведения работ по известкованию // Почвоведения и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 27.

В статье представлены основные этапы картографирования агрохимических свойств геоestatистическим методом на примере почвенной кислотности. Проведено сравнение классического и геоestatистического методов картографирования почвенной кислотности для исследуемой территории. Сравнение проводилось по следующим показателям: стоимость отбора проб и лабораторного анализа, затраты на известкование. Геоestatистический метод, несмотря на более высокую стоимость отбора проб и лабораторных анализов в 2,9 раза дороже классического метода позволил снизить затраты на известкование с 147 руб./га до 109 руб./га.

Табл. 4. Рис. 4. Библиогр. 10.

УДК 631.432.23

Цыганов А. Р., Чернуха Г. А., Чернуха В. Г. О набухании гидрогелей в почве // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 35.

В лабораторных опытах установлено, что степень набухания гидрогелей в почве ниже, чем в дистиллированной воде и зависит от состава и концентрации растворенных в воде ионов и баланса между силой, создаваемой набухающим гидрогелем, и сдерживающей силой окружающих частиц почвы.

Максимальная степень набухания гидрогелей при внесении в дерново-подзолистую окультуренную среднесуглинистую почву наблюдалась при их поверхностном

внесении, с увеличением глубины их заделки она снижалась. По этой причине внесение гидрогеля Зеба в почву на глубину 6–10 см не оказывало влияния на ее полную влагоемкость. Гидрогель Bellava в тех же условиях продемонстрировал большую устойчивость к сдавливанию частицами почвы.

Табл. 4. Библиогр. 4.

2. ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

УДК 631.8:633.14:631.445.2

Серая Т. М., Богатырева Е. Н., Кирдун Т. М., Новик А. Л., Симанкова Ю. А., Торчило М. М., Жабровская Н. Ю. Влияние удобрений на урожайность гибридной озимой ржи на дерново-подзолистой супесчаной почве // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 43.

На дерново-подзолистой супесчаной почве за счет эффективного плодородия в среднем за 2 года по вспашке получено зерна озимой ржи гибрид КВС Винетто 36,7 ц/га, по дискованию – 35,2 ц/га. В засушливом 2023 г. урожайность зерна была на 9 % ниже, соломы – на 40 %, чем в 2022 г. За счет применения удобрений урожайность зерна озимой ржи в среднем по опыту выросла в 2 раза по сравнению с контролем. В блоке с поверхностной обработкой почвы существенной разницы в урожайности зерна озимой ржи по сравнению с аналогичными вариантами в блоке с традиционной обработкой почвы не отмечено за исключением варианта с обработкой соломы микробным удобрением Жыцень, где урожайность в блоке дискования была на 7,6 ц/га выше, чем в блоке вспашки.

Заделка соломы без компенсирующей дозы азота как при традиционной, так и при поверхностной обработке почвы не оказала негативного влияния на равномерность всходов и развитие растений озимой ржи в осенний период на дерново-подзолистой супесчаной почве.

Табл. 3. Библиогр. 9.

УДК 631.8:633.1:631.445.2

Станилевич И. С., Богдевич И. М., Путятин Ю. В., Довнар В. А., Третьяков Е. С. Оценка эффективности серо- и магнийсодержащих удобрений под озимые зерновые культуры с учетом обеспеченности дерново-подзолистых суглинистых почв серой и магнием // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – №1(72). – С. 52.

Исследовано действие внесения в почву S_{60} (сульфат аммония) и некорневых подкормок раствором сульфата магния на урожайность озимых зерновых культур в модельном полевом опыте со средним содержанием подвижной серы (S 7–10 мг/кг почвы) и четырьмя возрастающими уровнями содержания обменного магния. Внесение S_{60} сопровождалось высокой прибавкой урожайности исследуемых культур только на низком и среднем уровнях содержания обменного магния (Mg 45–120 мг/кг почвы). Прибавка урожайности озимой пшеницы составила 0,76 и 0,65 т/га, а озимого

тритикале 0,55 и 0,45 т/га соответственно. Примерно равноценные прибавки урожайности зерна получены и от некорневой подкормки растений 4 % раствором сульфата магния: 0,75–0,58 т/га озимой пшеницы и 0,62–0,46 т/га озимого тритикале.

Проведена оценка обеспеченности пахотных почв подвижной серой по областям и районам Беларуси на основе 14 тура агрохимического обследования почв сельскохозяйственных земель за 2017–2020 гг. Определены площади пахотных земель, с низким и средним содержанием подвижной серы, где рекомендуется применять серосодержащие удобрения на посевах озимых зерновых культур. По Беларуси 2/3 площади пахотных почв характеризуются очень низким содержанием подвижной серы с различием по районам от 15,1 % (Столинский район) – до 99,9% (Круглянский район).

Табл. 7. Рис.5. Библиогр. 15.

УДК 631.8:631.445.2:633.853.494

Мезенцева Е. Г., Кулеш О. Г., Грачёва А. А., Зенькова С. М., Красноженова Я. С. Эффективность систем удобрения озимого рапса на дерново-подзолистой суглинистой почве // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 64.

В технологическом опыте на дерново-подзолистой суглинистой почве наиболее эффективным при возделывании озимого рапса явилось применение полного минерального удобрения $N_{30+90+60}P_{20}K_{70}$ в сочетании с микроудобрениями Микро-Стим-Марганец, МикроСтим-Бор и стимулятором роста растений Аминофол Плюс на фоне 2-го года последствий соломистого навоза, что обеспечило получение 38,9 ц/га маслосемян с содержанием 21,4 % белка, 48,3 % масла при 7,4 ц/га выхода сырого белка и 79,3 ц/га выхода кормовых единиц. При такой системе удобрения каждый килограмм минеральных удобрений окупался 4,7 кг маслосемян.

Уточнены показатели удельного выноса основных элементов питания озимым рапсом, которые, в зависимости от применяемой системы удобрения и уровня урожайности составляют (кг/т): N – 31,8–37,9, P_2O_5 – 15,8–16,2, K_2O – 21,2–22,9.

Табл. 4. Рис. 2. Библиогр. 15.

УДК 631.8:633.15:631.445

Мезенцева Е. Г., Кулеш О. Г., Грачева А. А., Зенькова С. М., Красноженова Я. С. Влияния гидротермических условий и режима минерального питания на продукционный процесс кукурузы на дерново-подзолистой высококультурной суглинистой почве // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 74.

В технологическом опыте на дерново-подзолистой высококультурной суглинистой почве проведена оценка влияния гидротермических условий и режима минерального питания на продукционный процесс кукурузы. Выявлено, что в более засушливых условиях вегетационного периода долевое участие минеральных удобрений в формировании урожая возрастает в 2 раза, стимуляторов роста растений – варьирует на уровне 7–13 %, достигая максимальных значений в наименее благоприятных погодных условиях, повышая устойчивость растений к стрессам в процессе их роста и развития.

Установлено, что при применении полного минерального удобрения ($N_{90+30}P_{20}K_{60}$) или только одного азотного (N_{90+30}) в комплексе с микроудобрением Микро-Стим-Цинк, Бор, регулятором роста растений Агропон С или органоминеральным удобрением Форкроп Голден 10-14-4 на фоне 60 т/га солоमистого навоза формируется более 120 ц/га биологической урожайности зерна кукурузы.

Табл. 5. Рис. 2. Библиогр. 23.

УДК 631.82:631.811:631.445.2

Рак М. В., Пукалова Е. Н., Корсакова В. В., Кляусова Ю. В., Гук Л. Н., Кудласевич С. Г. Параметры оптимизации питания люцерны цинком при различной обеспеченности этим элементом дерново-подзолистой супесчаной почвы // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 91.

В полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве установлено, что при повышении валового содержания цинка от низкого (23,3 мг/кг) до избыточного уровня (35,7 мг/кг) закономерно увеличивается и количество подвижного цинка с 2,6 до 11,1 мг/кг. На долю подвижного цинка приходится от 11,1 до 31,1 % его валового содержания. Потребление цинка растениями люцерны возрастает линейно с повышением его концентрации в почве. Повышение содержания подвижного цинка в почве от низкого до избыточного уровня увеличивает накопление элемента в растениях люцерны с 19,7 до 30,3 мг/кг сухой массы.

В технологии возделывания люцерны на дерново-подзолистой супесчаной почве, низко- и среднеобеспеченной цинком некорневая подкормка в фазе ветвления цинковым удобрением в дозах 0,15 и 0,10 кг/га д. в. повышает урожайность сухой массы на 17,4 и 7,9 ц/га и увеличивает содержания цинка в растениях до 25,6 и 24,0 мг/кг при рентабельности 87,2 и 25,5 % соответственно.

Табл. 4. Рис. Библиогр. 10.

УДК 631.46:633.37

Михайловская Н. А., Касьянчик С. А., Барашенко Т. Б., Погирницкая Т. В., Дюсова С. В. Влияние слизиобразующих бактерий р. *Bacillus* на активность фотосинтеза бобов кормовых в зависимости от содержания глифосата в почве // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 99.

Проведена серия модельных инокуляционных экспериментов по культивированию бобов кормовых в условиях почвенного микрокосма с искусственно созданными уровнями содержания глифосата в почве, соответствующими применению: 0; 3; 10 и 50 л/га гербицида в полевых условиях. Установлено стрессовое действие почвенного глифосата на рост и показатели активности фотосинтеза бобов кормовых. Применение ризобактерий *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт для инокуляции семян оказывало полифункциональное антистрессовое действие на растения в широком диапазоне концентраций глифосата в почве. Отмечены стимуляция роста и развития корневой системы, увеличение ассимиляционной поверхности и содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях бобов кормовых. Антистрессовое действие слизиобразующих ризосферных бактерий *Bacillus circulans* К-81 и *Bacillus* sp. Кт усиливалось при повышении содержания глифосата в почве.

Табл. 4. Рис. Библиогр. 23.

УДК 632.153

Емельяненко Н. В., Германович Т. М. Осадки сточных вод: проблемы и возможности их использования в сельском хозяйстве // Почвоведение и агрохимия – 2024. – № 1(72). – С. 108.

В мировой практике существует много технологий по переработке отходов. Однако применение большинства из них ведет к увеличивающемуся накоплению в природе газообразных, жидких и твердых компонентов, вызывающих необратимое нарушение среды. В Республике Беларусь довольно остро стоит проблема утилизации осадков сточных вод промышленных предприятий из-за повышенного содержания в них высокотоксичных веществ. В связи с этим возникает необходимость разработки рациональных путей их безопасной переработки.

Рис. 2. Библиогр. 6.

УДК 631.821.2:631.811.7

Сороко В. И., Пироговская Г. В., Хмелевский С. С., Лемешевская А. С., Гарбузова Т. В., Некрасова И. Н., Переход Д. Г. Влияние фосфогипса в действии и последствии на урожайность и качество сельскохозяйственных культур // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 115.

В статье приведены данные по эффективности разных форм серосодержащих минеральных удобрений (фосфогипс, сульфоаммофос, сульфат аммония) на продуктивность и показатели качества пшеницы озимой, рапса ярового, картофеля и тритикале яровой при возделывании на дерново-подзолистой легкосуглинистой и рыхлосупесчаной почвах. Определено влияние на урожайность и качество продукции в год внесения фосфогипса и в первый год последствия (на яровой тритикале).

Табл. 9. Библиогр. 22.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научный журнал «Почвоведение и агрохимия», согласно приказу ВАК Республики Беларусь от 06.02.2024 № 30, включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований. Направляемые статьи должны являться оригинальными материалами, не опубликованными ранее в других печатных изданиях.

Текст научной статьи должен быть подготовлен в соответствии с требованиями главы 5 Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации (утверждена Постановлением ВАК Республики Беларусь от 28.02.2014 № 3) и иметь следующую структуру: индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК); введение; основную часть (разделы – методы и объекты исследований, результаты исследований и их обсуждение), выводы, список цитированных источников. К статье прилагается аннотация на русском и английском языках (с переводом названия статьи, фамилий авторов). Статья должна быть подписана всеми авторами.

Объем статьи не должен превышать 10 страниц формата А4. Все материалы представляются в электронном виде.

Электронный вариант должен быть набран в текстовом редакторе Microsoft Word шрифтом Arial (размер кегля – 10 пт, через одинарный интервал, абзац – 0,75). Рисунки даются в формате TIF, JPG 300–600 точек на дюйм. Текст на рисунках также должен быть набран гарнитурой Arial, размер кегля соизмерим с размером рисунка. Подписи к рисункам и схемам делаются отдельно. Иллюстрации, формулы, уравнения и сноски, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с порядком цитирования в тексте.

Размерность всех величин, используемых в статьях, должна соответствовать Международной системе единиц измерения (СИ).

Сведения об источниках оформляются в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 7.80-2000 «Библиографическая Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 25.06.2014, 7/2786 9 запись. Заголовок. Общие требования и правила составления», межгосударственным стандартом ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления», межгосударственным стандартом ГОСТ 7.82-2001 «Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления», межгосударственным стандартом ГОСТ 7.12-93 «Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила», межгосударственным стандартом ГОСТ 7.11-2004 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на иностранных европейских языках», государственным стандартом Республики Беларусь СТБ 7.12-2001 «Библиографическая запись. Сокращение слов на белорусском языке. Общие требования и правила».

Поступившая статья направляется на рецензию, затем визируется членом редколлегии и рассматривается на заседании редколлегии. Возвращение статьи автору на доработку не означает, что она принята к печати. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии.

Редакция оставляет за собой право вносить в текст редакционную правку.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК