

ISSN 0130-8475

---

**Институт почвоведения и агрохимии**

---

# **ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

*Основан в 1961 г.*

**№ 2(75)  
Июль–декабрь 2025 г.**

Минск  
2025

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

## **ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ**

**2(75)**

***Июль – декабрь 2025 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*

Редактор *Т. Н. Самосюк*  
Компьютерная верстка *Е. А. Титовой*

Подписано в печать 19.12.2025. Формат 70х100 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 11,7. Уч.-изд. л. 9,57. Тираж 50 экз. Заказ 884.

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», 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

## 1. ПОЧВЕННЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

**Азарёнок Т. Н., Матыченкова О. В., Дыдышко С. В., Воробей М. В.**  
Создание тематических картограмм для обеспечения оптимального использования почвенно-земельных ресурсов Беларуси на основе геостатической оценки данных ..... 7

**Киндеев А. Л., Цырибко В. Б., Логачев И. А., Устинова А. М., Бенько А. А.** Изменение структуры почвенного покрова осушенных земель южной почвенно-экологической провинции Беларуси при различном сельскохозяйственном использовании ..... 22

**Гуляй М. Е., Цырибко В. Б., Гутько Ф. С.** Комплекс автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв для возделывания сельскохозяйственных культур ..... 31

**Цырибко В. Б., Устинова А. М., Логачев И. А., Юхновец А. В., Касьянчик С. А., Митькова А. А., Станилевич И. С., Карабец Н. А.** Современное состояние почвенного покрова загрязненных радионуклидами пахотных земель Могилевской области ..... 40

## 2. ПЛОДРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

**Лапа В. В., Пироговская Г. В., Хмелевский С. С., Сороко В. И.**  
Комплексные минеральные удобрения в технологии возделывания сельскохозяйственных культур ..... 49

**Серая Т. М., Богатырева Е. Н., Кирдун Т. М., Жабровская Н. Ю., Гутько Е. И.** Влияние системы удобрения и окультуренности почвы на урожайность и нормативный вынос элементов питания урожаем гибридной озимой ржи ..... 56

**Михайловская Н. А., Романенко С. С., Погирницкая Т. В., Барашенко Т. Б., Дюсова С. В., Новик А. Л.** Биodeградационный потенциал фосфатмобилизующих ризобактерий *Pseudomonas* spp. по отношению к глифосату ..... 66

**Михайловская Н. А., Романенко С. С., Погирницкая Т. В., Барашенко Т. Б., Дюсова С. В., Новик А. Л.** Катаболизм глифосата у симбиотических ризобактерий *Rhizobium trifolii* ..... 76

**Рак М. В., Пукалова Е. Н., Кудласевич С. Г., Гук Л. Н., Гутько Е. И.**  
Эффективность применения цинкового удобрения при возделывании го-

роха посевного на различных уровнях обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы подвижным цинком.....	85
---	----

<b>Подоляк А. Г., Дробышевская В. В.</b> Параметры перехода $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в многолетние бобово-злаковые травосмеси на торфяной почве в зависимости от доз внесения удобрений .....	93
---	----

<b>Шашко Ю. К., Жабровская Н. Ю.</b> Субстраты, используемые в современных технологиях защищенного грунта.....	102
--	-----

<b>Веремейчик Л. А., Цыганов А. Р.</b> Влияние микроэлементов на здоровье человека .....	118
--	-----

### 3. ТРИБУНА МОЛОДОГО УЧЕНОГО

<b>Бенько А. А.</b> Оценка пространственной дифференциации агрохимических и агрофизических свойств дефляционноопасных почв Белорусского Полесья .....	128
---	-----

Рефераты .....	135
----------------	-----

Правила для авторов .....	141
---------------------------	-----



## CONTENTS

### 1. SOIL RESOURCES AND THEIR RATIONAL USE

- Azaronak T. N., Matychenkova O. V., Dydyshka S. V., Vorobey M. V.** Creating thematic maps to ensure the optimal use of soil and land resources in Belarus based on geostatic data assessment ..... 7
- Kindeev A. L., Tsyribko V. B., Lahachou I. A., Ustsinava H. M., Bianco A. A.** Changes in the structure of the soil cover of drained lands of the southern soil-ecological province of Belarus as a result of agricultural activities ..... 22
- Hulyay M. E., Tsyrybka V. B., Hutko F. S.** Automated system for assessing radiological and agronomic suitability of soils for growing agricultural crops ..... 31
- Tsyrybka V. B., Ustsinava H. M., Lahachou I. A., Yukhnovets A. V., Kasyanchik S. A., Mitskova A. A., Stanilevich I. S., Karabets N. A.** The current state of the soil cover of arable lands contaminated with radionuclides in the Mogilev region ..... 40

### 2. SOIL FERTILITY AND FERTILIZATION

- Lapa V. V., Pirogovskaya G. V., Khmelevsky S. S., Soroko V. I.** Complex mineral fertilizers in crop cultivation technology ..... 49
- Seraya T. M., Bahatyrova E. N., Kirdun T. M., Zhabrovskaya N. Y., Gutko E. Y.** The effect of the fertilizer system and soil cultivation on the yield and regulatory removal of nutrients by the harvest of hybrid winter rye ..... 56
- Mikhailouskaya N. A., Romanenko S. S., Pogirnitskaya T. V., Barashenko T. B., Dyusova S. V., Novik A. L.** Biodegradation potential of phosphate-mobilizing rhizobacteria *Pseudomonas* spp. towards glyphosate ..... 66
- Mikhailouskaya N. A., Romanenko S. S., Pogirnitskaya T. V., Barashenko T. B., Dyusova S. V., Novik A. L.** Glyphosate catabolism in symbiotic rhizobacteria *Rhizobium trifolii* ..... 76
- Rak M. V., Pukalova E. N., Kudlasevich S. G., Guk L. N., Gutko E. I.** The effectiveness of zinc fertilizer in the cultivation of field peas at various levels of provision of sod-podzolic sandy loam soil with zinc ..... 85
- Podolyak A. G., Drobyshevskaya V. V.** Parameters of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  transition to perennial leguminous grass mixtures on peat soil depending on doses fertilizer application ..... 93

<b>Shashko Y. K., Zhabrovskaya N. Y.</b> Substrates, used in modern protected soil technologies .....	102
---	-----

<b>Veremeychik L. A., Tsyganov A. R.</b> The influence of trace elements on human health .....	118
--	-----

### 3. YOUNG SCIENTIST'S TRIBUNE

<b>Bianko A. A.</b> Evaluation of spatial differentiation of agrochemical and agromonomical properties on deflationary soils assessment of spatial differentiation of agrochemical and agrophysical properties of deflation-hazardous soils of the Belarusian Polesie .....	128
---	-----

Summaries .....	135
Instructions for authors .....	141

# **1. ПОЧВЕННЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ**

УДК 631.45

## **СОЗДАНИЕ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТОГРАММ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЧВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ ГЕОСТАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДАННЫХ**

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

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

### **ВВЕДЕНИЕ**

Стратегия ведения сельского хозяйства должна базироваться на широком применении геоинформационных систем (ГИС), позволяющих создавать экспертно-информационную основу рационального землепользования, обеспечивающую возможность обработки и анализа хранящейся информации с использованием программных средств в целях комплексной агроэкологической оценки условий хозяйствования землепользований. Именно применение средств ГИС повышает объективность планирования производства растениеводческой продукции с учетом требовательности культур к агроэкологическим свойствам почвенного покрова и плодородию почв, обеспечивая дифференцированный подход в использовании почвенных ресурсов для каждого рабочего участка, то есть получение максимального урожая за счет рационального использования почвенных ресурсов.

Для обеспечения принятия решений по оптимальному управлению почвенно-земельными ресурсами обязательно используются картографические данные. Это определяет большую наглядность выходных данных и позволяет оперативно получать визуальное представление картографической информации с различными нагрузками, атрибутивные данные в табличной или графической формах, применяемых для решения различных научно-практических задач в области сельскохозяйственного производства [1–5].

Цель исследований – провести анализ разнообразия тематических картограмм для целей планирования оптимального использования почвенно-земельных ресурсов в республике.

### **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Объектом исследований явились накопленные данные о всем разнообразии и современном агроэкологическом состоянии почвенных ресурсов сельскохозяйственных земель Республики Беларусь, инвентаризированные в ПИСБ (Почвенной Информационной Системе Беларуси). Создание тематических карто-

грамм на уровне «республика» – административный район проведено согласно разработанной методике [1–5] с применением метода геостатического анализа и алгоритмов обработки атрибутивных данных, метода экспертных оценок с использованием данных, содержащихся в ПИСБ с применением электронных справочников частной агрогруппировки почв и определения степени пригодности почв с учетом требовательности возделываемых культур к уровню агрохимического плодородия почв, разработанных в Институте почвоведения и агрохимии, данных почвенного агрохимического обследования из ЭРБД (Электронная республиканская база данных), электронных ресурсов, справочных и фондовых материалов [6–12]. Для характеристики агроклиматических условий на уровне районов использованы данные II тура (2009–2016 гг.) землеоценочных работ, сведения агроклиматических справочников, многолетних данных Белгидромета [13–15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выходной формой применения ГИС является картографическая, важной разновидностью которой являются картограммы. Картограмма – способ картографического отображения данных, сведенных по географическому принципу (по элементарным и рабочим участкам), представляющее собой схему исследуемой территории землепользования, имеющую условные обозначения в соответствии с величиной исследуемого показателя. Системы знаков картограмм отображают ряд свойств одного или нескольких взаимосвязанных явлений или характеристик, причем каждое в своих показателях. Основным условием проектирования системы обозначений тематических картограмм является сохранение графической индивидуальности компонентов и обеспечение дифференциации обозначений в пределах каждого из них. Последовательность отдельных групп знаков в общей системе исходит из значимости показателей, которая зависит, в свою очередь, от поставленных целей [1].

Необходимыми требованиями к тематическим картограммам являются:

- целевая направленность;
- системность создания (каждая из них несет отображение определенной характеристики, в том числе почв или почвенного покрова, но с учетом факторов среды);
- уровневость создания (характеристики почвенного покрова Беларуси создаются на основе уровневой организации информационной системы (республика – административная область – административный район – хозяйство – рабочий участок);
- возможность использования для оценки и прогноза.

Создание тематических картограмм включает пространственную локализацию исследуемой территории, определение степени генерализации и детализации информации, установление перечня (набора) показателей, определение реляционной связи между пространственной основой и дополнительными материалами.

Первым этапом создания цифровых тематических картограмм является определение цели ее создания. Второй этап предусматривает подбор первичных источников информации, на основе которых и будет проходить дальнейшее

проектирование и разработка картографического материала. Для построения картограммы в ГИС нужно добавить слой с полигональной основой (карт административного деления Республики Беларусь) и связать его с табличными данными.

Для создания тематических картограмм требуется табличная информация с набором количественных числовых и/или статистических данных для выделенных полигонов (районов).

Третьим этапом является нахождение реляционных связей отобранных первичных источников. Привязка к административной принадлежности является частным случаем привязки к географическим координатам, но отличается от нее меньшей точностью и является аппроксимацией на весь административный выдел (район, область).

Четвертый этап – объединение имеющихся данных различных источников по найденным реляционным связям. Технически это может происходить добавлением атрибутивных данных к полигону административно-территориального деления; пересечением полигонов почвенных выделов с полигонами других карт с созданием новых полигонов, которые наследуют признаки от всех пересекаемых полигонов и комбинацией вышеперечисленных способов. При создании легенды выбирается цветовая шкала, которая наилучшим образом отражает количественные данные, проводится соответствующее ранжирование на интервалы, группы.

По характеру используемых данных, количеству показателей существует большое разнообразие тематических картограмм. Так, аналитические тематические картограммы являются наиболее простыми и имеют одну качественную либо количественную характеристику, в комплексных – совмещаются несколько качественных и количественных характеристик, а синтетические – отображают большое число показателей, их связи, отношения и характеризуются многофакторным принципом выделения соответствующих признаков.

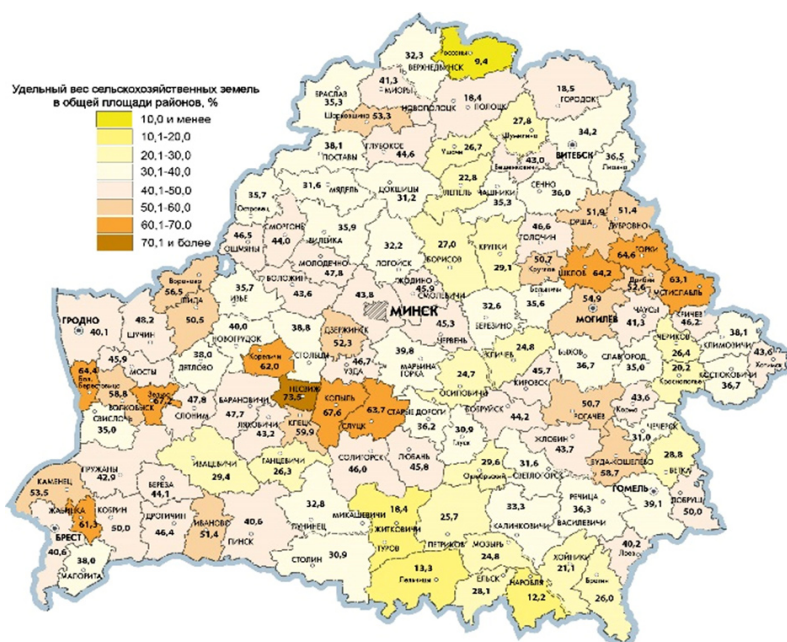
По функциональному назначению выделяются:

- оценочные, необходимые для экспертной оценки относительно какого-либо одного (или нескольких) факторов;
- мониторинга состояния почвенного покрова на различных уровнях обобщения;
- прогнозные и рекомендательные [1–5].

Рассмотрим разнообразие тематических картограмм для целей планирования оптимального использования почвенно-земельных ресурсов в республике, разработанных в Институте почвоведения и агрохимии в рамках выполнения научных исследований за период 2021–2025 гг.

Земельные ресурсы как наиболее ценный природный ресурс, носитель плодородия, выступают естественной основой, территориальным базисом для ведения сельскохозяйственного производства и получения растениеводческой продукции. Как компонент природной среды, земля выступает главным средством производства в сельском и лесном хозяйстве, служит пространственным базисом для размещения отраслей хозяйственного комплекса, поселений, инфраструктуры и является объектом земельных отношений. Формирование оптимальной структуры земельного фонда страны, экологически обоснованное использование земель и их охрана являются важными элементами рационального природопользования в агропромышленном комплексе.

На 1 января 2025 года сельскохозяйственным организациям принадлежит 8667 тыс. га, в том числе 7212,7 тыс. га сельскохозяйственного назначения, из них 5031,8 тыс. га пахотных. Для условий Беларуси характерны достаточно высокие показатели освоенности и распаханности земель, что свидетельствует о высокой степени антропогенной трансформации земельного фонда страны. Ввиду сложившихся исторических, природных и хозяйственных условий по административным районам наблюдаются большие различия и колебания в площадях сельскохозяйственных, в том числе пахотных земель, и их доли в общей площади районов. Площади сельскохозяйственных земель колеблются от 132,0 тыс. га в Пинском районе Брестской области до 18,2–19,3 тыс. га в Россонском районе Витебской области и Наровлянском районе Гомельской области, а их доля в общей площади районов колеблется от 73,5 % в Несвижском районе Минской области до 9,4 и 12,2 % в тех же Россонском и Наровлянском районах [11] (картограмма 1).



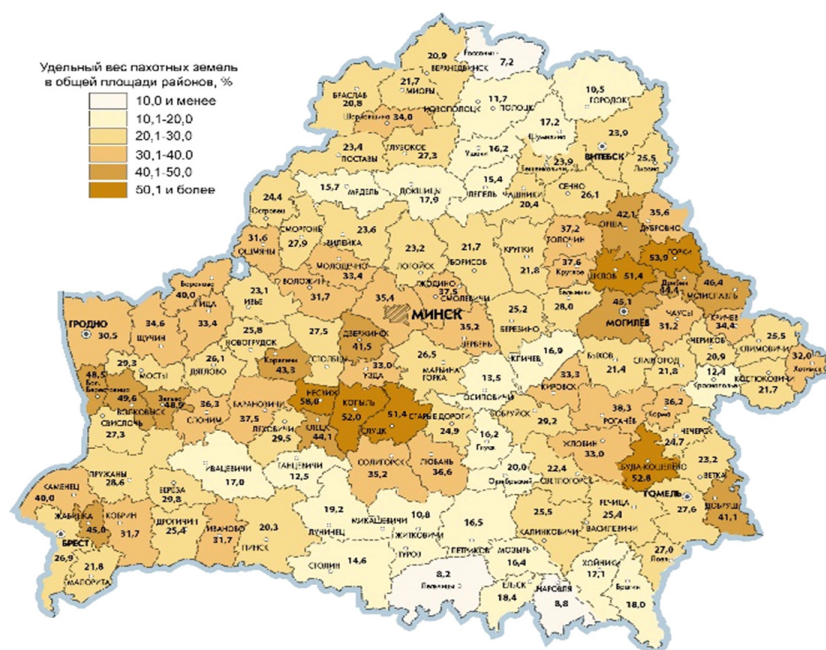
Картограмма 1. Сельскохозяйственная освоенность Беларуси  
(по состоянию на 1.01.2025)

Площади пахотных земель колеблются от 93,4 тыс. га в Слуцком районе Минской области до 13,9 тыс. га в Россонском районе, а их доля в общей площади районов колеблется от 58,0 % в Несвижском до 7,2 % в Россонском и 8,2 % в Лельчицком районах (картограмма 2).

Сохраняется устойчивая многолетняя тенденция сокращения площади сельскохозяйственных земель – в среднем около 0,1–0,5 % в год на протяжении последних 10 лет.

При этом с 2010 г. наблюдалась тенденция незначительного увеличения площади пахотных земель в среднем на 0,1–0,2 % в год. За последние три года отмечено увеличение площади пахотных земель на 0,4–0,6 %, или 24,1–57,5 тыс. га по сравнению с 2020 г., а в 2024 г. произошло снижение.





Картограмма 2. Распаханность земель Беларуси (по состоянию на 1.01.2025)

Оценка плодородия почв (в баллах) является наиболее важной и объективной характеристикой почвенно-ресурсного потенциала пахотных и сельскохозяйственных земель в целом. Она учитывает не только современное состояние почвенного покрова (тип почв, увлажнение, гранулометрический состав), но также другие характеристики и свойства почв, земельных участков, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур (климатические, культуртехнические, агрохимические, мелиоративные). Баллы плодородия почв служат как самостоятельные показатели для совершенствования специализации сельскохозяйственных организаций и расчетов структуры посевных площадей, прогнозирования урожайности культур, анализа окупаемости удобрений, прогнозирования и оценки результатов хозяйственной деятельности, решения задач по обеспечению рационального землепользования.

По результатам кадастровой оценки (на 01.01.2022 г.) балл плодородия почв сельскохозяйственных земель по республике составил 30, изменяясь от 26,6 балла в Витебской области до 33,2 балла в Гродненской области. Оценка плодородия пахотных земель в настоящее время в среднем по республике составляет 32 балла, улучшенных луговых – 29 баллов, естественных луговых – 14 баллов. Максимальным баллом оценены пахотные земли Гродненской области – 35,7 балла, далее Минской (33,4), Могилевской (31,6) и Брестской (31,5) областей. Самый низкий балл имеют пахотные земли Витебской и Гомельской областей – 28,8 и 28,2 балла соответственно. По административным районам наблюдаются еще большие колебания по баллу плодородия почв. Максимальный балл плодородия почв пахотных земель имеет Несвижский район (43,8 балла), минимальный – Городокский (23,3 балла). Высокое значение балла плодородия почв (>40 баллов) пахотных земель имеют 5 районов республики: Берестовиц-

кий, Волковысский в Гродненской области и Несвижский, Клецкий, Копыльский в Минской области. Наиболее высокие значения балла плодородия почв сельскохозяйственных земель (>40 баллов) имеют 2 района Минской области – Несвижский (42,2 балла) и Клецкий (41,0 балла), наиболее низкие показатели (<24,0 баллов) отмечаются в Городокском и Россонском районах Витебской области (картограмма 3).

Наряду с баллом плодородия почв, одним из важнейших показателей комплексной кадастровой оценки земель в Беларуси является величина нормативного чистого дохода (НЧД, руб./га), которая характеризует определенную по отношению к средним по стране условиям степень экономической благоприятности земельных участков для возделывания сельскохозяйственных культур, и показывает, сколько можно получить продукции в денежном выражении с 1 га сельскохозяйственных/пахотных земель определенного качества. Для практического использования этот показатель отражен на тематической картограмме 4.

Анализ данных картограммы свидетельствует о значительной разнокачественности пахотных земель. По пахотным землям, как основному виду сельскохозяйственных, самый высокий показатель нормативного чистого дохода имеет Гродненская область (784 руб./га), затем следует Минская (724 руб./га), Брестская (633 руб./га), Могилевская (566 руб./га) и Гомельская (460 руб./га). Самый низкий показатель отмечен в Витебской области – 332 руб./га.

По административным районам и хозяйствам наблюдаются значительные колебания показателей нормативного чистого дохода. Среди районов максимальный показатель имеет Клецкий район (1325 руб./га), минимальный – Городокский (–81 руб./га). Отрицательные значения НЧД свидетельствуют о том, что товарное производство растениеводческой продукции на таких землях будет убыточным.

Исходя из показателей нормативного чистого дохода по районам, проведена их группировка по благоприятности пахотных земель для земледелия (для возделывания сельскохозяйственных культур). Всего выделено шесть групп: 1) наиболее благоприятные (нормативный чистый доход более 1201 руб./га); 2) благоприятные (901...1200); 3) хорошие (601...900); 4) удовлетворительные (301...600); 5) сложные (300...1 руб./га); 6) плохие (в эту группу входят земли, имеющие нулевой или отрицательный нормативный чистый доход).

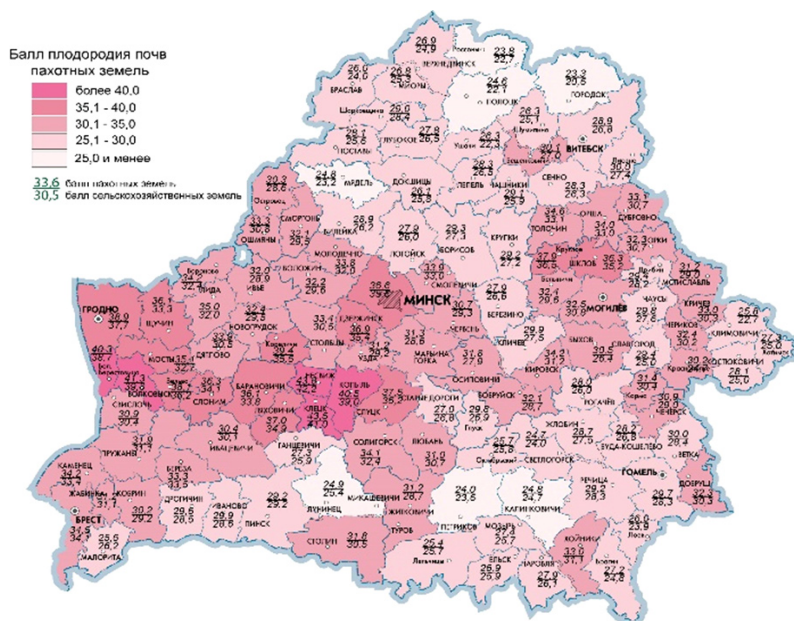
1. В первую группу, с наиболее благоприятными условиями для возделывания сельскохозяйственных культур, входят 2 района Минской области – Клецкий и Несвижский (картограмма 4).

2. Во вторую группу (благоприятные) входят 10 районов республики, из них 6 – в Гродненской области (Берестовицкий, Волковысский, Гродненский, Зельвенский, Корелицкий, Слонимский), 2 – в Минской (Копыльский и Слуцкий) и по 1 району в Брестской (Ляховичский) и Могилевской (Круглянский) областях.

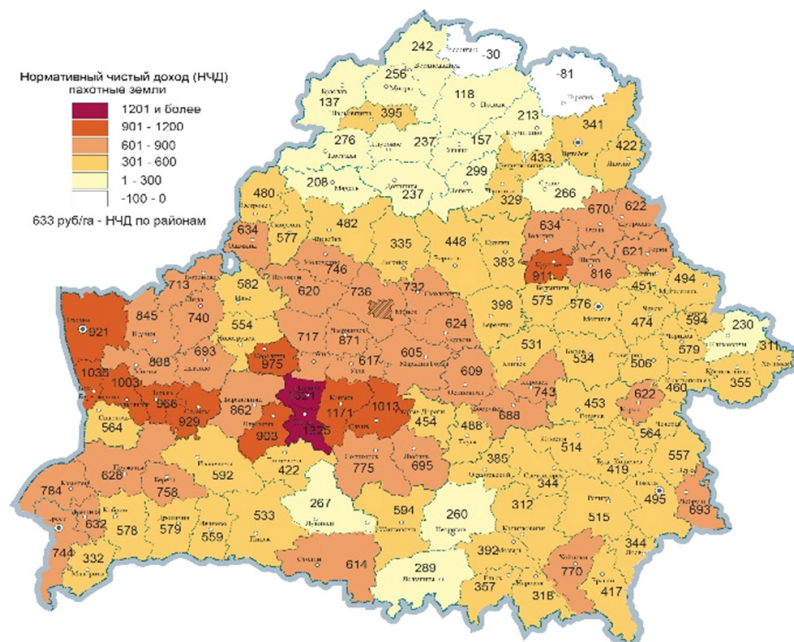
3. Хорошие условия для возделывания сельскохозяйственных культур имеют 35 районов республики. Из них 11 районов в Минской области, 7 – в Брестской, 6 – в Гродненской, 5 – в Могилевской, по 3 района в Гомельской и Витебской областях.

4. Удовлетворительные условия характерны для 53 районов. Из них 16 районов расположено в Гомельской области, 14 – в Могилевской, 7 – в Брестской, 6 – в Минской и по 5 районов в Витебской и Гродненской областях.





Картограмма 3. Балл плодородия почв пахотных и сельскохозяйственных земель Беларуси (по состоянию на 01.01.2022 г.)



Картограмма 4. Оценка пахотных земель Беларуси по нормативному чистому доходу (по состоянию на 01.01.2022 г.)

5. В пятую группу (сложные условия) входят 16 районов республики: 11 из них находятся в Витебской области (Браславский, Верхнедвинский, Глубокский, Докшицкий, Лепельский, Миорский, Полоцкий, Поставский, Сенненский, Ушачс-

кий, Шумилинский), 2 – в Гомельской (Лельчицкий и Петриковский), по 1 району в Брестской (Лунинецкий), Минской (Мядельский) и Могилевской (Климовичский) областях.

6. В шестую группу (плохие условия) входят только 2 района Витебской области – Городокский и Россонский, на территории которых возделывание сельскохозяйственных культур не благоприятно и является убыточным. Земельные участки имеют сложные технологические условия (эрозия, завалуненность, малый размер обрабатываемых участков), неблагоприятные агрохимические показатели, большую удаленность от производственных центров и др. При высоких затратах окупаемость минеральных удобрений на таких участках очень низкая. В результате себестоимость продукции растениеводства значительно выше, чем на благоприятных и наиболее благоприятных землях. Требуется разработка научных мероприятий по их дальнейшему использованию или перепрофилированию.

Оценка ресурсного потенциала почв пахотных земель на основе данных об их пригодности для выращивания сельскохозяйственных культур имеет наиважнейшее значение для организации устойчивого управления почвенно-земельными ресурсами и служит неперенным условием рационального и экономически выгодного землепользования. Используя геостатистические методы и разработанные алгоритмы обработки атрибутивных данных [1–5], метод экспертных оценок, нами проведена геостатистическая оценка пригодности почв пахотных земель хозяйств для возделывания как традиционных культур (озимой пшеницы, озимой тритикале, ярового ячменя, льна, сахарной свеклы, озимого рапса, кукурузы на зеленую массу и зерно, люцерны), так и теплолюбивых – проса, сои, подсолнечника, сорго для каждой области и района республики.

Изменяющиеся агроклиматические условия за последние десятилетия требуют своевременного совершенствования структуры посевов и привлечения в производство новых, с повышенной засухоустойчивостью, сельскохозяйственных культур и сортов, особенно для почв легкого гранулометрического состава, где растения чаще страдают от дефицита влаги. Среди засухоустойчивых культур наиболее перспективной высокоотавной кормовой культурой является сорго, которая гораздо легче переносит воздушную и почвенную засуху, суховеи и высокие температуры, чем другие культурные растения. На картограмме 6 представлено пространственное распространение доли пригодных почв под сорго по административным районам республики в Южной агроклиматической области. Всего пригодных почв 41,3 % пахотных земель, а возможная посевная площадь с учетом фитосанитарных условий составляет 13,8 %. Доля пригодных почв в районах Брестской области – 30,0 %, Гомельской – 36,1 %, Гродненской области составляет 77,2 %, а в Минской – 57,2 %.

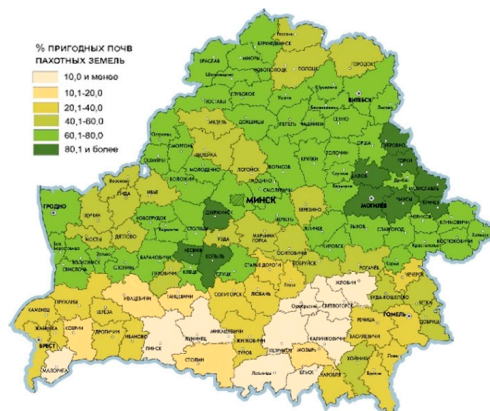
Просо – культура с высокой засухоустойчивостью универсального использования, дает продовольственное зерно, зернофураж, зеленую массу с высоким кормовым качеством. Наибольшие его площади имеются в Могилевской области (73,0 %), наименьшие – в Гомельской и Брестской (25,5–25,6 %). В ряде районов Минской, Могилевской и Витебской областей площади почв пригодных под просо составляют более 80 % пахотных земель, в то время как в отдельных районах Брестской и Гомельской областей они составляют менее 10 %. С учетом чередования культур в севооборотах и фитосанитарных требований возможная посевная площадь составляет в целом по республике 10,6 %, или 596,1 тыс. га. Учитывая,

что в настоящее время просо занимает всего 0,24 % посевных площадей, то выделять резерв не целесообразно [8].

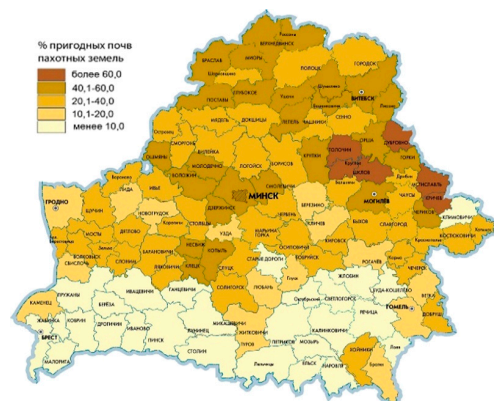
Впервые разработаны картограммы распределения пригодных почв для размещения наиболее распространенных бобовых культур (гороха посевного (картограмма 7), вики и пелюшки), так и обладающих высоким адаптивным потенциалом к изменяющимся агроклиматическим условиям (донника, эспарцета (картограмма 8) и лядвенца рогатого).



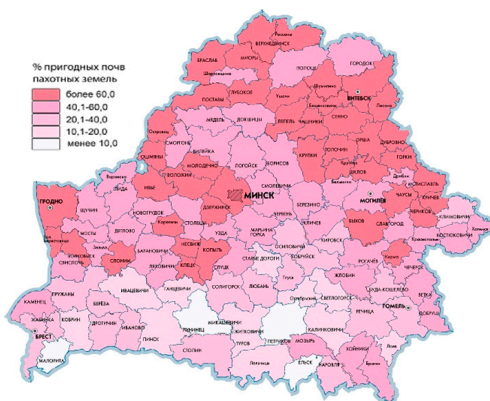
*Картограмма 5.* Распределение пригодных почв пахотных земель для выращивания сорго по административным районам республики



*Картограмма 6.* Распределение пригодных почв пахотных земель для выращивания проса (на зерно) по административным районам республики



*Картограмма 7.* Распределение пригодных почв пахотных земель для выращивания гороха посевного по административным районам республики



*Картограмма 8.* Распределение пригодных почв пахотных земель для выращивания донника и эспарцета по административным районам республики

Количество наиболее пригодных и пригодных почв для гороха посевного с учетом типовых различий, степени увлажнения, гранулометрического состава и агрохимических показателей плодородия составляет 28,2 % площади пахотных земель. Возможная посевная площадь с учетом фитосанитарных норм составляет по республике 351,8 тыс. га, или 7,1 % пахотных земель. Менее 10 % пригодных

почв находится в 27 районах, 10–20 % – в 15 районах, 20–40 % – в 45 районах, 40–60 % – в 25 районах, а более 60 % – в 6 районах республики. Для выращивания донника и эспарцета в Брестской области доля пригодных почв изменяется от 3,1–3,4 % до 46,5–58,7 %, а возможная посевная площадь – от 0,6–0,7 до 9,3–11,7 % соответственно. В Гомельской области доля пригодных почв изменяется от 8,6–10,0 % до 54,9–62,6 %, возможная посевная площадь – от 1,7–2,0 до 11,0–12,5 % соответственно.

Картограммы служат методическим инструментом для оптимального размещения сельскохозяйственных культур на основе комплексного учета их требовательности к почвенно-агроэкологическим условиям произрастания, обеспечивая практическую реализацию принципов рационального землепользования на основе дифференцированного подхода в использовании почвенных ресурсов пахотных земель.

Агроклиматические условия являются важным фактором роста и развития сельскохозяйственных культур и их продуктивности. Установлено, что за последние 35 лет среднегодовая температура увеличилась на 1,3 °С, наблюдается тенденция увеличения температуры и в летние месяцы. Средние многолетние суммы активных температур за периоды с температурой  $\geq 10$  и 15 °С составляют 2040–2495 °С и 1200–1800 °С соответственно. Особенно это касается суммы температур выше 10 °С, которая увеличилась на 284 единицы и составила в среднем по республике 2590 °С, изменяясь по областям от 2436 °С в Витебской до 2784 °С в Гомельской [13, 14]. Поэтому впервые на основании разработанных критериев и показателей, была проведена оценка почвенно-агроклиматического потенциала районов республики для размещения таких теплолюбивых культур, как соя и подсолнечник (табл.).

Для административных районов республики проведено ранжирование по каждому из показателей и выведена суммарная оценка потенциала.

Таблица

**Критерии и показатели оценки потенциала района  
для размещения посевов сои и подсолнечника**

Критерий/Показатель	Соя			Подсолнечник		
	высокий	средний	ниже среднего	высокий	средний	ниже среднего
Доля пригодных почв, %	> 30	10–30	< 10	> 30	10–30	< 10
Сумма активных температур +10°С (CAT <sub>10</sub> )	> 2400	2001–2400	< 2000	> 2400	2001–2400	< 2000
Сумма осадков за период CAT <sub>10</sub>	> 350	301–350	< 300	> 350	301–350	< 300
Коэффициент увлажнения по Мельнику	–	–	–	> 2	2–1,8	< 1,8
Снижение балла плодородия почв из-за высокой вероятности заморозков в мае	0	0–10	> 10	0	0–10	> 10
Снижение балла плодородия почв из-за высокой повторяемости засушливости во 2–3 декадах июня	0	0–1	> 1	0	0–1	> 1



На основе полученных результатов составлены комплексные картограммы, отражающие почвенно-агроклиматический потенциал административных районов республики для размещения посевов культур сои и подсолнечника (картограмма 9, 10). Так как соя и подсолнечник относятся к теплолюбивым культурам и слабо переносят весенние заморозки, на картограммах штриховкой выделены районы с высокой вероятностью заморозков в мае, оказывающих влияние на плодородие почв. Это вся территория Витебской области и отдельные районы, расположенные в северной части Гродненской, Минской и Могилевской областей. Дополнительным условным знаком были выделены и районы с высокой повторяемостью засушливых явлений во 2–3 декадах июня, также влияющих на плодородие почв.



*Картограмма 9.* Оценка почвенно-агроклиматического потенциала для территориального размещения посевов сои по административным районам республики



*Картограмма 10.* Оценка почвенно-агроклиматического потенциала для территориального размещения посевов подсолнечника по административным районам республики

Оценка потенциала территорий для возделывания сои показала, что районы с «высоким» потенциалом (всего 11 районов) сосредоточены в основном в центральной части республики, где имеется достаточное количество осадков и пригодных площадей. Потенциалом «ниже среднего» характеризуются 10 районов, расположенных в Брестской и Гомельской областях. Для всех районов Витебской области, несмотря на высокий удельный вес пригодных почв, потенциал возделывания сои оценен как «ниже среднего» в связи с высокой частотой весенних заморозков и высокой изменчивостью осадков в вегетационный период. Остальные районы области обладают «средним» потенциалом. Районы с «высоким» потенциалом для возделывания подсолнечника сосредоточены в центральной части республики – их всего 15. Потенциалом «ниже среднего» оцениваются 7 районов Брестской и Гомельской областей, а также все районы Витебской области. Большинство районов республики обладают «средним» потенциалом для получения урожая подсолнечника [7].

Проведена и комплексная оценка почвенно-агроэкологического потенциала административных районов для возделывания бобовых культур (гороха, вики и пелюшки) с учетом рисков снижения урожайности (высокой вероятности заморозков в мае и повторяемости засушливости во 2–3 декадах июня, размещения

культур на непригодных почвах (доля пригодных почв менее 10 %) и показателя снижения среднемноголетней урожайности культур (> 20 %), наличия загрязненных радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  пахотных земель с использованием метода наложения соответствующих картограмм. При совпадении 4 показателей, район оценивался как обладающий «низким» потенциалом. Наличие 2–3 показателей – потенциал «ниже среднего», наличие любого 1 показателя позволил оценить потенциал района как «средний». Районы, в которых отсутствуют какие-либо риски, оцениваются как обладающие «высоким» почвенно-агроэкологическим потенциалом для возделывания вышеупомянутых бобовых культур (картограмма 11, 12). Установлено, что районы с «высоким» почвенно-агроэкологическим потенциалом для размещения гороха посевного расположены в западной и центральной части республики – их всего 32. «Средним» уровнем оценены 53 района, 23 – «ниже среднего» и 10 районов обладают «низким» почвенно-агроэкологическим потенциалом.



*Картограмма 11.* Оценка почвенно-агроклиматического потенциала для территориального размещения посевов гороха посевного по административным районам республики



*Картограмма 12.* Оценка почвенно-агроэкологического потенциала для территориального размещения посевов вики и пелюшки по административным районам республики

Районы с «высоким» потенциалом для выращивания вики, пелюшки также сосредоточены в западной и центральной части республики. Всего выделено 39 районов с «высоким» потенциалом, в том числе 4 – в Брестской области, 15 – в Гродненской, 5 – в Могилевской и 15 – в Минской областях. «Средним» потенциалом обладают 62 района республики, «низким» – 10 районов, расположенные преимущественно в Гомельской области. Потенциалом «ниже среднего» оцениваются всего 7 районов.

## ВЫВОДЫ

Применение геостатистической оценки служит методическим инструментом для создания тематических картограмм, которые являются наглядным средством для объективной оценки актуального состояния почвенно-земельных ресурсов республики и целей планирования их оптимального использования.

С применением геостатистического анализа данных почвенно-агрохимических обследований, характеризующих агроэкологические условия произрастания сельскохозяйственных культур, установлено количество пригодных почв пахотных земель и получены картограммы распределения пригодных почв по административным районам республики для оптимального размещения засухоустойчивых культур (сorgho, просo (на зерно), донника и эспарцета). Созданные тематические картограммы для оптимального размещения сельскохозяйственных культур на основе комплексного учета их требовательности к почвенно-агроэкологическим условиям произрастания, создают научную основу для дифференцированного подхода в использовании почвенных ресурсов пахотных земель.

На основании анализа данных землеоценочных работ, почвенно-агрохимических обследований и агроклиматических данных впервые проведена оценка почвенно-агроклиматического потенциала территории республики для размещения посевов теплолюбивых (сои и подсолнечника) и бобовых (гороха, вики и пелюшки) культур и составлены комплексные картограммы, отражающие административные районы с «высоким», «средним» и «ниже среднего» почвенно-агроклиматическим потенциалом для их возделывания.

На основании учета почвенно-агроклиматических данных (% пригодных почв по району, сумма активных температур ( $CAT_{10}$ ), сумма осадков за период ( $CAT_{10}$ ), снижение балла плодородия почв из-за высокой вероятности заморозков в мае ( $>10$  баллов) и снижение балла плодородия почв ( $> 1$  балла) из-за высокой повторяемости засушливости во 2–3 декадах июня) получены комплексные картограммы для оценки почвенно-агроклиматического потенциала возделывания теплолюбивых культур сои и подсолнечника в республике. Всего выделено 11 районов с «высоким» потенциалом для размещения посевов сои и 15 районов – для размещения посевов подсолнечника.

По результатам оценки почвенно-агроэкологического потенциала пахотных земель административных районов для возделывания бобовых культур (гороха, вики и пелюшки) с учетом рисков снижения урожайности (высокой вероятности заморозков в мае и повторяемости засушливости во 2–3 декадах июня, размещения культур на непригодных почвах (доля пригодных почв менее 10 %) и показателя снижения среднесулетней урожайности культур ( $> 20$  %), наличия загрязненных радионуклидами  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  пахотных земель впервые составлены комплексные картограммы, характеризующие почвенно-агроклиматический потенциал пахотных земель республики для территориального размещения посевов гороха посевного, вики и пелюшки. Районы с «высоким» почвенно-агроэкологическим потенциалом для размещения гороха посевного расположены в западной и центральной части республики – их всего 32. «Средним» уровнем оценены 53 района, 23 – «ниже среднего» и 10 районов обладают «низким» почвенно-агроэкологическим потенциалом. Районы с «высоким» потенциалом для выращивания вики, пелюшки также сосредоточены в западной и центральной части республики – всего выделено 39 районов, в том числе 4 – в Брестской области, 15 – в Гродненской, 5 – в Могилевской и 15 – в Минской областях. «Средним» потенциалом обладают 62 района республики, «низким» – 10 районов, расположенные преимущественно в Гомельской области. Потенциалом «ниже среднего» оцениваются всего 7 районов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цытрон, Г. С.* Методические указания по созданию Почвенной Информационной Системы Беларуси / Г. С. Цытрон, Д. В. Матыченков, В. В. Северцов. – Мн., 2011. – 48 с.
2. *Лапа, В. В.* Информационная система учета динамики и прогноза свойств почвенного покрова / В. В. Лапа, Д. В. Матыченков, Т. Н. Азарёнок // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 2 (63). – С. 7–15.
3. Почвенно-информационные системы в агропочвоведении / В. В. Лапа, Д. В. Матыченков, Т. Н. Азарёнок [и др.] // Земледелие и защита растений. – 2018. – № 2 (117). – С. 9–12.
4. Методика создания информационной системы учета динамики и прогноза свойств отдельных компонентов почвенного покрова землепользований для наиболее экономически эффективного использования почвенных ресурсов / В. В. Лапа, Д. В. Матыченков, Т. Н. Азарёнок [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. – Мн. : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 42 с.
5. Методика создания интеллектуальной информационной системы сельскохозяйственного производства для целей планирования оптимального использования земельных ресурсов / В. В. Лапа, Д. В. Матыченков, Т. Н. Азарёнок [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. – Мн. : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2024 – 52 с.
6. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных, кормовых и технических растений : сб. отраслевых регламентов / Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию; рук. работы: Ф. И. Привалов, В. В. Гракун, Э. П. Урбан [и др.]; под общ. ред. В. Г. Гусакова, Ф. И. Привалова. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2022. – 530 с.
7. Рекомендации по размещению посевов сои и подсолнечника на основе геостатистической оценки почвенных и агроклиматических ресурсов республики / Т. Н. Азарёнок, О. В. Матыченкова, С. В. Дыдышко [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. – Мн. : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2024. – 34 с.
8. Методика формирования посевных площадей для возделывания сельскохозяйственных культур в изменяющихся агроклиматических условиях для обеспечения экологически безопасного и ресурсосберегающего землепользования / Т. Н. Азарёнок, Ю. К. Шашко, О. В. Матыченкова [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : Ин-т систем. исслед. В АПК НАН Беларуси, 2024. – 64 с.
9. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич, В. В. Лапа, Н. Н. Цыбулько [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. – Мн. : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2020. – 45 с.
10. Почвы Республики Беларусь / В. В. Лапа, Т. Н. Азарёнок, С. В. Шульгина [и др.]; под общ. ред. В. В. Лапа // Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2019. – 632 с.



11. Реестр земельных ресурсов Республики Беларусь (по состоянию на 1 января 2025 года). – Мн., 2025. – 60 с. / Земельные отношения // <http://gki.gov.by>. (дата обращения: 19.09.2025).

12. Данные Национального статистического комитета Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Дата поступления заказа: 24.02.2024.

13. Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель. Технология работ = Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель. Технология работ: ТКП-2018 (033520). – Введ. 15.02.2018. – Мн. : Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь, 2018. – 105 с.

14. Архив метеорологических данных [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26850/> (дата обращения: 21.10.2024).

15. Мельник, Ю. С. Климат и произрастание подсолнечника / Ю. С. Мельник. – Л.: Гидрометеиздат. – 1972. – 143 с.

## **CREATING THEMATIC MAPS TO ENSURE THE OPTIMAL USE OF SOIL AND LAND RESOURCES IN BELARUS BASED ON GEOSTATIC DATA ASSESSMENT**

**T. N. Azaronak, O. V. Matychenkova, S. V. Dydyshka, M. V. Vorobey**

### **Summary**

The application of geostatistical assessment serves as a methodological tool for creating thematic maps, which provide a visual aid for objectively assessing the current state of the republic's soil and land resources and planning their optimal use. Using GIS analysis and soil-agrochemical survey data characterizing the agro-ecological conditions for crop growth, thematic cartograms were created for optimal placement of heat-loving and drought-resistant crops (sorghum, millet, sweet clover, and sainfoin) and individual legumes (peas, vetch, and pelushka) based on a comprehensive consideration of their soil and agro-ecological growing conditions. These thematic cartograms provide a scientific basis for a differentiated approach to the use of arable land soil resources. For the first time, comprehensive cartograms of the soil-agroclimatic potential for the placement of heat-loving crops (soybeans and sunflowers) and the soil-agroecological potential of the republic's arable lands for growing individual legumes (peas, vetch, and pelushka) have been developed.

*Поступила 03.12.25*

## **ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ОСУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ЮЖНОЙ ПОЧВЕННО- ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ БЕЛАРУСИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ**

**А. Л. Киндеев<sup>1,2</sup>, В. Б. Цырибко<sup>1</sup>, И. А. Логачев<sup>1,2</sup>,  
А. М. Устинова<sup>1</sup>, А. А. Бенько<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Институт почвоведения и агрохимии,  
г. Минск, Беларусь*

*<sup>2</sup>Белорусский государственный университет,  
г. Минск, Беларусь*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сельскохозяйственная деятельность оказывает значительную антропогенную нагрузку на почвы, поэтому мониторинг за изменением качественных характеристик почвенного покрова в связи с усилением процессов деградации почвенных ресурсов в современных условиях приобретает все большую актуальность. На территории Республики Беларусь наиболее уязвимыми почвами считаются осушенные в результате мелиорации торфяники [1]. Уязвимость таких почв обусловлена их подверженностью к дефляции, в результате которой уносится большое количество питательных веществ, разрушаются верхние слои почвы. В Беларуси различными исследователями установлены максимально возможные темпы дефляции, которые в зависимости от степени дефляционной опасности почв и метеорологических условий могут достигать 15,0 и более т/га в год [2]. Для уменьшения негативных последствий требуется формирование почвозащитных севооборотов, которые позволяют снизить проявление дефляционных процессов на почвах с сильной степенью дефляционной опасности до допустимого в Беларуси уровня – 0,3–1,2 т/га в год [3]. Также важной составляющей снижения темпов деградации почвы является применение современных систем обработки земель, например, таких как Strip-till, технологии, позволяющей снизить интенсивность эрозионных и дефляционных процессов, а также уменьшить потери влаги с испарением [4].

В настоящее время в сельском хозяйстве на территории Беларуси используется 1068,2 тыс. га осушенных земель с торфяно-болотными почвами. По данным почвенного обследования, в республике дефляции подвержено 82,7 тыс. га сельскохозяйственных земель. В составе почв, подверженных дефляции, слабодефлированные занимают 87,5 %, среднедефлированные – 11,7 %, сильнодефлированные почвы – 0,8%. Удельный вес почв, подверженных дефляционным процессам, в составе пахотных земель изменяются от 0,4–0,5 % в Витебской и Могилевской областях до 1,9–2,9 % в Гомельской, Гродненской и Минской областях [5].

Вследствие нерационального использования и ухудшения технического состояния мелиоративных систем на месте сработанных торфяно-болотных почв образуются антропогенно-преобразованные деградированные торфяные почвы [6].

На сегодняшний день обозначаются тенденции дегумификации почв, деградации мелкозалежных торфяников, повышения контрастности в обеспеченности почв подвижными формами макро- и микроэлементов на уровне районов, хозяйств и рабочих участков [7], что подчеркивает важность изучения состояния почв не только в масштабах Беларуси, но и отдельных хозяйств и полей.

Целью исследования является качественная и количественная оценка изменения структуры почвенного покрова осушенных земель за тридцатилетний период в результате сельскохозяйственного использования.

## МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на двух стационарных площадках мониторинга земель, расположенных на территории Пружанского (СП «Третья») и Лунинецкого (СП «ПОСМЗил») районов Брестской области, площадью 18,6 и 28,3 га, используемых в 2025 г. под многолетние травы и в качестве пахотных земель соответственно. На первом участке было произведено 57 измерений мощности торфа, а на втором – 37 с их последующей геопривязкой (рис. 1). Также для определения степени минерализации почвы на первом участке были отобраны образцы почв для определения органического вещества по ГОСТ 27753.10-88 «Метод определения органического вещества».

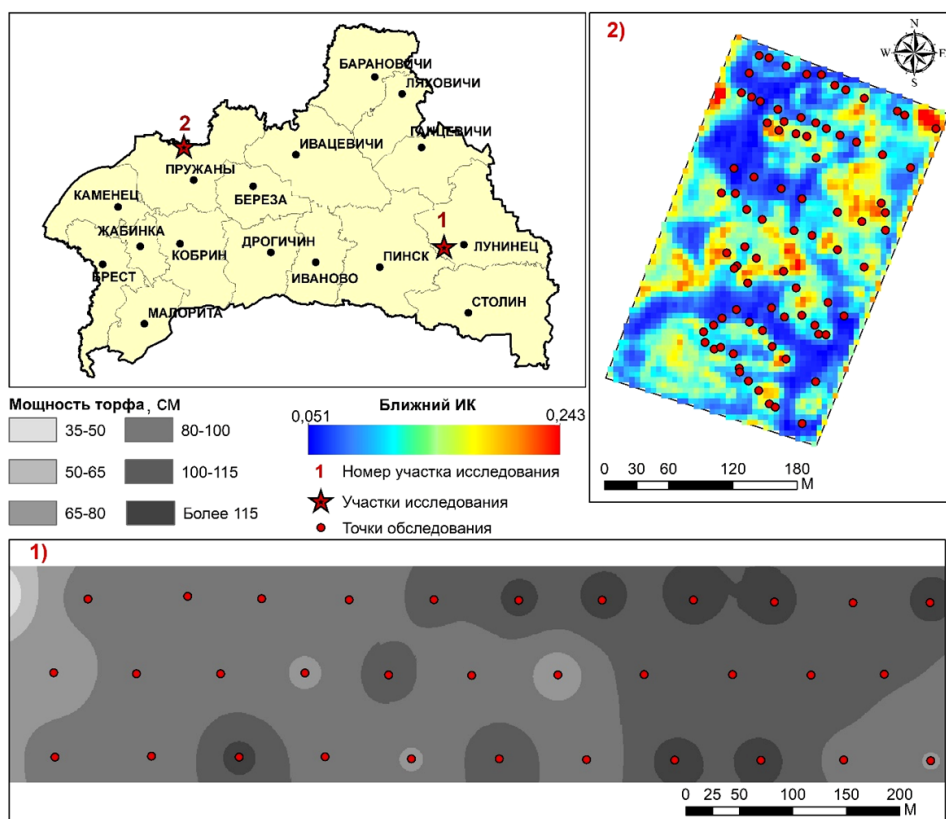


Рис. 1. Обзорная карта участков исследования

Картографирование почв проводилось в ArcGIS Pro на основании полученных данных по мощности торфа, содержанию органического вещества и спектральных характеристик открытой почвы для СП «ПОСМЗиЛ», полученных с мультиспектральных снимков со спутников Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м и атмосферной коррекцией. В качестве вспомогательной информации был выбран ближний инфракрасный канал ИК (NIR), как один из наиболее информативных каналов спутникового изображения при дешифрировании почвенного покрова [8].

Наиболее низким значением ближнего ИК характеризуются почвы с высоким содержанием органического вещества и/или влажности. В свою очередь, пески имеют более высокие значения ИК. Для территории исследования коэффициент отражения ближнего ИК составляет от 0,051 до 0,243. Понижения рельефа, в которых почвы с высоким содержанием органического вещества, характеризуются диапазоном от 0,051 до 0,0735 (синие и темно-синие тона на рисунке 1). Относительные повышения, которые характеризуют слабогумусированные пески, имеют значения от 0,22 (оранжевые и красные тона).

Для СП «Третья» снимки не использовались в связи с тем, что почва практически круглый год «покрыта» травами. Измерения мощности торфа показали дифференциацию от 35 см в западной части и более 115 см в восточной части территории, что послужило основой для создания почвенной карты данного участка.

При оценке неоднородности структуры почвенного покрова (СПП) использовались коэффициенты сложности, контрастности и неоднородности.

Основным параметром оценки сложности СПП является коэффициент сложности (КС), рассчитанный по формуле 1 [9]:

$$КС = \frac{KP \cdot (S - S_{\max})}{S^2}, \quad (1)$$

где КС – коэффициент сложности; КР – сумма коэффициентов расчленения всех ЭПА; S – сумма площадей всех ЭПА, га;  $S_{\max}$  – площадь наиболее крупного ЭПА, га.

Контрастность почвенного покрова определяет степень качественной дифференциации почв (их агрономическое различие) и выражается через коэффициент контрастности (КК), рассчитанный в соответствии с ТКП 302-2025 (33520) «Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель. Технология работ» [10] по формуле 2:

$$КК = \frac{\sum(S_i \cdot x) + \sum(S_i \cdot y) + \sum(S_i \cdot z)}{\sum S_i}, \quad (2)$$

где КК – контрастность по участку;  $S_i$  – площадь почвенной разновидности; x, y, z – показатели контрастности в соответствии со шкалой контрастности.

Для расчетов использована шкала контрастности почв Беларуси по Н. В. Клебановичу [11, 12], в которой почвы ранжированы по характеру увлажнения и процессам почвообразования.

Неоднородность почвенного покрова – комбинированный показатель, в общем виде включающий сложность и контрастность – рассчитывается путем перемножения этих двух показателей по формуле 3:

$$КН = КС \cdot КК, \quad (3)$$

где КН – коэффициент неоднородности; КС – коэффициент сложности; КК – коэффициент контрастности.

Абсолютные значения коэффициента неоднородности зависят от качества исходного картографического материала, масштаба почвенной съемки, применяемых классификаций и географических особенностей территории обследования, определяющих разнообразие почвенного покрова, а также от качества измерений площади и периметра отдельных контуров. В связи с этим количественные показатели неоднородности имеют разную интерпретацию для каждого отдельного случая.

В настоящем исследовании принимаются шкалы оценки согласно методике ведения мониторинга земель в Республике Беларусь [13] со следующей интерпретацией (табл. 1).

Таблица 1

#### Оценка показателей структуры почвенного покрова

Оценка	Коэффициент		
	сложности	контрастности	неоднородности
Оптимальная	Менее 1,0	0,0–1,5	Менее 1,5
Допустимая	1,1–2,5	1,6–3,0	1,6–7,5
Неудовлетворительная	2,5–4,0	3,1–4,5	7,6–18,0
Критическая	Более 4,0	Более 4,5	Более 18,0

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом геоинформационного моделирования стали цифровые почвенные карты исследуемых стационарных площадок (рис. 2, 3).

В 1995 г. СП «Третья» был однороден и представлял собой массив торфяных среднетощих почв (табл. 2). За практически 30-летний период можно заметить ряд существенных изменений, заключающихся в трансформации почвенного покрова на более чем 50 % территории. В западной части мощность торфа не превышает 50 см, формируя ареал торфяно-глеевых почв площадью 0,39 га (2,10 % от площади СП), что является следствием проведения более детального почвенного обследования. Большая часть стационарной площадки в настоящее время занята торфяными маломощными почвами, представленными двумя почвенными ареалами площадью 9,28 и 1,49 га. Территории, менее подвергшиеся изменениям, – это массивы торфяных среднетощих почв в северо-восточной части участка (6,68 га) и двумя отдельными ареалами в южной части площадью 0,46 и 0,33 га.

Вызванные качественные изменения структуры почвенного покрова отразились и на его количественных характеристиках. При наличии одного контура в 1996 г., все коэффициенты будут равняться нулю.



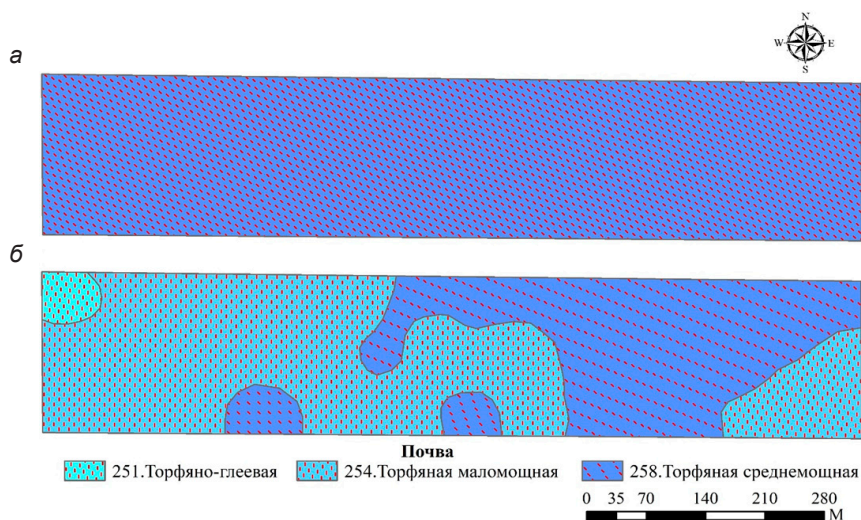


Рис. 2. Почвенная карта СП «Третья»:  
а – 1996 г.; б – 2025 г.

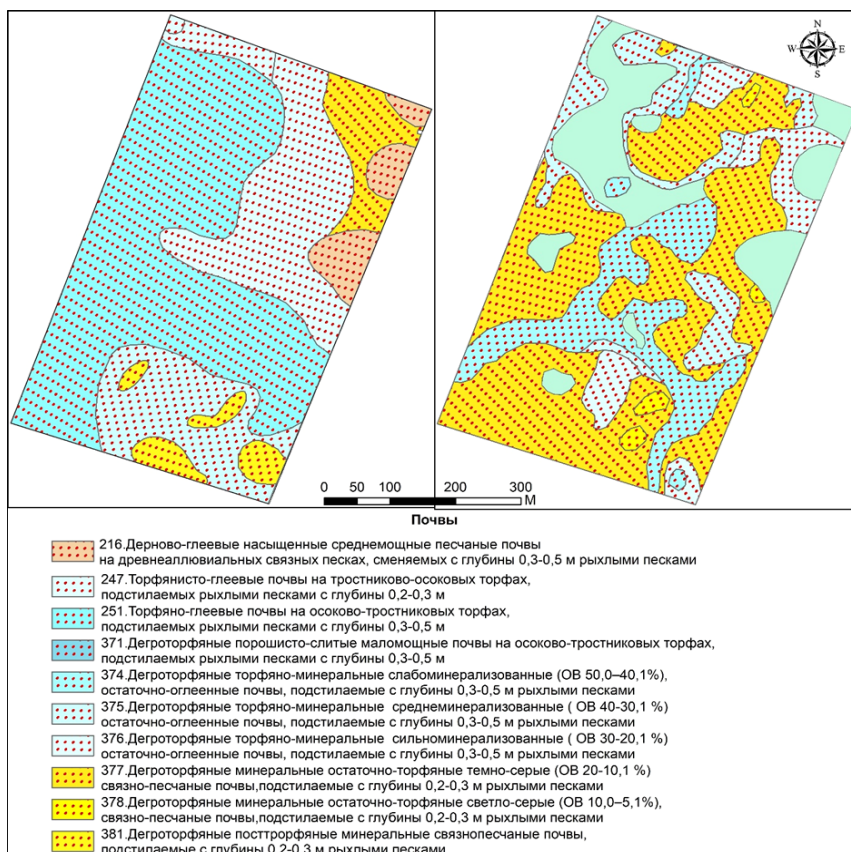


Рис. 3. Почвенная карта второго исследуемого участка:  
а – 1996 г.; б – 2025 г.

Таблица 2

**Сравнительная оценка показателей структуры почвенного покрова СП «Третья»**

Год	Почвенный контур			Коэффициент		
	№ в легенде карты	количество	площадь, га	сложности	контрастности	неоднородности
1995	258	1	18,6	0,00	0,00	0,00
2025	251	1	0,39	0,17	0,04	0,007
	254	2	10,7			
	258	3	7,47			
	Сумма	6	18,6			

В 2025 г. коэффициент сложности составил 0,17, что соответствует оптимальной сложности почвенных контуров, коэффициент контрастности – 0,04 (соответствует оптимальной контрастности) в связи с тем, что изменения, на данный момент, происходят в пределах одного классификационного типа почв (торфяные низинные). Однако, как показываются исследования [1] при более интенсивном сельскохозяйственном использовании (под пашню) произойдет сработка торфяного горизонта и на поверхности сформируются остаточно-торфяные или постторфяные почвы, чтократно увеличивает морфометрические показатели структуры почвенного покрова.

Таким образом, даже при оптимальном использовании осушенных торфяных почв (луговое под многолетние травы) происходит постепенное уменьшение мощности торфа, что без применения почвозащитных систем земледелия может привести к значительному снижению продуктивности осушенных земель.

На СП «ПОСМЗил» в связи с интенсивным использованием земель в севооборотах произошли более значительные изменения в структуре почвенного покрова – отмечена значительная сработка торфа и потеря органического вещества почвы, а также начала выходить на поверхность подстилаящая порода – минеральные пески (рис. 3, табл. 3).

В 1996 г. торфяно-глеевые почвы занимали 50,9 % территории (14,4 га) в центральной и западной части участка. Также присутствовали ареалы среднеминерализованных (3,58 га) и сильноминерализованных (5,49 га) дегроторфяных торфяно-минеральных почв с содержанием ОБ от 30,0 до 40,0 % и от 20,0 до 30,0 % соответственно. Незначительные по площади участки были представлены остаточно-торфяными и постторфяными почвами (1,69 и 1,30 га).

В результате активного тридцатилетнего сельскохозяйственного использования участка произошли значительные качественные изменения в структуре почвенного покрова. Контура почвенных разновидностей стали мельче, появились лопастные ареалы, произошло сокращение запасов органического вещества (ОБ), что привело к образованию на 46,6 % (13,2 га) территории остаточно-торфяных темно-серых почв с содержанием ОБ от 10 до 20 %. Торфянисто-глеевые почвы деградировали и превратились в среднеминерализованные, а площадь торфяно-глеевых сократилась практически в 5 раз – до 3,17 га или 11,2 % от площади участка.

Количественно эти изменения отражаются в морфометрических характеристиках данного участка. В 1996 г. коэффициент сложности составлял всего 0,38, а в 2025 г. достиг 1,83, что согласно градации КС, относится к допустимым значениям. Коэффициент контрастности почв, наоборот, уменьшился, в связи со снижением доли торфяно-глеевых и торфянисто-глееватых почв и составил 1,94 (в 1996 г.

равнялся 2,26), что также относится к группе допустимых значений. При этом общий коэффициент неоднородности значительно увеличился – от 0,86 до 3,55 (допустимые значения), что вызвано увеличением КС.

Таблица 3

**Сравнительная оценка показателей структуры почвенного покрова СП «ПОСМЗиЛ»**

Год	Почвенный контур			Коэффициент		
	№ в легенде карты	количество	площадь, га	сложности	контрастности	неоднородности
1995	216	3	1,21	0,38	2,26	0,87
	247	1	0,59			
	251	1	14,4			
	375	1	3,58			
	376	3	5,49			
	377	1	1,69			
	381	5	1,30			
	Сумма	15	28,3			
2025	178	2	0,32	1,83	1,94	3,55
	216	2	1,21			
	251	4	3,17			
	374	4	4,60			
	375	5	3,09			
	376	5	2,29			
	377	5	13,2			
	378	5	0,42			
	Сумма	32	28,3			

Также в результате проведения исследования была подтверждена взаимосвязь между содержанием органического вещества в почве и коэффициентом отражения ближнего ИК (NIR) (рис. 4).

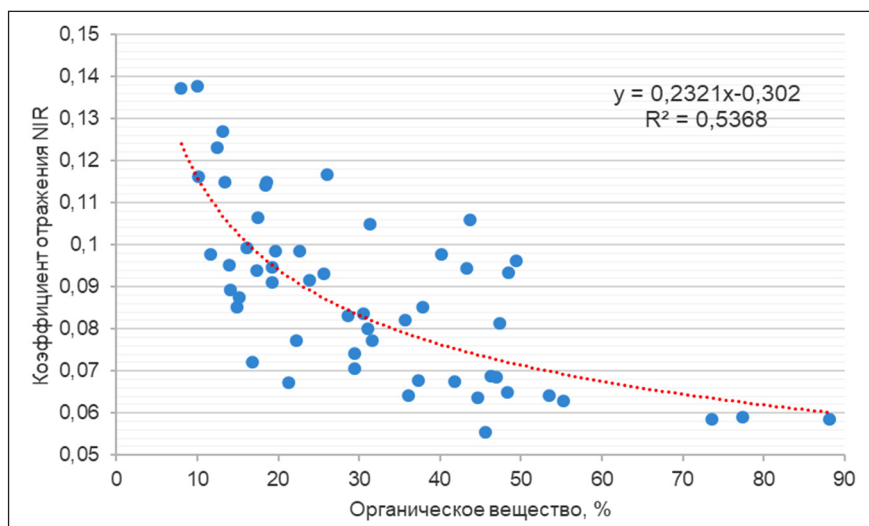


Рис. 4. Взаимосвязь коэффициента отражения ближнего ИК (NIR) и органического вещества



Как и ожидалось, график показывает обратную взаимосвязь между показателями, лучше всего описываемую степенной функцией с коэффициентом детерминации 0,59 и корреляционным отношением 0,77. Данная функция обусловлена тем, что при достижении высокого содержания ОВ цвет почвы перестает изменяться, и, как следствие, коэффициент отражения тоже, и график выходит на плато. Уравнение регрессии имеет следующий вид:  $y = 0,2321x - 0,302$ .

## ВЫВОДЫ

Интенсивность сельскохозяйственного использования земель значительно влияет на темпы протекания процессов деградации почвы, особенно на уязвимых осушенных землях, что требует проведения постоянного мониторинга изменения почвенного покрова и его отдельных свойств. За тридцатилетний период на СП «Третья» среднемошные торфяники трансформировались в торфяные мало-мощные (мощность 50–100 см) на большей части территории исследования, а появление контура торфяно-глеевых почв скорее связано с более детальным обследованием, что позволило с большей детальностью провести почвенное картографирование. Распашка торфяников на участке 2 привела к увеличению сложности и неоднородности почвенного покрова с оптимальной на допустимую ( $KC = 1,83$ ,  $KN = 3,55$ ), при этом коэффициент контрастности незначительно снизился, что связано с переходом большинства почвенных разновидностей в классификационный тип дегроторфяных торфяно-минеральных и остаточно-торфяных.

Выявленные качественные и количественные изменения в структуре почвенного покрова на участке 2, в очередной раз подтверждают необходимость применения почвозащитных севооборотов с насыщением многолетними травами на осушенных торфяных почвах или перевод их в состав луговых земель, что позволит снизить дальнейшие процессы деградации почвы.

Полученные результаты подтверждают необходимость смены вектора с проблемы повышения общего плодородия на проблему детального учета неоднородности структуры почвенного покрова, что возможно при переходе на современные системы адаптивно-ландшафтного земледелия, оценки буферности почв и устойчивости СПП к антропогенному воздействию.

Регрессионный анализ взаимосвязи между коэффициентами отражения и органическим веществом показал значимую взаимосвязь между показателями, что подтверждает результаты исследований, проводимые как в Беларуси [14, 15], так и за рубежом [16] и дает основание полагать, что работы в области применения данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) позволяют усовершенствовать методики цифрового картографирования почв и ее отдельных свойств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Changes in Soil Cover Structure and Agrochemical Status of Soils in Belarusian Polesie over a 50-Year Period Using the Example of an Experimental Agricultural Landscape / A. A. Bianco, A. L. Kindeev, A. N. Chervan [et al.] // Moscow University Soil Science Bulletin, 2025. – Vol. 80. – № 2. – P. 170–180.

2. Деградація почв сільськогосподарських земель Білорусі: види і кількісна оцінка / А. Ф. Черныш, А. М. Устинова, В. Б. Цырибко [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2016. – № 2(57). – С. 7–18.

3. Технологічний регламент формування почвозащитних комплексів на дефлірованих і дефляційнонебезпечних землях / Н. Н. Цыбулько, В. Б. Цырибко, А. М. Устинова [и др.] // Нац. акад. наук Білорусі, Інститут ґрунтознавства і агрохімії. – Мінськ: Інститут системних досліджень в АПК НАН Білорусі, 2023. – 24 с.

4. Strip-till, other management strategies, and their interactive effects on corn grain and soybean seed yield / D. J. Potratz [et al.] // Agronomy Journal. – 2020. – Т. 112. – № 1. – С. 72–80.

5. Цыбулько, Н. Н. Дефлірованне ґрунту: дыягностычныя крытэрыі і распаўсюджванне на тэрыторыі Беларусі / Н. Н. Цыбулько, В. Б. Цырибко, Е. В. Алексеевіч // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2024. – № 1. – С. 77–83.

6. Коноплев, Е. А. Меліорацыя і комплекснае освоеныя земляў Полесся / Е. А. Коноплев // Прыродоабудаву. – 2013. – № 4. – С. 21–26.

7. Богдэвіч, І. М. Ітогі і перспектывы оптымізацыі агрохімічных паказатэляў плодарады пахотных ґрунтаў Беларусі / І. М. Богдэвіч // Ізвестыя Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, 2023. – 61. – № 1. – С. 22–33.

8. Кур'яновіч, М. Ф. Іспользаванне інфрачырвоных тэмплых касмічных здымкаў для даследавання ґрунтавага пакрыцця / М. Ф. Кур'яновіч, Ю. С. Давідовіч, Ф. Е. Шалькевіч // Почвоведение и агрохимия. – 2022. – № 1. – С. 21–31.

9. Юодис, Ю. К. О структуре почвенного покрова Литовской ССР / Ю. К. Юодис // Почвоведение. – 1967. – № 11. – С. 50–55.

10. Кадастровая оцінка сільскагаспадарчых земляў. Тэхналогія работ = Кадастравая ацэнка сельскагаспадарчых зямель. Тэхналогія работ: ТКП 302-2025 (33520). – Взамен ТКП 302-2018 (33520); увед. 20.04.2025. – Мн. : Госкомимущество: Гос. ком. по имуществу Рэспублікі Беларусь, 2025. – IV, 110 с.

11. Клебано́віч, Н. В. Методы абследаванняў земляў: Заданні і метадычныя ўказанні па выкананні практыкума па курсу «Земельны кадастр». Методы абследаванняў земляў / Н. В. Клебано́віч. – Мн. : БГУ, 2008. – 48 с.

12. Разработать геоинформационную базу пространственных информационно-аналитических данных, отражающих устойчивость различных типов земель агроландшафтов к техногенному воздействию: отчет о научно-исследовательской работе (заключ.) / БГУ; рук. Н. В. Клебано́віч; исполн.: О. М. Олешкевич, А. А. Сазонов, А. Л. Киндеев, В. А. Генин: – Мн., 2019. – 72 с; № ГР 20171089.

13. Методика ведення моніторынгу земляў у Рэспубліцы Беларусь. – Мн. : б.и., 1993. – 66 с.

14. Генин, В. А. Методычныя падыходы к картографіраванню зместу гумуса па даным дыстанцыйнага зондзіравання Зямлі / В. А. Генин // Почвоведение и агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 32–42.

15. Chervan, A. N. Modeling of the 50-year dynamics of the reclaimed lands vulnerability to wind soil erosion in the region of Pripyat Polesye / A. N. Chervan, Y. S. Davidovich, A. L. Kindeev // Geography, environment, sustainability. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 198–204.

16. Савин, И. Ю. О тоне изображения открытой поверхности почв как прямым дешифровочным признаке / И. Ю. Савин // Бюллетень почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2013. – № 71. – С. 52–64.

## **CHANGES IN THE STRUCTURE OF THE SOIL COVER OF DRAINED LANDS OF THE SOUTHERN SOIL-ECOLOGICAL PROVINCE OF BELARUS AS A RESULT OF AGRICULTURAL ACTIVITIES**

**A. L. Kindeev, V. B. Tsyribko, I. A. Lahachou,  
H. M. Ustsinava, A. A. Bianco**

### **Summary**

This article presents the results of a study of the soil cover structure of drained lands at two study sites, demonstrating a significant impact of agricultural intensity on peat soil degradation. It has been established that at site 1, with preferential meadow land use, peat depletion occurred on 11,2 hectares (60,3 % of the area) over a 30-year period. At site 2, with intensive arable land use, mineralization and depletion of the peat horizon occurs, resulting in a fivefold decrease in organic matter in peat-gley soils. Analysis of morphometric parameters of the soil cover structure revealed an increase in the complexity and heterogeneity coefficients at site 2 from optimal to acceptable (from 0,38 to 1,83 and from 0,86 to 3,55, respectively). Using Sentinel-2 multispectral images for soil cover mapping, a relationship between organic matter and near-infrared radiance was confirmed, expressed through a power function with a determination coefficient of 0,59 and a correlation ratio of 0,77.

*Поступила 26.11.25*

УДК 631.4:528.94

## **КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ И АГРОНОМИЧЕСКОЙ ПРИГОДНОСТИ ПОЧВ ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР**

**М. Е. Гуляй, В. Б. Цырибко, Ф. С. Гутько**

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

### **ВВЕДЕНИЕ**

Исследования, проведенные в республике, свидетельствуют, что выработка направлений наиболее эффективного использования почвенно-земельных ресурсов, обоснования видов и объемов защитных мероприятий должны быть адаптированы к компонентному составу почвенного покрова, степени его загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , а также к технологиям возделывания сельскохозяйственных

культур – на пищевые и кормовые цели с допустимыми уровнями содержания радионуклидов, основанных на количественных показателях миграционной подвижности радионуклидов в агроэкосистемах [1, 2].

Следует отметить, что одним из востребованных направлений в агропочвоведении является разработка систем поддержки принятия решений в сельскохозяйственном производстве на основе экспертных геоинформационных систем (ГИС) с использованием цифровых технологий. В республике неоднократно предпринимались попытки создания специализированных ГИС для целей информационного обеспечения растениеводства. Однако некоторые из данных систем имеют узкую направленность, позволяя решать ограниченный набор задач, а некоторые из них выполнены в виде полностью разработанного под данное решение программного обеспечения (ПО) [3]. В то же время в Институте почвоведения и агрохимии [4] был выбран вектор на разработку систем, имеющих возможность взаимной интеграции данных с современными программными пакетами ГИС универсального назначения [5, 6], и была разработана методологическая основа их создания [4, 7].

В связи с этим актуальной задачей является перевод накопленного массива данных о состоянии почвенного покрова загрязненных радионуклидами земель, в цифровой формат и оптимизация обработки этих данных. Также необходимо соединение в единую геоинформационную систему базы данных количественных характеристик почвенного покрова [7, 8] и автоматизация обработки этих данных на основе базы знаний, а именно, накопленных научных и практических результатов, рекомендаций по агротехнологиям возделывания сельскохозяйственных культур, радиологической и агрономической пригодности почв под различные сельскохозяйственные культуры в зависимости от генезиса, уровней плодородия и плотности радиоактивного загрязнения [4].

Цель исследований состоит в разработке комплекса автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв для возделывания сельскохозяйственных культур, который является основополагающей частью экспертной геоинформационной системы по управлению почвенно-земельными ресурсами на территории радиоактивного загрязнения на основе цифровых почвенных карт различного масштаба.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта для оценки пригодности почв было выбрано КСУП «Оборона» Добрушского района Гомельской области. Почвенный покров земель хозяйства представлен дерново-подзолистыми автоморфными и заболоченными, дерновыми глеевыми супесчаными и песчаными, а также торфяно-болотными, аллювиальными дерновыми заболоченными и деградаторфяными разновидностями. На территории хозяйства присутствуют земли, загрязненные радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

Источником информации о допустимых концентрациях радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и агрономической пригодности почвенных разновидностей являются «Рекомендации по оптимизации возделывания сельскохозяйственных культур в почвенно-радиоэкологических условиях Гомельской и Могилевской областей» [9].

Средой для разработки и реализации автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв для возделывания сельскохозяйственных культур выбраны язык программирования Python 3 [10] с библиотекой ArcPy и ГИС ArcGIS Pro [5] соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработан комплекс автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв элементарных участков исследуемого хозяйства для возделывания сельскохозяйственных культур.

Для пользователя комплекс автоматизированного расчета выглядит как открываемый через панель каталога ArcGIS Pro набор инструментов под названием RadioAgroSuitability, имеющий 19 инструментов для расчета пригодности: 18 для каждой культуры в отдельности и один, делающий расчеты сразу для всех культур (рис. 1).

Для каждого инструмента требуется указать:

- входной класс пространственных объектов или шейп-файл (feature class, shape), содержащий в своей атрибутивной таблице необходимые данные;

- директорию базы данных, куда будут сохранены результаты геоинформационного анализа;

- расположение файл слоя

Legend, необходимого для символизации слоев с картограммами пригодности;

- поля атрибутивной таблицы входного класса или шейп-файла с соответствующей информацией об элементарных участках.

Отдельно стоит отметить возможность фильтра элементарных участков: если среди обрабатываемых пространственных объектов нужно отсеять участки по принципу «белого списка» (например: нужно рассчитать пригодность только для участков, являющихся пахотными), то в меню необходимо отметить галочкой пункт Whitelist-фильтр, указать атрибутивное поле и значения этого поля (одно или несколько), при которых будет рассчитана пригодность рабочего участка (рис. 1).

Результатом использования инструмента являются классы пространственных данных, содержащие поля с информацией о радиологической (включая отдельные

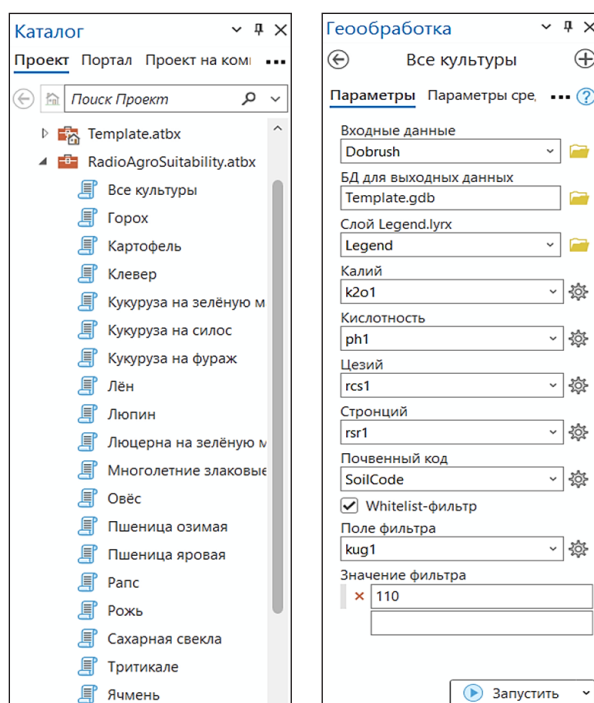


Рис. 1. Набор инструментов и параметры для расчёта пригодности почв

поля для оценки содержания изотопов цезия-137 и стронция-90), агрономической и итоговой пригодности. Символизация, отражающая пригодность участков, следующая: зеленый – пригоден, желтый – пригоден только на фуражные цели, красный – непригоден, серый – исключен фильтром (рис. 2). Результирующая таблица, содержащая экспликацию по анализируемой культуре (или всем культурам) имеет следующий вид (рис. 3).

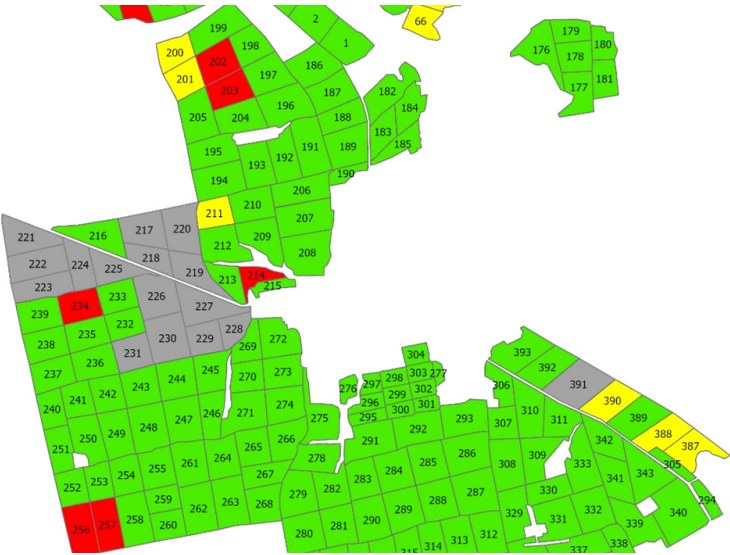


Рис. 2. Пригодность пахотных земель элементарных участков КСУП «Оборона» Добрушского района Гомельской области для возделывания озимого тритикале (фрагмент)

TotalArea

Поле:

Выборка:

Строки:

	OBJEKTID	BulbTyp	BulbAre	ChmenTyp	ChmenAre	ClevTyp	ClevAre	CornFurTyp	CornFurAre	CornGMTyp	CornGMAre	CornSilTyp	CornSilAre	FlaxTyp	FlaxAre	GrassTyp
1	1	Green	3163.3173	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
2	2	Yellow	0	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
3	3	Red	909.037	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
4	4	Filtered	490.2398	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
5	5	<Null>	<Null>	Green	2593.721	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
6	6	<Null>	<Null>	Yellow	1062.3998	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
7	7	<Null>	<Null>	Red	416.2335	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
8	8	<Null>	<Null>	Filtered	490.2398	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
9	9	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Green	0	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
10	10	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Yellow	3351.3512	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
11	11	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Red	721.0031	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
12	12	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Filtered	490.2398	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
13	13	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Green	0	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
14	14	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Yellow	3248.1143	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
15	15	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Red	824.24	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
16	16	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Filtered	490.2398	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
17	17	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Green	0	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
18	18	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Yellow	3683.5422	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
19	19	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Red	388.8121	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
20	20	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	Filtered	490.2398	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>

Рис. 3. Пример таблицы с экспликацией по всем культурам

С точки зрения информационных технологий комплекс представляет собой набор скриптов, написанных на языке Python 3 с применением библиотеки ArcPy



и затем скомпонованных в пользовательский набор инструментов. Структурно в каждом скрипте (кроме скрипта для всех культур) присутствует основное тело скрипта, которое инициализирует рабочий проект, считывает входные параметры, создает копию исходного класса пространственных объектов и активирует три функции (рис. 4):

- первая работает с атрибутивной таблицей, создавая в ней вышеописанные поля с подробной информацией о пригодности каждого участка, здесь же реализован фильтр итоговой оценки (в скрипте для всех культур таких функций 18, по одной функции на каждую культуру);
- вторая загружает итоговый класс пространственных объектов в проект в качестве слоя и производит его символизацию;
- третья рассчитывает экспликацию по пригодности анализируемой территории в гектарах с точностью до десятитысячных (т. е. с точностью до 1 м<sup>2</sup>).

```
import arcpy, os, sys
arcpy.env.overwriteOutput = True

def calculat(layer, K, pH, Cs, Sr, SC, filterfield=None, filtervalue=None):

def symbolat(layer, proj, mapa):

def explicat(layer, proj, mapa):

p = arcpy.mp.ArcGISProject('current')
a_map = p.activeMap

inp_feature = arcpy.GetParameterAsText(0)
outp_folder = arcpy.GetParameterAsText(1)
lurker = arcpy.GetParameterAsText(2) #Legend.lyrx
act_K = arcpy.GetParameterAsText(3)
act_pH = arcpy.GetParameterAsText(4)
act-Cs = arcpy.GetParameterAsText(5)
act-Sr = arcpy.GetParameterAsText(6)
act-SC = arcpy.GetParameterAsText(7)
filterBool = arcpy.GetParameter(8)
act_filterfield = arcpy.GetParameterAsText(9) if filterBool else None
act_filtervalue = arcpy.GetParameterAsText(10) if filterBool else None
afv = act_filtervalue.split(';') if act_filtervalue else None

outp_feature = os.path.join(outp_folder, "Tri")
arcpy.CopyFeatures_management(inp_feature, outp_feature)
pole = arcpy.MakeFeatureLayer_management(outp_feature, 'Tri').getOutput(0)

calculat(pole, act_K, act_pH, act-Cs, act-Sr, act-SC, act_filterfield, afv)
symbolat(pole, p, a_map)
explicat(pole, p, a_map)
```

Рис. 4. Структура программного кода инструмента

Апробация разработанного комплекса на территории КСУП «Оборона» Добрушского района позволяет произвести оценку пригодности почв элементарных участков хозяйства. Поскольку наиболее актуальна информация о пригодности почв для пахотных земель, расчеты выполнены с использованием Whitelist-фильтра для отсеивания непахотных участков.

Расчеты пригодности почвенного покрова выполнены для основных озимых и яровых зерновых, зернобобовых и ряда кормовых культур.

Так, удельный вес пригодных для возделывания озимой пшеницы на пищевые и кормовые цели пахотных земель составляет 65,5 %, только на кормовые – 6,1, а непригодных для ее возделывания – 28,4 % (табл. 1). Ограничение возделывания озимой пшеницы обусловлено в первую очередь агрономической

непригодностью дерново-подзолистых песчаных почв для выращивания данной культуры.

Таблица 1

**Удельный вес пригодных пахотных земель КСУП «Оборона» Добрушского района для возделывания озимой пшеницы, %**

Пригодность	Удельный вес, %
На пищевые и кормовые цели	65,5
Только на кормовые цели	6,1
Непригодные	28,4

Возделывание озимой ржи практически неограниченно на пахотных землях исследуемого землепользования (табл. 2). Ограничение на 18,0 % земель возделывания озимой ржи на пищевые цели обусловлено плотностью загрязнения радионуклидами стронция-90.

Таблица 2

**Удельный вес пригодных пахотных земель КСУП «Оборона» Добрушского района для возделывания озимой ржи, %**

Пригодность	Удельный вес, %
На пищевые и кормовые цели	82,0
Только на кормовые цели	18,0
Непригодные	0,0

Озимая тритикале может размещаться без ограничений на 82 % площади хозяйства, только на кормовые цели – на 10 % (табл. 3). Дерново-подзолистые автоморфные песчаные почвы, площадь которых составляет 8 %, непригодны для возделывания данной культуры.

Таблица 3

**Удельный вес пригодных пахотных земель КСУП «Оборона» Добрушского района для возделывания озимой тритикале, %**

Пригодность	Удельный вес
На пищевые и кормовые цели	82,0
Только на кормовые цели	10,0
Непригодные	8,0

Яровые зерновые имеют некоторые ограничения по возделыванию на территории землепользования. Наименьшая доля непригодных почв характерна для овса – 1,1 % (ограничение по загрязнению стронцием-90), наибольшая – для яровой пшеницы – 11,8 % (агрономическая непригодность) (табл. 4).

Таблица 4

**Удельный вес пригодных пахотных земель КСУП «Оборона» Добрушского района для возделывания яровых зерновых, %**

Культура	Пригодность	Удельный вес, %
Яровая пшеница	На пищевые и кормовые цели	72,3
	Только на кормовые цели	15,9
	Непригодные	11,8



Окончание табл. 4

Культура	Пригодность	Удельный вес, %
Ячмень	На пищевые и кормовые цели	63,7
	Только на кормовые цели	26,1
	Непригодные	10,2
Овес	На пищевые и кормовые цели	72,9
	Только на кормовые цели	25,9
	Непригодные	1,1

Наибольшие радиологические ограничения характерны для зернобобовых культур (табл. 5). Непригодными являются 18–30 % пахотных земель.

Таблица 5

**Удельный вес пригодных пахотных земель КСУП «Оборона» Добрушского района для возделывания гороха и люпина, %**

Культура	Пригодность	Удельный вес, %
Горох	На пищевые и кормовые цели	17,7
	Только на кормовые	64,2
	Непригодные	18,1
Люпин	Только на кормовые	70,3
	Непригодные	29,7

Возделывание кормовых культур также имеет ряд ограничений на территории хозяйства (табл. 6). Основная причина – распространение песчаных почвенных разновидностей. Однако в случае возделывания люцерны лимитирующим фактором является также и загрязнение стронцием-90. В тоже время кукурузу можно возделывать примерно на 80,0 % пашни. Следует отметить, что 20,0 % почв пахотных земель имеют низкое содержание подвижного калия. Для таких почв не установлены коэффициенты перехода для данной культуры, поэтому данные участки отнесены в непригодные.

Таблица 6

**Удельный вес пригодных пахотных земель КСУП «Оборона» Добрушского района для возделывания кормовых культур, %**

Культура	Пригодность	Удельный вес, %
Кукуруза на зерно	Пригодные	79,8
	Непригодные	20,2
Кукуруза на силос	Пригодные	80,8
	Непригодные	19,2
Многолетние злаковые травы на сено	Пригодные	92,0
	Непригодные	8,0
Люцерна на зеленую массу	Пригодные	74,3
	Непригодные	25,7

Таким образом, комплекс расчета позволяет в автоматизированном режиме создавать картограммы пригодности элементарных участков для возделывания конкретных сельскохозяйственных культур и рассчитать суммарные площади участков с различной пригодностью с учетом почвенного покрова, радиологичес-

ких условий и агрономической пригодности почв, что позволяет на более высоком уровне планировать и осуществлять ведение растениеводства на сельскохозяйственных землях, пострадавших от аварии на ЧАЭС.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований разработан комплекс автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв, который апробирован на примере КСУП «Оборона» Добрушского района Гомельской области. Геостатистический анализ показал, что структура почвенного покрова и уровень радиоактивного загрязнения затрудняют ведение растениеводства на территории данного землепользования. Наиболее ограничено возделывание гороха: доля пригодных пахотных земель при возделывании данной культуры на пищевые и кормовые цели составляет 17,7 %, только на кормовые – 64,2 %, а непригодных – 18,1 %.

Возделывание озимых и яровых зерновых преимущественно ограничивается агрономической пригодностью почв, за исключением овса, для которого лимитирующим фактором является загрязнение стронцием-90.

Среди кормовых культур наибольшие площади непригодных пахотных земель характерны для люпина (29,7 %) и люцерны (25,7 %). В то же время возделывание многолетних злаковых трав практически неограниченно.

Комплекс автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв для возделывания сельскохозяйственных культур позволяет кардинально ускорить процесс обработки данных и увеличить ее точность. В перспективе этот комплекс и аналогичные разработки (например, балльный расчет агрономической пригодности) могут лечь в основу системы поддержки принятия решений при ведении сельского хозяйства, в том числе в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдевич, И. М. Итоги и перспективы оптимизации агрохимических показателей плодородия пахотных почв Беларуси / И. М. Богдевич // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2023. – Т. 61. – № 1. – С. 22–33. – DOI: 10.29235/1817-7204-2023-61-1-22-33.

2. Bogdevitch, I. Fertilization as a remediation measure on soils contaminated with radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  / I. Bogdevitch, N. Mikhailouskaya, V. Mikulich // Fertilizing crops to improve human health: a scientific review / Intern. Plant Nutrition Inst., Intern. Fertilizer Industry Assoc.; ed.: T. W. Bruulsema [et al.]. – Paris, 2012. – Vol. 3: Risk reduction. – P. 275–290.

3. Лаборатория агроэкологии и массовых анализов [Электронный ресурс] // Учреждение БГУ «Научно-исследовательский институт радиобиологии»: [сайт]. – Мн., 2024–2025. – URL: <https://www.irb.basnet.by/ru/struktura-organizacii/otdel-kachestva-okruzhayushhej-sredy-i-produktov-pitaniya/laboratoriya-agroekologii-i-massovykh-analizov> (дата обращения: 20.11.2025).

4. Лапа, В. В. Специализированные информационные системы в сельскохозяйственном производстве Республики Беларусь / В. В. Лапа, Д. В. Матыченков, Т. Н. Азаренок [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2023. – № 2(91). – С. 7–13.

5. ArcGIS Pro (версия 3.1.5) [сайт] / Esri. – URL: <https://pro.arcgis.com> (дата обращения: 16.11.2025).
6. QGIS Geographic Information System [Electronic resource] / QGIS Development Team. – Open Source Geospatial Foundation, 2024. – URL: <https://qgis.org> (date of access: 20.11.2025).
7. Методика создания информационной системы учета динамики и прогноза свойств отдельных компонентов почвенного покрова землепользований для наиболее экономически эффективного использования почвенных ресурсов / В. В. Лапа, Д. В. Матыченков, Т. Н. Азаренок [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : Ин-т систем. исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 42 с.
8. Методические указания по созданию Почвенной Информационной Системы / Г. С. Цытрон, О. В. Матыченкова, Д. В. Матыченков [и др.]. – Мн. : Ин-т почвоведения и агрохимии, 2011. – 49 с.
9. Рекомендации по оптимизации возделывания сельскохозяйственных культур в почвенно-радиоэкологических условиях Гомельской и Могилевской областей / Н. Н. Цыбулько, Л. И. Шибут, В. Б. Цырибко [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2020. – 76 с.
10. Python (версия 3.9.16) [сайт] / Python Software Foundation. – URL: <https://www.python.org> (дата обращения: 16.11.2025).

## **AUTOMATED SYSTEM FOR ASSESSING RADIOLOGICAL AND AGRONOMIC SUITABILITY OF SOILS FOR GROWING AGRICULTURAL CROPS**

**M. E. Hulyay, V. B. Tsyrybka, F. S. Hutko**

### **Summary**

The article presents an automated complex for calculating the radiological and agronomical suitability of soils for growing various crops in areas contaminated with  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ . The complex was developed in Python 3 using the ArcPy library and implemented as a custom toolbox RadioAgroSuitability (19 tools) for ArcGIS Pro.

The tools enable the automated creation of thematic suitability cartograms and generation of area explication tables with accuracy up to 1 ml. A whitelist filter is provided for selecting the plots to be analysed.

Testing was conducted on the lands of agricultural enterprise «Oborona» in Dobrush district (4562,6 ha). The main cultivation restrictions were found to be associated with the agronomical unsuitability of sandy soils and elevated  $^{90}\text{Sr}$  content. The most restricted crop is pea (only 17,7 % of arable land is suitable for food and feed purposes), while the least restricted are perennial grasses and winter rye (practically unrestricted). Significant restrictions were recorded for winter wheat (28,4 % unsuitable), lupine (29,7 %) and alfalfa (25,7 %).

The developed complex significantly accelerates data processing, improves the accuracy and objectivity of assessments, and can serve as a foundation for a decision-support system in crop rotation planning on radioactively contaminated territories.

*Поступила 26.11.25*

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ МОГИЛЕВСКОЙ ОБЛАСТИ

В. Б. Цырибко<sup>1</sup>, А. М. Устинова<sup>1</sup>, И. А. Логачев<sup>1</sup>, А. В. Юхновец<sup>1</sup>,  
С. А. Касьянчик<sup>2</sup>, А. А. Митькова<sup>1</sup>, И. С. Станилевич<sup>1</sup>, Н. А. Карабец<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт почвоведения и агрохимии,  
г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Национальная академия наук Беларуси,  
г. Минск, Беларусь

### ВВЕДЕНИЕ

Для успешного ведения аграрного производства необходимо иметь достоверные научно-обоснованные количественные и качественные характеристики почвенного покрова сельскохозяйственных земель в каждой сельскохозяйственной организации [1].

На этих землях в Республике Беларусь периодически проводятся почвенные, агрохимические и другие специальные обследования, материалы которых используются для оценки земель. Начиная с 60-х годов прошлого столетия, в Беларуси проведено два тура крупномасштабных почвенных обследований сельскохозяйственных земель, один тур корректировки всех почвенных материалов. Всего к настоящему времени проведено 14 туров агрохимического обследования и пять туров оценки почв. Ежегодно обновляется Государственный кадастр (реестр) земельных ресурсов с точным установлением площадей земель по землепользователям (категории земель) и характеру их использования (виды земель) [2, 3].

Особенно актуальна обновление информации о состоянии почв для территорий, пострадавших от аварии на ЧАЭС. Одним из критериев отнесения территории к зоне радиоактивного загрязнения является плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  более 37 кБк/м<sup>2</sup>. Такое превышение было установлено на площади 46,5 тыс. км<sup>2</sup>, или 23 % территории Беларуси. Наиболее загрязненными оказались юго-восточная и северо-восточная части Гомельской области и юго-восточная часть Могилевской. Максимальное загрязнение почвы  $^{137}\text{Cs}$  достигало 60 000 кБк/м<sup>2</sup> (1 600 Ки/км<sup>2</sup>) и наблюдалось в отдельных населенных пунктах как ближней (Брагинский район Гомельской области), так и дальней зоны (Чериковский район Могилевской). Существенно ниже уровни радиоактивного загрязнения в юго-западной части Гомельской области, центральной части Брестской, Гродненской и Минской областей [4, 5]. По состоянию на 01.01.2025 г. сельскохозяйственное производство ведется на более чем 721,0 тыс. га земель, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  и/или  $^{90}\text{Sr}$  с плотностью 1,0–40,0 и 0,15–3,00 Ки/км<sup>2</sup> соответственно. В Могилевской области площадь загрязненных сельскохозяйственных земель составляет более 245,0 тыс. га, а пахотных – более 160,0 тыс. га.

Цель исследований – характеристика и анализ распределения площадей загрязненных радионуклидами почв пахотных земель в районах Могилевской области по типам, гранулометрическому составу, степени увлажнения, уровню загрязнения и баллу бонитета.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований – почвы пахотных земель Могилевской области Республики Беларусь, а именно распределение их по типам, гранулометрическому составу, степени увлажнения, уровню загрязнения и баллу бонитета.

Площади загрязненных пахотных земель и плотность загрязнения приведены по данным текущего тура агрохимического и радиологического обследований (2021–2024 гг.). Для оценки и анализа их качественного состояния использованы ТКП 302-2025 «Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель». результаты второго тура кадастровой оценки сельскохозяйственных земель. Общая площадь пахотных земель районов определена согласно Государственного кадастра (реестр) земельных ресурсов [1, 6, 7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований был проведен анализ структуры почвенного покрова и качественного состояния пахотных земель, подверженных радиоактивному загрязнению, по районам Могилевской области. Наибольшая площадь данных земель характерна для Быховского района, а удельный вес – для Быховского, Славгородского и Чериковского районов (табл. 1)

Наименьшие площади отмечены в Мстиславском (49,6 га), Кировском (91,1 га) и Бобруйском (249,6 га). Учитывая скорость полураспада радионуклидов цезия-137 [8], в данных районах в ближайшей перспективе доля загрязненных почв пахотных земель достигнет нулевых значений.

Таблица 1

**Площадь загрязненных радионуклидами пахотных земель по административным районам Могилевской области**

Район	Площадь пахотных земель		
	всего	в том числе загрязненных радионуклидами	
	га	га	%
Белыничский	39209,0	2789,6	7,1
Бобруйский	46374,0	249,6	0,5
Быховский	48418,0	45511,3	94,0
Кировский	43203,0	91,1	0,2
Климовичский	42060,0	866,0	2,1
Кличевский	32491,0	1134,4	3,5
Костюковичский	32358,0	11142,9	34,4
Краснопольский	16149,0	13777,7	85,3
Кричевский	29448,0	7910,7	26,9
Могилевский	85697,0	12586,2	14,7
Мстиславский	61701,0	49,6	0,1
Славгородский	29447,0	27597,0	93,7
Чаусский	52310,0	19678,2	37,6
Чериковский	22806,0	21062,4	92,4

В структуре почвенного покрова загрязненных пахотных земель Могилевской области дерново-подзолистые почвы преобладают во всех районах кроме Бобруйского и Краснопольского, в которых наибольший удельный вес у дерново-подзолистых заболоченных (табл. 2).

Таблица 2

**Распределение почв загрязненных радионуклидами пахотных земель по типовой принадлежности  
в районах Могилевской области**

Район	Дерново-карбонатные		Дерновые и дерново-карбонатные заболоченные		Дерново-подзолистые		Дерново-подзолистые заболоченные		Аллювиальные дерновые и дерновые заболоченные		Торфяно-болотные низинные		Торфяно-болотные верховые и переходные		Аллювиальные торфяно-болотные		Антропо-генно-образованные	
	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%
Бельиничский	–	–	–	–	1780,1	63,8	1009,5	36,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Бобруйский	–	–	–	–	53,1	21,3	189,2	75,8	–	–	7,3	2,9	–	–	–	–	–	–
Быховский	–	–	121,6	0,3	32 927,0	72,3	12 380,3	27,2	5,3	< 0,1	–	–	–	–	67,0	0,1	10,1	< 0,1
Кировский	–	–	–	–	68,6	75,3	22,5	24,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Климовичский	54,6	6,3	75,5	8,7	482,9	55,8	253,0	29,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Кличевский	–	–	–	–	784,8	69,2	349,6	30,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Костюковичский	–	–	28,9	0,3	6742,3	60,5	4371,7	39,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Краснопольский	–	–	635,8	4,6	5631,6	40,9	7368,3	53,5	–	–	142,0	1,0	–	–	–	–	–	–
Кричевский	–	–	14,5	0,2	4493,8	56,8	3402,4	43,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Могилевский	–	–	108,8	0,9	7429,0	59,0	4993,9	39,7	30,9	0,2	7,6	0,1	–	–	16,0	0,1	–	–
Мстиславский	–	–	–	–	–	–	49,6	100,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Славгородский	–	–	151,1	0,5	20 381,5	73,9	6985,3	25,3	76,2	0,3	2,9	< 0,1	–	–	–	–	–	–
Чаусский	5,2	< 0,1	62,5	0,3	13 669,4	69,5	5935,2	30,2	–	–	–	–	5,9	< 0,1	–	–	–	–
Чериковский	12,4	0,1	62,3	0,3	12 760,1	60,6	8117,6	38,5	100,0	0,5	10,0	< 0,1	–	–	–	–	–	–



При этом наибольшая доля дерново-подзолистых почв в составе загрязненных пахотных земель отмечена в Кировском (75,3 %), Славгородском (73,9 %) и Быховском районах (72,3 %), а дерново-подзолистых заболоченных – в Мстиславском (100,0 %) и Бобруйском (75,8 %). В Кировском районе в составе загрязненных сельскохозяйственных земель преобладают аллювиальные дерновые и дерновые заболоченные почвы (64,3 %).

Максимальные абсолютные значения площадей загрязненных цезием-137 и стронцием-90 дерново-подзолистых, дерново-подзолистых заболоченных и аллювиальных торфяно-болотных почв отмечены в Быховском районе, дерново-карбонатных – в Климовичском, дерновых и дерново-карбонатных заболоченных и торфяно-болотных низинных – в Краснопольском, аллювиальных дерновых и дерновых заболоченных – в Чериковском.

Дерново-подзолистые заболоченные почвы распространены на загрязненной пашне во всех исследованных районах, дерново-подзолистые во всех кроме Мстиславского. В тоже время дерново-карбонатные встречаются только в трех районах, аллювиальные торфяно-болотные – в двух, торфяно-болотные верховые и переходные – только в Чаусском, антропогенно-преобразованные – только в Быховском.

Наибольшее типовое разнообразие характерно для исследуемых земель Быховского, Могилевского и Чаусского районов – 6 типов, а наименьшее для Мстиславского – 1.

По гранулометрическому составу в Могилевской области в структуре загрязненных радионуклидами почв пахотных земель в большинстве районов преобладают супесчаные почвы, удельный вес которых изменяется от 71,6 в Чериковском районе до 100,0 % в Мстиславском. В Климовичском, Кличевском и Кировском районах наибольшие площади заняты песчаными почвенными разновидностями – 63,1, 66,3 и 100,0 % соответственно. Только в Кричевском районе преобладают суглинистые почвы как в относительных величинах (62,9 %), так и в абсолютных (4973,7 га) (табл. 3).

Таблица 3

**Распределение почв загрязненных радионуклидами пахотных земель  
по гранулометрическому составу в районах Могилевской области**

Район	Суглинистые		Супесчаные		Песчаные		Органогенные	
	га	%	га	%	га	%	га	%
Белыничский	–	–	2373,5	85,1	416,1	14,9	–	–
Бобруйский	–	–	242,3	97,1	–	–	7,3	2,9
Быховский	–	–	39 628,5	87,0	5805,7	12,8	77,1	0,2
Кировский	–	–	–	–	91,1	100,0	–	–
Климовичский	–	–	319,6	36,9	546,4	63,1	–	–
Кличевский	–	–	381,8	33,7	752,6	66,3	–	–
Костюковичский	2507,8	22,5	8158,1	73,2	477,0	4,3	–	–
Краснопольский	1525,1	11,1	10 553,5	76,6	1556,8	11,3	142,0	1,0
Кричевский	4973,7	62,9	2781,5	35,2	155,5	2,0	–	–
Могилевский	–	–	11 024,0	87,7	1546,2	12,3	16,0	0,1
Мстиславский	–	–	49,6	100,0	–	–	–	–
Славгородский	105,3	0,4	23 475,2	85,1	4013,6	14,5	2,9	< 0,1
Чаусский	789,7	4,0	18 019,3	91,6	863,3	4,4	5,9	< 0,1
Чериковский	3885,0	18,4	15 085,8	71,6	2081,6	9,9	10,0	< 0,1

В абсолютных величинах максимальные площади супесчаных (39628,5 га) и песчаных (5805,7 га) почв загрязненных радионуклидами пахотных земель расположены в Быховском районе.

Органогенные почвенные разновидности имеют ограниченное распространение. Их наибольшая доля в Бобруйском районе (7,3 %), а площадь – в Краснопольском (142,0 га).

По степени гидроморфизма в составе загрязненных радионуклидами пахотных земель в одиннадцати из тринадцати районов Могилевской области преобладают автоморфные почвы (табл. 4). Минимальная доля автоморфных – в Бобруйском районе (21,3 %), а максимальная в Кировском (75,1 %). Полугидроморфные почвы преобладают в Краснопольском (58,1 %) и Бобруйском (75,8 %), с доминированием в их составе слабоглееватых. Глееватые почвенные разновидности встречаются в десяти районах, а глеевые – в семи. Наиболее широко данные разновидности представлены в Краснопольском районе – 15,0 и 1,6 % соответственно. Гидроморфные почвы в составе загрязненных пахотных земель имеют малый удельный вес и распространены только в семи районах, при этом только в трех их доля более 0,1 %.

Таблица 4

**Распределение почв загрязненных радионуклидами пахотных земель по степени гидроморфизма в районах Брестской и Могилевской областей**

Район	Автоморфные		Полугидроморфные						Гидроморф- ные	
			слабоглееватые		глееватые		глеевые			
	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%
Белыничский	1773,2	63,6	1006,7	36,1	9,7	0,3	—	—	—	—
Бобруйский	53,1	21,3	189,2	75,8	—	—	—	—	7,3	2,9
Быховский	32 927,0	72,3	10 944,1	24,0	1555,5	3,4	7,6	<0,1	77,1	0,2
Кировский	68,6	75,3	22,5	24,7	—	—	—	—	—	—
Климовичский	537,5	62,1	321,5	37,1	7,0	0,8	—	—	—	—
Кличевский	784,8	69,2	342,3	30,2	7,3	0,6	—	—	—	—
Костюкович- ский	6742,3	60,5	3597,1	32,3	759,5	6,8	44,0	0,4	—	—
Краснополь- ский	5631,6	40,9	5722,7	41,5	2064,1	15,0	217,3	1,6	142,0	1,0
Кричевский	4493,8	56,8	3128,4	39,5	288,5	3,6	—	—	—	—
Могилевский	7429,0	59,0	4522,2	35,9	616,3	4,9	2,7	<0,1	16,0	0,1
Мстиславский	—	—	49,6	100,0	—	—	—	—	—	—
Славгородс- кий	20 381,5	73,9	6265,1	22,7	909,6	3,3	37,9	0,1	2,9	<0,1
Чаусский	13 669,4	69,5	5100,4	25,9	886,7	4,5	15,8	0,1	5,9	<0,1
Чериковский	12 772,5	60,6	6765,2	32,1	1414,9	6,7	99,8	0,5	10,0	<0,1

Максимальные площади автоморфных и слабоглееватых почвенных разновидностей в Быховском районе, а глееватых, глеевых и гидроморфных – в Краснопольском.

В большинстве районов Могилевской области минимальный балл бонитета на загрязненных пахотных землях составляет 30,2. В то же время в Бобруйском

район он достигает 42,7, в Кировском – 45,4, а в Мстиславском – 49,0 (табл. 5). Максимальные значения потенциала плодородия изменяются шире и составляют для Кировского района 45,5, Мстиславского района – 49,0, Бобруйского – 51,8, Кличевского – 56,1, Бельничского – 68,6, Климовичского и Быховского – 69,0, Чериковского – 72,9, а наибольшие значения характерны Костюковичскому, Кричевскому, Краснопольскому, Славгородскому и Чаусскому – 77,4, что приближается к значениям высокоплодородных почв.

Средневзвешенный балл бонитета загрязненных радионуклидами пахотных почв в большинстве районов ниже среднего по району [1], только в Бобруйском, Климовичском, Костюковичском, Кричевском и Славгородском он выше. Наименьший балл отмечен в Бельничском районе (42,8), а наибольший – в Кричевском (63,6).

Максимальное различие между баллом всех пахотных земель района и загрязненных характерно для Мстиславского района, что обусловлено малой площадью загрязненной пашни, представленной одной супесчаной почвенной разновидностью. В то время как преобладают на территории района суглинистые почвы, обладающие более высоким потенциальным плодородием.

Таблица 5

**Качественное состояние почв загрязненных радионуклидами пахотных земель  
Могилевской области**

Район	Балл бонитета				Плотность загрязнения**, Ки/км <sup>2</sup>			
	загрязненная пашня			вся пашня	<sup>137</sup> Cs		<sup>90</sup> Sr	
	min	max	$\bar{x}^*$	$\bar{x}^*$	max	$\bar{x}$	max	$\bar{x}$
Бельничский	30,2	68,6	42,8	53,6	4,38	1,90	–	–
Бобруйский	42,7	51,8	46,3	45,7	1,79	0,91	–	–
Быховский	30,2	69,0	46,4	46,4	13,78	2,26	0,15	0,15
Кировский	45,4	45,5	45,5	50,5	1,30	0,82	–	–
Климовичский	30,2	69,0	51,0	49,2	9,25	2,41	–	–
Кличевский	30,2	56,1	46,0	46,9	2,49	1,29	–	–
Костюковичский	30,2	77,4	54,8	51,4	28,88	6,24	0,16	0,16
Краснопольский	30,2	77,4	49,7	51,3	18,38	3,45	0,15	0,15
Кричевский	30,2	77,4	63,6	62,1	9,72	2,45	–	–
Могилевский	30,2	69,0	45,0	55,2	6,23	1,58	–	–
Мстиславский	49,0	49,0	49,0	69,2	3,26	1,18	–	–
Славгородский	30,2	77,4	50,4	46,2	16,44	4,36	0,16	0,14
Чаусский	30,2	77,4	50,0	53,9	13,36	1,74	–	–
Чериковский	30,2	72,9	51,4	54,2	27,93	4,24	0,18	0,15

\*  $\bar{x}$  – средневзвешенное значение; загрязнение.

\*\* Земли с плотностью загрязнения <sup>137</sup>Cs менее 1,0 Ки/км<sup>2</sup>, менее 0,15 Ки/км<sup>2</sup> <sup>90</sup>Sr считаются чистыми.

Средневзвешенные значения загрязнения <sup>137</sup>Cs пахотных земель в большинстве районов Могилевской области менее 5,00 Ки/км<sup>2</sup> (0,82–4,36 Ки/км<sup>2</sup>). В то же время в Костюковичском, средневзвешенная плотность загрязнения цезием-137 значительно выше и достигает 6,27 Ки/км<sup>2</sup>.

Следует отметить, что максимальные значения плотности загрязнения изменяются от 1,30 в Кировском районе и до 27,93 и 28,88 Ки/км<sup>2</sup> в Чериковском и Костюковичском соответственно.

Загрязненные <sup>90</sup>Sr пахотные земли расположены в Быховском, Костюковичском, Краснопольском, Славгородском и Чериковском районах. Максимальные плотности загрязнения, достигающие 0,18 Ки/км<sup>2</sup>, отмечены на землях в Чериковском районе.

Учитывая структуру почвенного покрова загрязненных земель и уровень загрязнения цезием-137 и стронцием-90, а также предельно допустимые плотности загрязнения радионуклидами для возделывания сельскохозяйственных культур [9], наиболее вероятно получение продукции с превышением содержания радионуклидов в продукции в Костюковичском, Чериковском и Славгородском районах.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования структуры почвенного покрова загрязненных радионуклидами пахотных земель позволили установить, что по типовому составу в Могилевской области преобладают дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные почвы, по гранулометрическому составу – супесчаные, а по степени гидроморфизма – автоморфные.

Анализ качественного состояния почв загрязненных <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr пахотных земель районов Могилевской области показал, что средневзвешенный балл их бонитета почв выше среднего по району только в Бобруйском, Климовичском, Костюковичском, Кричевском и Славгородском районах. Наименьший балл отмечен в Бельничском районе (42,8), а наибольший – в Кричевском (63,6).

Установлено, что средневзвешенные значения загрязнения <sup>137</sup>Cs пахотных земель в большинстве районов Могилевской области менее 5,00 Ки/км<sup>2</sup>. В Костюковичском районе средневзвешенная плотность загрязнения цезием-137 значительно выше и достигает 6,27 Ки/км<sup>2</sup>. Загрязненные <sup>90</sup>Sr пахотные земли расположены в Быховском, Костюковичском, Краснопольском, Славгородском и Чериковском районах. Максимальные плотности загрязнения, достигающие 0,18 Ки/км<sup>2</sup>, отмечены в Чериковском районе.

Учитывая структуру почвенного покрова загрязненных земель и уровень загрязнения цезием-137 и стронцием-90, а также предельно допустимые плотности загрязнения радионуклидами для возделывания сельскохозяйственных культур, из изученных районов наиболее вероятно получение продукции с превышением содержания радионуклидов в продукции в Костюковичском, Чериковском и Славгородском районах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских) хозяйств: методика, технология, практика / Г. М. Мороз, С. В. Дробыш, Т. Н. Зданович [и др.]; под ред. Г. М. Мороза, В. В. Лапа. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2017. – 208 с.

2. *Шибут, Л. И.* Современное состояние сельскохозяйственных земель Беларуси / Л. И. Шибут, Т. Н. Азаренок, О. В. Матыченкова // Земледелие и защита растений. – 2020. – № 2. – С. 3–7.

3. *Азаренок, Т. Н.* Земельные ресурсы Беларуси и их производительная способность / Т. Н. Азаренок, Л. И. Шибут, Н. Н. Цыбулько // Почвоведение и агрохимия. – 2020. – № 2(65). – С. 26–36.

4. 35 лет после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: нац. докл. Респ. Беларусь / Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыл. АЭС М-ва по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2020. – 152 с.

5. Загрязнение сельскохозяйственных земель  $^{137}\text{Cs}$  на территории Беларуси: динамика, современное состояние, территориальное распределение / Н. Н. Цыбулько, И. И. Жукова, В. В. Журавков [и др.] // Природные ресурсы. – 2025. – № 1. – С. 42–48.

6. Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель. Технология работ: ТКП 302-2025 (33520): издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь от 12.02.2025 № 54: взамен ТКП 302-2018 (933520): дата введения 2025-04-20. – Мн. : Госкомимущество, Проектный институт Белгипрозем, 2025. – IV. – 110 с. – (Технический кодекс установившейся практики)

7. Реестр земельных ресурсов Республики Беларусь // Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь. – URL: [https://gki.gov.by/ru/activity\\_branches-land-reestr/](https://gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr/) (дата обращения: 10.11.2025).

8. Decay Calculator // Rad Pro Calculator. – URL: <http://www.radprocalculator.com/Decay.aspx>. (date of access: 11.1.2025).

9. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы / Н. Н. Цыбулько, В. В. Лапа, И. М. Богдевич [и др.]; Национальная академия наук Беларуси, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Институт почвоведения и агрохимии. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2021. – 144 с.

## THE CURRENT STATE OF THE SOIL COVER OF ARABLE LANDS CONTAMINATED WITH RADIONUCLIDES IN THE MOGILEV REGION

V. B. Tsyrybka, H. M. Ustsinava, I. A. Lahachou, A. V. Yukhnovets,  
S. A. Kasyanchik, A. A. Mitskova, I. S. Stanilevich, N. A. Karabets

### Summary

This article presents an analysis of the current state of radionuclide-contaminated soils in arable land in the Mogilev Region.

The studies revealed that arable land contaminated with  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the Mogilev Region is dominated by sod-podzolic and sod-podzolic boggy soils in terms of typical composition, sandy loam soils in terms of particle size distribution, and automorphic soils in terms of hydromorphism. An analysis of the qualitative condition of the soils revealed that the average weighted soil quality rating of arable land contaminated with

radionuclides is higher than the district average only in the Bobruisk, Klimovichsky, Kostyukovich, Krichevsky, and Slavgorod districts. The lowest score was recorded in the Belynichsky district (42,8), and the highest in the Krichevsky district (63,6). It was established that the weighted average  $^{137}\text{Cs}$  contamination of arable land in most districts of the Mogilev Region is less than 5.00 Ci/kml, while  $^{90}\text{Sr}$ -contaminated arable land is located in the Bykhov, Kostyukovich, Krasnopol'sky, Slavgorod, and Cherkov districts.

Considering the soil structure of the contaminated lands and the level of cesium-137 and strontium-90 contamination, as well as the maximum permissible radionuclide contamination densities for agricultural crop cultivation, the Kostyukovich, Cherkov, and Slavgorod districts are the most likely districts to produce produce with exceeding radionuclide levels.

*Поступила 03.12.25*



## 2. ПЛОДРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

УДК 631.8:633

### КОМПЛЕКСНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ УДОБРЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

**В. В. Лапа, Г. В. Пироговская, С. С. Хмелевский, В. И. Сороко**

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

Урожайность сельскохозяйственных культур при возделывании на дерново-подзолистых почвах в наиболее значительной степени определяет уровень плодородия почв и внесение оптимальных доз минеральных удобрений до посева (азота, фосфора и калия) с учетом биологических особенностей возделываемых растений. Только в этом случае может быть реализован потенциал сорта при условии регулирования азотного питания и химической защиты растений от сорняков, болезней и вредителей в течение периода вегетации. Это очень важное условие эффективного использования минеральных удобрений, что чаще всего не выдерживается в практике сельского хозяйства. Неблагоприятное соотношение между азотом и фосфором отмечается вследствие недостаточного внесения фосфорных удобрений, что обуславливает в целом несбалансированность всех трех элементов питания – азота, фосфора калия. В результате минеральные удобрения не обеспечивают нормативной прибавки урожайности сельскохозяйственных культур и происходит снижение содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах. Так, в период с 2016 по 2020 гг. в расчете на 1 га пахотных почв было внесено 19 кг д. в. фосфорных и 76 кг д. в. калийных удобрений, что не компенсировало вынос этих элементов с урожаем сельскохозяйственных культур. Содержание подвижного фосфора в пахотных почвах снизилось от 188 (2013–2016 гг.) до 177 (2017–2020 гг.) мг/кг почвы, подвижного калия – от 218 до 207 мг/кг почвы соответственно.

Таким образом, нарушение принципа сбалансированности применяемых минеральных удобрений приводит сразу к двум отрицательным эффектам: недобору продуктивности возделываемых культур и снижению запасов фосфора и калия в пахотных почвах. Даже в краткосрочной перспективе это приведет к еще одному негативному последствию – снижению устойчивости сельскохозяйственных культур к неблагоприятным погодным условиям, таким как критические понижения или повышение температуры воздуха в период вегетации, которая в значительной степени повышается при высоком содержании фосфора и калия в почвах.

Решение технологических вопросов, приведенных выше, при достигнутом уровне плодородия почв может реально обеспечить формирование урожайности зерновых культур по стране 45–50 ц/га. При этом повышение урожайности может быть достигнуто за счет более высокой эффективности использования минеральных удобрений без увеличения их расчетной потребности, которая в настоящее время составляет около 1,7 млн т в действующем веществе. Обеспечить сбалансированное минеральное питание, которое является основным условием высокой эффективности NPK, при применении простых форм минеральных удобрений раздельным внесением каждого из видов удобрений на практике в силу различных причин очень сложно. Всегда возникает дефицит какого-либо удобрения, чаще всего фосфорных, что приводит к снижению окупаемости прибавкой урожайности применяемых удобрений.

По этим причинам современные агрохимические технологии предусматривают для основного внесения в почву применение комплексных форм минеральных удобрений со сбалансированным соотношением элементов питания для отдельных культур. В странах Западной Европы около 70 % от общего объема минеральных удобрений применяют в форме комплексных и только часть азотных удобрений используют в форме простых для подкормок в период вегетации.

Учеными Института почвоведения и агрохимии совместно с Белорусским государственным технологическим университетом и Гомельским химическим заводом разработан необходимый для сельского хозяйства ассортимент комплексных минеральных удобрений со сбалансированным соотношением азота, фосфора и калия для отдельных культур с учетом их биологических особенностей. Разработаны оптимальные составы удобрений, проведена оценка их эффективности, разработаны технические условия на получение опытных партий комплексных удобрений и технические условия на производство промышленных партий комплексных минеральных удобрений. Промышленное производство этих удобрений осуществляется на Гомельском химическом заводе.

Кроме необходимых макроэлементов комплексные удобрения содержат и микроэлементы, необходимые растениям на начальном этапе их роста и развития. За один проход технических средств по полю вносится весь набор элементов питания в сбалансированном для растений соотношении. Кроме того, при однократном проходе технических средств по полю в два-три раза снижаются затраты на внесение минеральных удобрений, а также уменьшается переуплотнение почвы, одного из важных показателей ее агрофизических свойств.

Новые формы комплексных минеральных удобрений, производимые на Гомельском химическом заводе, широко востребованы на экспорт, однако объемы их применения в хозяйствах Республики Беларусь недостаточны. Для того, чтобы в полной мере реализовать потенциал этих удобрений Институтом почвоведения и агрохимии разработаны рекомендации, утвержденные Научно-техническим советом по растениеводству Министерства сельского хозяйства и продовольствия, в которых предусматривается постепенное увеличение объемов их применения, в первую очередь под наиболее рентабельные культуры: озимый рапс, сахарная свекла, лен. В текущем 2025 г. этот объем должен составить 81 тыс. т в физическом весе с дальнейшим наращиванием объемов до 287 тыс. т ф. в. к 2030 г. [2].

Указанные объемы комплексных минеральных удобрений планируется применять под лен, сахарную свеклу и озимый рапс.

В технологии возделывания сахарной свеклы основная доза минеральных удобрений вносится весной до посева в форме комплексного минерального удобрения и заделывается в почву на глубину 15–20 см. Для почв со средним содержанием фосфора и калия лучшей формой удобрения является марка 16–12–20, которая может выпускаться с натрием, серой, бором и марганцем (возможно с натрием и бором). В физическом весе доза комплексного удобрения составляет 6,0–7,0 ц/га. При отсутствии комплексного удобрения используют простые формы удобрений, но для получения планируемой урожайности корнеплодов нужно обязательно обеспечить внесение расчетных доз и сбалансированного соотношения элементов питания. В фазу 4–6 листьев проводится дополнительная подкормка азотом в форме карбамида в дозе 35–45 кг/га д. в., а также некорневые подкормки – борными и марганцевыми микроудобрениями в дозе  $B_{0,3} Mn_{0,075}$  (1-я – в фазе 10–12 листьев, 2-я – через 1,0–1,5 месяца после первой подкормки).

С учетом биологических особенностей льна-долгунца и его отношения к почвенной кислотности для основного внесения под эту культуру разработаны три основные формы комплексных минеральных удобрений с соотношением NPK 5–16–35, 6–21–32 и 7–15–29 с бором, цинком и железом, которые повышают устойчивость растений к поражению бактериозом.

Марка удобрения 5-16-35 с бором, цинком и железом с соотношением азота, фосфора и калия 1 : 3,2 : 7,0 рекомендуется для почв с низким и средним содержанием калия в почвах, при средней дозе внесения перед посевом 5,0 ц/га в физическом весе, а марки 6–21–32 и 7–15–29 – на почвах со средним, повышенным и высоким содержанием калия в почвах в дозах от 3 до 5 ц/га ф. в. при средней дозе 4,0 ц/га ф.в.

Микроэлементы бор, цинк и железо, содержащиеся в комплексных минеральных удобрениях, обеспечивают потребность в них растений на начальных этапах развития, в дальнейшем в фазу елочка требуется проведение некорневой подкормки борными и цинковыми микроудобрениями в соответствии с технологическими регламентами возделывания этой культуры.

В фазе елочка при кислотности пахотного горизонта (рН 5,5–5,9) проводится одна некорневая подкормка борными и цинковыми удобрениями  $B_{0,05-0,10} Zn_{0,075-0,15}$ , а при рН 6,0–6,2 – две подкормки микроэлементами в той же дозе: 1-я в фазе елочка, 2-я – через 7–10 дней после 1-й некорневой подкормки.

Указанные формы комплексных минеральных удобрений вносятся весной до посева. При возделывании льна-долгунца на почвах с рН 6,0–6,2 с применением стандартных удобрений требуются повышенные дозы калийных удобрений по сравнению с почвами, имеющими рН 5,5–5,9. Чтобы сократить время проведения весенне-полевых работ, на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах комплексные минеральные удобрения под лен-долгунец можно вносить и с осени, однако в этом случае в зависимости от выпадения осадков в зимне-весенний период больше 300 мм весной нужно будет корректировать дозы азотных и калийных удобрений для компенсации потерь этих элементов от вымывания.

Озимый рапс. Для оптимального развития с осени нуждается в достаточном фосфорном и калийном питании и относительно небольших дозах азотных удобрений. Поэтому состав комплексных удобрений под озимый рапс учитывает данную биологическую особенность этой культуры.

Для основного внесения под озимый рапс разработаны 4 марки комплексных минеральных удобрений: 6–20–30; 8–18–25; 7–16–31 и 5–16–35 с серой, бором и марганцем. Наиболее востребованным в практике сельского хозяйства является марка 6–20–30. Комплексные удобрения вносятся перед посевом озимого рапса и заделываются в почву на глубину 15–20 см. Весной в соответствии с технологическими регламентами проводятся две подкормки азотными удобрениями (весной в начале вегетации ( $N_{100-120}$ ) и через 2–2,5 недели после первой подкормки –  $N_{60-80}$ ), одна подкормка в фазе стеблевания борными и марганцевыми микроудобрениями ( $B_{0,15}Mn_{0,75}$ ), возможна и 2-я некорневая подкормка борными удобрениями ( $B_{0,15}$ ) – перед цветением.

Однако учитывая преимущества комплексных удобрений и целевые задачи по увеличению производства зерна целесообразным расширять объем их применения и под зерновые культуры, в первую очередь, под озимую пшеницу.

В зависимости от содержания в почвах подвижных форм фосфора и калия для озимых зерновых культур, в том числе и пшеницы озимой, разработаны 3 марки комплексных минеральных удобрений: 5–16–35; 7–21–36; 7–16–31 с Cu и Mn. Наиболее универсальным для озимой пшеницы, озимого тритикале и озимой ржи является комплексное минеральное удобрение с соотношением азота, фосфора и калия 5–16–35 с микроэлементами медью и марганцем. Это же удобрение является лучшим и для льна-долгунца, но с бором, цинком и железом и для озимого рапса с серой, бором и марганцем. Комплексные минеральные удобрения вносятся под озимые зерновые культуры до посева в дозе по физическому весу от 3 до 5,0 ц/га ф. в (в зависимости от марки удобрения) и заделывается в почву на глубину 15–20 см. В дальнейшем весной в начале возобновления вегетации, начале выхода растений в трубку и появлении флагового листа проводятся подкормки азотными удобрениями, медными и марганцевыми микроудобрениями в соответствии с технологическими регламентами.

Под яровые зерновые культуры рекомендуются марки комплексных удобрений 16–12–20, 13–11–18, 14–11–19 и 13–8–17 с Cu и Mn. Марка комплексного удобрения 16–12–20 является основной для группы яровых зерновых культур (яровая пшеница, ячмень, яровое тритикале, овес), возделываемых на почвах с содержанием фосфора и калия 200–300 мг/кг почвы. В зависимости от содержания в почвах фосфора и калия могут применяться и комплексные удобрения и с другим соотношением элементов питания (13–11–18, 14–11–19, 13–8–17) с аналогичными микроэлементами, включающих также микроэлементы медь и марганец. Комплексное удобрение вносится весной до посева и заделывается на глубину 15–20 см.

В Государственном реестре средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь (2023) эти удобрения зарегистрированы (на стр. 636–637).

Технологические схемы применения комплексных удобрений под эти культуры приводятся ниже (табл. 1).

Таблица 1

**Технологическая схема применения комплексных минеральных удобрений  
до посева сельскохозяйственных культур на почвах с содержанием фосфора  
и калия 200–300 мг/кг почвы**

Дозы удобрений	Формы удобрений	Доза комплексного удобрения в физическом весе, ц/га
<b>Сахарная свекла, урожайность 500–600 ц/га</b>		
$\begin{matrix} N & P & K \\ 100-120 & 60-90 & 150-180 \end{matrix}$	<p>Комплексные удобрения:  <math>N_{13-17}P_{8-12}K_{18-22}</math>,  <math>Na_2O - 5-9 \%</math>,  <math>S - 3-5 \%</math>,  <math>B - 0,05-0,35 \%</math>,  <math>Mn - 0,2-0,3 \%</math>  (возможно и включение Zn, Cu, Co),  при отсутствии комплексных удобрений – КАС, карбамид, аммофос, хлористый калий</p>	6,0–8,0 (до посева)
<b>Лен-долгунец, урожайность волокна 10–12 ц/га; почва с pH – 5,5–5,9</b>		
$\begin{matrix} N & P & K \\ 20-30 & 60-90 & 120-150 \end{matrix}$	<p>Комплексные удобрения:  <math>N_{5-7}P_{14-22}K_{27-37}</math>,  <math>S - 4 \%</math>,  <math>B - 0,15-0,22 \%</math>,  <math>Zn - 0,24-0,30 \%</math>,  <math>Fe - 0,20-0,50 \%</math>,  (возможно и включение Cu),  при отсутствии комплексных удобрений – или аммофос и хлористый калий</p>	3,0–5,0 (до посева)
<b>Лен-долгунец, урожайность волокна 10–12 ц/га; почва с pH – 6,0–6,2</b>		
$\begin{matrix} N & P & K \\ 20-30 & 60-90 & 160-190 \end{matrix}$	<p>Комплексные удобрения:  <math>N_{5-7}P_{14-22}K_{27-37}</math>,  <math>S - 4 \%</math>,  <math>B - 0,15-0,22 \%</math>,  <math>Zn - 0,24-0,30 \%</math>,  <math>Fe - 0,20-0,50 \%</math>,  (возможно и включение Cu),  или при отсутствии комплексных удобрений – аммофос, хлористый калий</p>	4,0–6,0 (до посева)
<b>Озимый рапс, урожайность 40–50 ц/га</b>		
$\begin{matrix} N & P & K \\ 25-30 & 80-100 & 120-150 \end{matrix}$	<p>Комплексные удобрения:  <math>N_{5-8}P_{16-20}K_{25-35}</math>,  <math>S - 2-5 \%</math>,  <math>B - 0,20-0,35 \%</math>,  <math>Mn - 0,15-0,25 \%</math>  или при отсутствии комплексных удобрений – сульфат аммония, КАС, или карбамид, аммофос и хлористый калий</p>	3,0–6,0 (до посева)

Дозы удобрений	Формы удобрений	Доза комплексного удобрения в физическом весе, ц/га
<b>Озимая пшеница, озимое тритикале, урожайность 70–80 ц/га, озимая рожь, урожайность 50–60 ц/га</b>		
N <sub>14–20</sub> P <sub>75–90</sub> K <sub>110–130</sub>	Комплексные удобрения: N <sub>5–8</sub> P <sub>16–21</sub> K <sub>31–36</sub> , S – до 1 %, Cu – 0,10–0,30 %, Mn – 0,05–0,25 % или при отсутствии комплексных удобрений – аммофос, хлористый калий	3,0–5,0 (до посева)
<b>Яровая пшеница, ячмень, яровое тритикале урожайность 50–60 ц/га, овес, урожайность 40–50 ц/га</b>		
N <sub>60–90</sub> P <sub>60–90</sub> K <sub>120–150</sub>	Комплексные удобрения: N <sub>13–16</sub> P <sub>8–12</sub> K <sub>17–20</sub> , S – до 1–5 %, Cu – 0,05–0,25 %, Mn – 0,04–0,20 % или при отсутствии комплексных удобрений – карбамид или КАС, аммофос, хлористый калий	4,0–5,0 (до посева)

Определена потребность в комплексных минеральных удобрениях на 2026–2030 гг. (табл. 2).

Таблица 2

**Перспективная потребность в комплексных минеральных удобрениях под сельскохозяйственные культуры на период до 2030 г., тыс. т ф. в.**

Область	Годы					
	2026	2027	2028	2029	2030	Всего за 2026–2030 гг.
Брестская	20	25	30	35	48	158
Витебская	15	25	30	35	40	145
Гомельская	12	16	18	22	25	93
Гродненская	25	35	43	50	58	211
Минская	30	40	55	65	76	266
Могилевская	15	25	30	35	40	145
Республика Беларусь	117	166	206	242	287	1018

При расчете потребности учитывались возможные объемы применения комплексных минеральных удобрений под сахарную свеклу, лен-долгунец и озимый рапс. К 2030 г. под эти культуры запланировано произвести и применить 287 тыс. т ф. в. комплексных минеральных удобрений, а всего за 2026–2030 гг. будет внесено 1018 тыс. т ф. в. этих удобрений. В дальнейшем расширение объемов производства и применение комплексных минеральных удобрений планируется на посевах озимых и яровых зерновых культур.



## ВЫВОДЫ

1. Применение комплексных минеральных удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур является эффективным, энергосберегающим технологическим решением для повышения эффективности их использования и повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

2. Перспективная потребность в комплексных минеральных удобрениях, рассчитанная на постепенное расширение объемов их применения в сельском хозяйстве на 2026 г. составляет 117 тыс. т ф. в., на 2030 г. – 287 тыс. т ф. в.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пироговская, Г. В.* Комплексные минеральные удобрения: разработка, применение, эффективность / Г. В. Пироговская, В. В. Лапа ; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2021. – 336 с.

2. Применение комплексных минеральных удобрений в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур (рекомендации) / Г. В. Пироговская, В. В. Лапа, С. С. Хмелевский [и др.] ; Национальная академия наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. – Мн. : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2024. – 22 с.

## COMPLEX MINERAL FERTILIZERS IN CROP CULTIVATION TECHNOLOGY

**V. V. Lapa, G. V. Pirogovskaya, S. S. Khmelevsky,  
V. I. Soroko**

Technological features of the use of new forms of complex mineral fertilizers for sugar beets, flax, winter rape, winter and spring crops, balanced in their composition, taking into account the biological features of these crops, are presented. The long-term need for complex mineral fertilizers for sugar beets, flax, winter rape for the period up to 2030 has been determined. In 2030, the recommended requirement for complex mineral fertilizers is 287 thousand t c., and in total for 2026–2030 it is planned to use them in the crop industry of agriculture in the amount of 1018 thousand tons.

*Поступила 05.12.25*

## **ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ И ОКУЛЬТУРЕННОСТИ ПОЧВЫ НА УРОЖАЙНОСТЬ И НОРМАТИВНЫЙ ВЫНОС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ УРОЖАЕМ ГИБРИДНОЙ ОЗИМОЙ РЖИ**

**Т. М. Серая, Е. Н. Богатырева, Т. М. Кирдун,  
Н. Ю. Жабровская, Е. И. Гутько**

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

### **ВВЕДЕНИЕ**

Состояние почв, степень их соответствия требованиям сельскохозяйственных растений для формирования высоких урожаев оценивается степенью окультуренности почвы. На почвах с высоким уровнем плодородия для получения планируемой урожайности сельскохозяйственных культур затраты минеральных удобрений всегда ниже, чем на почвах с более низкими показателями агрохимических свойств. Поэтому повышение эффективности использования удобрений относится к числу важнейших государственных задач, стоящих перед почвенно-агрохимической наукой и аграрной отраслью Республики Беларусь. Только научно обоснованная система удобрения может обеспечить получение плановых уровней урожаев возделываемых культур хорошего качества с одновременным регулированием почвенного плодородия и соблюдением требований охраны окружающей среды.

В последние годы в Беларуси все сложнее становятся погодные условия: увеличивается количество и продолжительность засух, заморозков, шквалистых ливней. Для уменьшения рисков снижения продуктивности зерновых культур от погодного фактора определяющее значение имеет грамотно построенная структура зернового клина в направлении максимального использования ими биологических факторов при минимальных затратах ресурсов. Необходимо вводить в севооборот культуры с высокой стрессоустойчивостью и, в первую очередь, засухоустойчивые. Среди зерновых культур рожь лучше других 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 [1, 2].

Э. П. Урбан также указывает, что среди озимых зерновых – рожь наиболее адаптивная культура в условиях почвенно-климатической зоны Беларуси, которая по урожайности в большинстве случаев не уступает другим зерновым, хотя размещается, как правило, на менее плодородных почвах и по худшим предшественникам [3]. Преимуществом этой культуры является высокая зимостойкость, обусловленная биологическими свойствами и особенностями технологии возделывания. В последние годы в республике ежегодный выход зерна озимой ржи составляет 0,7–0,8 млн т или около 10 % валового сбора зерновых колосовых культур [4]. Общеизвестно, что озимая рожь – универсальная культура, зерно которой используется как на продовольствие, так и на фуражные цели в виде

компонента комбикормов. Однако в последние годы озимая пшеница постепенно вытесняет озимую рожь из структуры посевных площадей. Так, в 2021 г. озимая рожь занимала 353,4 тыс. га [5]. Согласно рабочему плану проведения осенних полевых работ в сельскохозяйственных организациях республики под урожай 2026 г. она должна быть посеяна на площади только 245,9 тыс. га, что составляет 16 % от всей площади, занятой под озимыми зерновыми культурами [6].

В Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений на 2025 г., допущенных к возделыванию на территории республики, включено 48 сортов озимой ржи отечественной и зарубежной селекции, из них более половины – гибриды с высоким потенциалом урожайности [7]. Одним из таких является гибридная рожь КВС Винетто.

По данным [8] в 2024 г. в республике гибридная рожь была высеяна на площади всего лишь 30 тыс. га; 88 % посевных площадей, отводимых под эту культуру, занимали популяционные сорта диплоидной и тетраплоидной ржи белорусской селекции. В то же время, например, в Германии гибридная рожь занимает около 60 % всех посевов этой культуры.

В текущем году мировой рынок озимой ржи оценивается в 3,6 млрд долл. США, в 2030 г. прогнозируется достичь 4,4 млрд долл. США. На рост рынка влияют изменения климата, а также растущие предпочтения заботящихся о здоровье потребителей среднего класса, что свидетельствует об актуальности проводимых исследований.

Цель исследований – оценить влияние систем удобрения на урожайность зерна гибридной озимой ржи и окупаемость удобрений на средне- и высококультурных почвах.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования с озимой рожью гибрид КВС Винетто проводили в 2021–2024 гг. на средне- и высококультурных дерново-подзолистых почвах в трех полях. Среднекультурная дерново-подзолистая супесчаная почва характеризовалась слабокислой и близкой к нейтральной реакцией почвенной среды, средним и повышенным содержанием гумуса, подвижных форм фосфора, низким и средним содержанием подвижных форм калия. Высококультурная легкосуглинистая почва характеризовалась нейтральной реакцией почвенной среды, высоким содержанием гумуса и подвижных форм калия и очень высоким – подвижных форм фосфора. Опыты заложены в 4-кратной повторности вариантов. Общий размер делянки – 31,2 м<sup>2</sup>. Предшественник озимой ржи – горох посевной. После уборки предшественника солому измельчили и равномерно распределили по делянкам, затем, согласно схеме опыта, внесли по соломе компенсирующую дозу азота в виде КАС и провели лущение стерни. Через две недели в 1-м блоке провели вспашку, во 2-м – дискование в один след. Озимую рожь высевали в конце второй – начале третьей декады сентября с нормой 60 кг/га (2,6 млн всхожих семян).

Минеральные удобрения внесены в полной дозе, рассчитанной под планируемую урожайность (на супесчаной –  $N_{70+30}P_{50}K_{90}$ ; на легкосуглинистой –  $N_{70+30}P_{25}K_{60}$ ). Фосфорные и калийные удобрения внесены под основную обработку почвы, азотные – в две подкормки: в начале возобновления ранневесенней вегетации (КАС)

и в фазу первый узел (карбамид); предусмотрен также вариант с внесением  $N_{40}$  в виде карбамида в фазе появления флаг-листа.

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» [10]. 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 2025 г. в долларовом эквиваленте (долл. США). Статистическую обработку результатов осуществляли согласно методике полевого опыта Б. А. Доспехова с использованием MS Excel 2010 [11].

Погодные условия в осенний период вегетации озимой ржи в 2021 г. были неблагоприятными для роста и развития растений (рис.). В результате озимая рожь ушла в зиму в фазе 2–3 листьев. Март был холодным и сухим, холоднее обычного и дождливыми были апрель и май. Благодаря этому озимая рожь хорошо раскустилась. Июнь был суше и теплее обычного, в результате ГТК составил 0,9 при среднемноголетнем 1,5. Погода в июле была близка к норме.

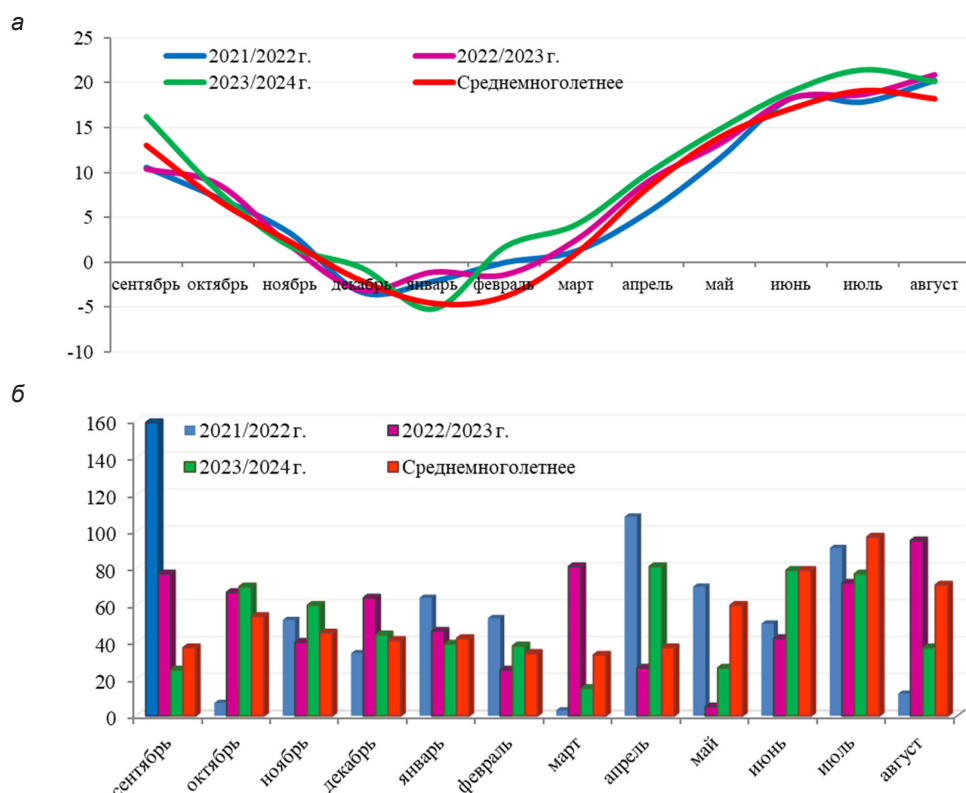


Рис. Погодные условия вегетационных периодов озимой ржи:  
а – среднесуточная температура; б – количество выпавших осадков

Погодные условия в осенний период вегетации озимой ржи в 2022 г. были близкими к предыдущему 2021 г., в период вегетации озимой ржи в 2023 г. – значительно отклонялись от нормы. В апреле складывались благоприятные температурные условия для развития возобновивших вегетацию озимых зерновых культур. Обильные осадки в марте 2023 г., составившие 222 % от 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 мае выпало всего 3 мм осадков. 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 в некоторой степени повлиял на урожайность озимой ржи на супесчаной почве.

В осенний период 2023 г. условия увлажнения и температурный режим были благоприятными для всходов озимой ржи и дальнейшего ее развития. На протяжении весенне-летней вегетации в 2024 г. растения не испытывали недостатка влаги и сформировали высокий урожай.

Несмотря на то, что погодные условия в отдельные периоды вегетации озимой ржи существенно отличались от среднеежегодных 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 в 2023 г. и сформировала достаточно высокий урожай.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайность зерна озимой ржи в неудобренном варианте на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве в среднем за 3 года составила 39,4 ц/га с относительно небольшими колебаниями по годам – от 36,6 до 42,4 ц/га (табл. 1). Внесение минеральных удобрений ( $P_{50}K_{90}$  в основное внесение,  $N_{70}$  в ранневесеннюю подкормку и  $N_{30}$  в фазу начало трубкования) способствовало росту урожайности в 1,9 раза при окупаемости 1 кг NPK 15,0 кг зерна.

Второй год последствий подстилочного навоза КРС в дозе 40 т/га не оказал существенного влияния на урожайность зерна озимой ржи. Запашка соломы гороха (2,9 т/га) без внесения компенсирующей дозы азота (Солома +  $P_{50}K_{90}$  +  $N_{70+30}$ ) также значимо не влияла на урожайность зерна по сравнению с аналогичным вариантом без соломы. За счет запашки соломы гороха с компенсирующей дозой азота (Солома +  $N_{10}$  +  $P_{50}K_{90}$  +  $N_{70+30}$ ) в среднем за 3 года урожайность зерна увеличилась на 8,1 ц/га. Третья подкормка ( $N_{40}$ ) посевов озимой ржи перед выходом флага-листа существенный прирост урожайности обеспечила только в 2024 г. – 5,9 ц/га, в два предыдущих года отмечалось снижение урожайности на 7,4 ц/га и 5,9 ц/га.

На среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве наиболее благоприятным для формирования урожайности зерна озимой ржи был 2023–2024 гг., на высококультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве – 2021–2022 гг.

За счет эффективного плодородия легкосуглинистой почвы в среднем за 3 года получено 62,0 ц/га зерна озимой ржи, что на 22,6 ц/га выше, чем на супесчаной

почве. Учитывая очень высокое содержание в почве подвижных форм фосфора и калия дозы фосфорных удобрений снижены на 25 кг/га и калийных на 30 кг/га по сравнению с дозами на среднеоккультуренной почве. Внесение  $P_{25}K_{60} + N_{70+30}$  способствовало росту урожайности в среднем за 3 года до 90,0 ц/га, что на 28,0 ц/га или 45 % выше, чем в варианте без удобрений, окупаемость 1 кг NPK составила 15 кг зерна. Запашка соломы гороха без компенсирующей дозы азота (Солома +  $P_{25}K_{60} + N_{70+30}$ ) на легкосуглинистой почве не оказала существенного влияния на урожайность по сравнению с минеральным фоном. Внесение компенсирующей дозы азота по соломе по влиянию на урожайность также было неэффективным. Третья подкормка ( $N_{40}$ ) посевов озимой ржи перед выходом флага-листа существенный прирост урожайности обеспечила в 2023 и 2024 гг. – 5,2 и 7,5 ц/га, в 2022 г. урожайность была на уровне аналогичного варианта с двумя азотными подкормками.

Таблица 1

**Влияние удобрений на урожайность озимой ржи на дерново-подзолистых почвах**

Вариант	Урожайность зерна, ц/га				При- бавка, ц/га	Окуп. 1 кг NPK, кг зерна
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	сред- нее		
Дерново-подзолистая супесчаная почва						
Без удобрений	36,6	39,2	42,4	39,4	—	—
P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	78,4	68,9	80,9	76,1	36,7	15
Посл. ПН КРС, 40 т/га+ P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	72,5	68,0	88,7	76,4	37,0	15
Солома + P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	74,8	70,3	77,6	74,2	34,8	15
Солома + N <sub>10(КАС)</sub> + P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	83,6	76,3	87,2	82,3	42,9	17
Солома + N <sub>10(КАС)</sub> + P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30+40</sub>	76,2	70,4	93,1	79,9	40,5	14
НСР <sub>05</sub>	5,3	5,2	6,2	5,6		
Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва						
Без удобрений	68,4	59,4	58,1	62,0	—	—
P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	100,0	85,5	84,4	90,0	28,0	15
Посл. ПН КРС, 40 т/га+ P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	95,2	93,1	91,1	93,1	31,1	17
Солома + P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	97,8	85,1	89,1	90,7	28,7	16
Солома + N <sub>12(КАС)</sub> + P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	95,7	90,9	89,9	92,1	30,1	15
Солома + N <sub>12(КАС)</sub> + P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30+40</sub>	95,6	96,1	97,4	96,4	34,4	15
НСР <sub>05</sub>	6,8	5,2	6,5	6,2		

Таким образом, за счет эффективного плодородия высокооккультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы урожайность зерна озимой ржи в среднем за 3 года была на 57 % выше по сравнению со среднеоккультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвой. Удобрения способствовали существенному снижению негативного влияния погодных условий и сглаживали роль степени окультуренности почвы: урожайность в удобренных вариантах на высокооккультуренной почве по сравнению со среднеоккультуренной почвой была выше на 19 %, в то время как в вариантах без внесения удобрений – на 57 %. Оценивая роль отдельных факторов в формировании урожайности зерна озимой ржи, можно заключить, что в среднем за три года за счет почвенного плодородия высокооккультуренной почвы получено 69 % урожая, за счет применения минеральных



удобрений – 31 %, на среднекультуренной – 52 % за счет плодородия почвы и 48 % за счет удобрений.

Коэффициент вариации урожайности по годам (2023–2025 гг.) на высококультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в среднем составил 5,5 %, на среднекультуренной супесчаной – 7,3 %; коэффициент вариации урожайности в зависимости от систем удобрения составил на легкосуглинистой почве 16,2 %, на супесчаной – 22,7 %.

По настоящее время в республике расчет доз удобрений под планируемую урожайность основывается на концепции расширенного воспроизводства плодородия почв, согласно которой на почвах с содержанием подвижных форм фосфора и калия ниже оптимальных значений расчетные дозы фосфорных и калийных удобрений составляют 120–150 % выноса, при содержании фосфора и калия в почве выше оптимальных параметров – дозы удобрений составляют 50–70 % выноса, при оптимальном содержании фосфора и калия в почве дозы удобрений рассчитываются под 100 % выноса. В 1970–1980 гг., когда плодородие дерново-подзолистых почв было низким, а удобрения были недорогими, такая система применения удобрений была оправдана и позволила наряду с повышением урожаев сельскохозяйственных культур значительно поднять плодородие почв республики. В настоящее время при постоянном повышении цен на удобрения, особенно фосфорные, применение удобрений в дозах существенно превышающих вынос элементов питания с урожаем приводит к снижению их окупаемости и рентабельности. Поэтому в современных условиях хозяйствования дозы минеральных удобрений под зерновые культуры должны основываться на критериях экономической и экологической целесообразности при поддержании запасов элементов питания в почвах.

Для установления нормативного выноса элементов питания урожаем гибридной озимой ржи выполнен химический анализ образцов зерна и соломы данной культуры, рассчитан хозяйственный вынос элементов питания с урожаем.

Установлено, что на дерново-подзолистой супесчаной почве в среднем за 3 года в зерне озимой ржи в удобренных вариантах содержание азота составило 1,35–1,51 %, фосфора – 0,55–0,65 %, калия – 0,51–0,64 %, в соломе азот варьировал в пределах 0,39–0,54 %, фосфор – 0,14–0,23 %, калий – 1,20–1,48 %. Хозяйственный вынос минимальным был в неудобренном варианте и составил: азота – 55 кг/га, фосфора – 29 кг/га, калия – 52 кг/га, в удобренных вариантах изменялся в пределах: азота – 114–133 кг/га, фосфора – 45–55 кг/га, калия – 111–129 кг/га (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние удобрений на хозяйственный и нормативный вынос элементов питания с урожаем озимой ржи**

Вариант	Хозяйственный вынос, кг/га			Удельный вынос, кг/т		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Дерново-подзолистая супесчаная почва						
Без удобрений	55	29	52	14,2	7,5	13,4
P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	114	49	111	14,9	6,4	14,4
Посл. ПН КРС, 40 т/га+ P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	120	47	113	14,9	6,0	13,9

Вариант	Хозяйственный вынос, кг/га			Удельный вынос, кг/т		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Солома + P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	109	45	111	15,0	6,2	14,9
Солома + N <sub>10(КАС)</sub> + P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30</sub>	131	55	128	16,3	6,8	15,2
Солома + N <sub>10(КАС)</sub> + P <sub>50</sub> K <sub>90</sub> + N <sub>70+30+40</sub>	133	49	129	16,8	6,3	15,8
Среднее по удобренным вариантам	121	49	118	15,6	6,3	14,8
Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва						
Без удобрений	101	53	86	16,2	8,4	13,7
P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	149	74	139	16,5	8,1	15,2
Посл. ПН КРС, 40 т/га+ P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	173	78	160	18,6	8,4	17,1
Солома + P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	167	75	163	18,4	8,2	17,7
Солома + N <sub>12(КАС)</sub> + P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30</sub>	172	74	161	18,8	8,0	17,3
Солома + N <sub>12(КАС)</sub> + P <sub>25</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>70+30+40</sub>	187	80	162	19,3	8,2	16,7
Среднее по удобренным вариантам	170	76	157	18,3	8,2	16,8

На высококультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в среднем за 3 года в зерне озимой ржи в удобренных вариантах содержание азота составило 1,58–1,72 %, фосфора – 0,66–0,73 %, калия – 0,47–0,53 %, в соломе: азота – 0,48–0,67 %, фосфора – 0,33–0,40 %, калия – 1,68–1,95 %. Хозяйственный вынос в варианте без удобрений составил: азота – 101 кг/га, фосфора – 53 кг/га, калия – 86 кг/га, в удобренных вариантах изменялся в пределах: азота – 149–187 кг/га, фосфора – 74–80 кг/га, калия – 139–163 кг/га.

В результате удельный вынос с 1 т зерна и соответствующим количеством соломы на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве составил: азота – 15,6 кг, фосфора – 6,3 кг, калия – 14,8 кг. На высококультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве удельный вынос элементов питания с урожаем гибридной озимой ржи был выше и составил: азота – 18,3 кг/т, фосфора – 8,2 кг/т, калия – 16,8 кг/т. ОПИСХ при определении потребности в минеральных удобрениях под сельскохозяйственные культуры пользуются данными Института почвоведения и агрохимии, где указано, что нормативный вынос с урожаем озимой ржи (сорта) составляет 28,0 кг/т азота, 12,1 кг/т фосфора и 23,3 кг/т калия. Это говорит о том, что справочную таблицу удельных выносов необходимо дополнять данными по выносу отдельно для гибридов сельскохозяйственных культур.

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 на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве при урожайности зерна 76,1 ц/га и минеральной системе удобрения (P<sub>50</sub>K<sub>90</sub> + N<sub>70+30</sub>) коэффициенты возмещения удобрениями выноса составили: азота – 0,9, фосфора – 1,0, калия – 0,8, при органоминеральной системе удобрения – азота и фосфора 1,1–1,4, калия – 1,1–1,6. Это значит, что при минеральной системе удобрения вынос азота с урожаем возмещался на 90 %, калия – на 80 %, фосфора – на 100 %. Органоминеральная система удобрения спо-

собствовала поддержанию и умеренному повышению содержания фосфора и калия в почве.

На высококультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при урожайности зерна озимой ржи 90,0 ц/га и минеральной системе удобрения ( $P_{25}K_{60} + N_{70+30}$ ) коэффициенты возмещения удобрениями выноса составили: азота – 0,7, фосфора – 0,3, калия – 0,4, при органоминеральной системе удобрения – азота 0,8–1,0, фосфора 0,4–0,5, калия – 0,6–0,9. По данным Н. Н. Семененко с соавторами [12] для высокоплодородных дерново-подзолистых почв с очень высоким содержанием фосфора и калия оптимальные коэффициенты возмещения выноса фосфора ( $P_2O_5$ ) – 0,3 и калия ( $K_2O$ ) – 0,4.

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, поставляемого для переработки в муку, в 2025 г. составляла 444,05 руб./т [13]. Пересчет в USD выполнен по курсу 3,00.

Установлено, что при условии реализации зерна озимой ржи для переработки в муку условный чистый доход от применения удобрений в среднем за 3 года на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве составит 261–352 USD/га при рентабельности 99–130 %, на высококультуренной легкосуглинистой почве, соответственно, условный чистый доход составил 222–279 USD/га при рентабельности 115–130 % (табл. 3).

Таблица 3

**Экономическая эффективность применения удобрений под озимую рожь на дерново-подзолистых почвах**

Вариант	Стоимость урожая за счет применения удобрений, USD/га	Затраты на удобрения и доработку урожая, USD/га	Условный чистый доход, USD/га	Рентабельность, %
<b>Дерново-подзолистая супесчаная почва</b>				
$P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	560	257	302	118
Посл. ПН КРС, 40 т/га + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	613	266	347	130
Солома + $P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	509	249	261	105
Солома + $N_{10(КАС)} + P_{50}K_{90} + N_{70+30}$	629	277	352	127
Солома + $N_{10(КАС)} + P_{50}K_{90} + N_{70+30+40}$	607	304	303	99
<b>Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва</b>				
$P_{25}K_{60} + N_{70+30}$	414	193	222	115
Посл. ПН КРС, 40 т/га + $P_{25}K_{60} + N_{70+30}$	460	201	260	130
Солома + $P_{25}K_{60} + N_{70+30}$	425	195	230	118
Солома + $N_{12(КАС)} + P_{25}K_{60} + N_{70+30}$	446	198	247	125
Солома + $N_{12(КАС)} + P_{25}K_{60} + N_{70+30+40}$	509	230	279	121

## ВЫВОДЫ

1. Урожайность зерна озимой ржи гибрид КВС Винетто за счет эффективного плодородия среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы в среднем за 3 года составила 39,4 ц/га, высококультуренной легкосуглинистой почвы была на 57 % выше – 62,0 ц/га.

Внесение минеральных удобрений  $N_{70+30}P_{50}K_{90}$  на среднекультуренной супесчаной почве и  $N_{70+30}P_{25}K_{60}$  на высококультуренной легкосуглинистой почве способствовало росту урожайности до 76,1 ц/га (+91 % к контролю) и 90,0 ц/га (+45 %) соответственно при окупаемости 1 кг NPK 15,0 кг зерна. Максимальная урожайность получена при органоминеральной системе удобрения: на среднекультуренной почве – при внесении  $N_{70+30}P_{50}K_{90}$  на фоне запашке соломы с компенсирующей дозой азота (82,3 ц/га), на высококультуренной почве – при внесении  $N_{70+30+40}P_{25}K_{60}$  на фоне запашке соломы с компенсирующей дозой азота (96,4 ц/га). Удобрения сглаживали роль степени окультуренности почвы: урожайность в удобренных вариантах на высококультуренной почве по сравнению со среднекультуренной почвой была выше на 19 %.

В среднем за три года за счет почвенного плодородия высококультуренной почвы получено 69 % урожая, за счет применения минеральных удобрений – 31 %, на среднекультуренной – 52 % за счет плодородия почвы и 48 % за счет удобрений.

2. Нормативный вынос с 1 т зерна гибридной озимой ржи и соответствующим количеством соломы на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве составил: азота – 15,6 кг, фосфора – 6,3 кг, калия – 14,8 кг; на высококультуренной легкосуглинистой почве был выше и составил: азота – 18,3 кг/т, фосфора – 8,2 кг/т, калия – 16,8 кг/т.

3. Применяемые системы удобрения под гибридную озимую рожь имеют высокую экономическую эффективность: условный чистый доход от применения удобрений в среднем за 3 года на среднекультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве составил 261–352 USD/га при рентабельности 99–130 %, на высококультуренной легкосуглинистой почве – 222–279 USD/га при рентабельности 115–130 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрович, Э. А. Ржаное поле Беларуси: тенденции и перспективы развития / Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 4. – С. 160–164.
2. Урбан, Э. П. Устойчива к любым экономическим рискам / Э. П. Урбан // Сельская газета. – 18.12.2018.
3. Урбан, Э. П. Методика выращивания оригинальных семян озимой ржи / Э. П. Урбан // Земледелие и защита растений. – 2015. – № 3. – С. 24–27.
4. Урбан, Э. П. Особенности биологии и технологии выращивания гибридной ржи / Э. П. Урбан, С. И. Гордей // Земледелие и защита растений. – 2019. – № 6. – С. 3–7.
5. Сельское хозяйство Республики Беларусь: статистический буклет / Нац. статистический комитет Респ. Беларусь; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Мн., 2025. – 36 с.

6. Рабочий план проведения осенних полевых работ в сельскохозяйственных организациях республики в 2025. – URL: [https://mshp.gov.by/uploads/Files/documents/plant /RABOChIJ-PLAN-osennego-seva-v-2025-g..pdf/](https://mshp.gov.by/uploads/Files/documents/plant/RABOChIJ-PLAN-osennego-seva-v-2025-g..pdf/) (дата обращения 08.12.2025).
7. Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений // Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений. – Мн., 2025. – С. 8–9.
8. Урбан, Э. П. Состояние селекции, особенности семеноводства и технологии возделывания гибридов F<sub>1</sub> озимой ржи (*Secale cereale* L.) / Э. П. Урбан, С. И. Гордей // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – Т. 63. – № 2. – С. 115–123.
9. Анализ размера и доли рынка ржи – тенденции роста и прогнозы (2025–2030) Source. – URL: [https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/global-rye-market /](https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/global-rye-market/) (дата обращения 08.12.2025).
10. Методика определения агрономической и экономической эффективности минеральных и органических удобрений / И. М. Богдевич, Г. М. Сафроновская, Н. Д. Терещенко [и др.] ; Институт почвоведения и агрохимии. – Мн., 2010. – 24 с.
11. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. – М. : Агропромиздат, 1985. – 351 с.
12. Семененко, Н. Н. Урожайность, вынос и коэффициенты возмещения выноса элементов питания в зависимости от погодных условий и применяемой системы удобрения под яровой ячмень / Н. Н. Семененко, О. Г. Кулеш, Е. Г. Мезенцева // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 1(62). – С. 120–132.
13. Об установлении фиксированных цен на сельскохозяйственную продукцию (растениеводства) урожая 2025 года, закупаемую для республиканских государственных нужд. – 2025. – URL <https://mshp.gov.by/uploads/Files/prices/postanovlenie2025.25.pdf> (дата обращения 08.12.2025).

## THE EFFECT OF THE FERTILIZER SYSTEM AND SOIL CULTIVATION ON THE YIELD AND REGULATORY REMOVAL OF NUTRIENTS BY THE HARVEST OF HYBRID WINTER RYE

T. M. Seraya, E. N. Bahatyrova, T. M. Kirdun,  
N. Yu. Zhabrovskaya, E. Y. Gutko

### Summary

Three-year studies with hybrid winter rye were conducted on sod-podzolic soils. The grain yield of winter rye hybrid KVS Vinetto due to the effective fertility of medium-cultivated sod-podzolic sandy loam soil for an average of 3 years was 39,4 kg/ha, highly cultivated light loamy soil was 57% higher – 62,0 kg/ha.

The maximum yield was obtained with an organomineral fertilizer system: on medium-cultivated soil – with the application of N<sub>70+30</sub>P<sub>50</sub>K<sub>90</sub> against the background of plowing straw with a compensating dose of nitrogen (82,3 c/ha), on highly cultivated soil – with the application of N<sub>70+30+40</sub>P<sub>25</sub>K<sub>60</sub> against the background of plowing straw with a compensating dose of nitrogen (96,4 c/ha).

The standard removal from 1 ton of hybrid winter rye grain and the corresponding amount of straw on medium-cultivated sod-podzolic sandy loam soil was: nitrogen – 15,6 kg, phosphorus – 6,3 kg, potassium – 14,8 kg: on highly cultivated light loamy soil it was higher and amounted to: nitrogen – 18.3 kg/t, phosphorus – 8,2 kg/t, potassium – 16,8 kg/t.

*Поступила 08.12.25*

УДК 631.847.22

## **БИОДЕГРАДАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ФОСФАТМОБИЛИЗУЮЩИХ РИЗОБАКТЕРИЙ *PSEUDOMONAS* spp. ПО ОТНОШЕНИЮ К ГЛИФОСАТУ**

**Н. А. Михайловская<sup>1</sup>, С. С. Романенко<sup>1</sup>, Т. В. Погирницкая<sup>1</sup>,  
Т. Б. Барашенко<sup>1</sup>, С. В. Дюсова<sup>1</sup>, А. Л. Новик<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Институт почвоведения и агрохимии,  
г. Минск, Беларусь*

*<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время гербицид глифосат (ГФ) широко применяется во всем мире. Общепринятым является мнение, что в почве глифосат быстро инактивируется из-за связывания с глинистыми частицами, а также железом и алюминием в составе оксидов и гидроксидов [1]. Однако ряд исследований показывают, что существует реальная опасность отрицательного последствия глифосата на человека и природу.

При деградации около 70 % глифосата образуется аминотетрагидрофурановая кислота (АМФК), которая также обладает гербицидным действием, а ее токсическое действие на человека в несколько раз сильнее, чем самого глифосата. В тканях сельскохозяйственных животных, получавших на корм устойчивые к действию гербицида генно-модифицированные кормовые культуры, зарегистрировано от 0,05 до 1,6 мг/кг глифосата. Особенно высокая концентрация его обнаруживается в почках и печени [2].

В опытах как на клеточных культурах, так и на животных (*in vivo*) была установлена способность даже небольших концентраций глифосата вызывать окислительный (оксидативный) стресс. Это связано со способностью ГФ связывать ряд ионов (марганца, меди, кобальта, железа, цинка, кальция и магния), что ведет к нарушению функций митохондрий, нарушению процесса окислительного фосфорилирования и образованию больших количеств активных форм кислорода [3].

Целый ряд эпидемиологических исследований выявил тесную корреляцию между возросшим применением глифосата и повышением частоты выявления таких нарушений со стороны нервной системы, как развитие аутизма и старческого слабоумия. Авторы связывают это со способностью глифосата вызывать



состояние окислительного стресса не только в периферических органах, но и в клетках головного мозга [4].

Фитотоксичность аминотетилфосфоновой кислоты также была неоднократно подтверждена. Установлено, что АМФК ингибирует биосинтез хлорофилла и нарушает проводимость устьиц [5]. Также, согласно проведенным биоинформатическим оценкам, большинство прокариот может угнетаться глифосатом [6]. Изменения в составе микробного сообщества впоследствии оказывают влияние на экологические функции микроорганизмов в почве, включая круговорот биофильных элементов, образование почвенных агрегатов и биодegradацию органических соединений. Поэтому такое воздействие на микроорганизмы отражается на плодородии почвы и урожайности сельскохозяйственных культур [1].

Глифосат – слабая органическая кислота, молекула которой состоит из фосфометильной и глициновой части. Она устойчива к фотолизу и гидролизу, однако хорошо подвергается аэробному и анаэробному микробиологическому разложению. ГФ в почве увеличивает количество микроорганизмов, способных его метаболизировать, и уменьшает количество сапрофитных грибов, которые разлагают растительные остатки.

Бактерии способны метаболизировать ГФ с помощью ферментативных систем C–P лиазы и фермента оксидоредуктазы до безопасных веществ (саркозин, фосфат и глиоксилат) путем расщепления связей углерод-фосфор и карбоксиметил-азот глифосата и использовать его фосфатные, азотные и углеродные ионы в качестве питания [7]. Преимущественная деградация глифосата с образованием АМФК широко распространена в пахотных почвах, что связано с присутствием в них легкодоступных источников фосфора, вносимых с удобрениями, в то время как микробиологическое разрушение связи C–P наблюдается в условиях низкой концентрации доступных фосфатов [8].

Для снижения негативных последствий многократного применения ГФ необходима периодическая ремедиация активными деструкторами [9–12]. Применение бактерий-деструкторов, способных разлагать ГФ до безопасных химических продуктов, обосновано с экологических и экономических позиций. Безопасная детоксикация ГФ предполагает применение бактериальных деструкторов, использующих ГФ как источник фосфора, при этом фосфоновая C–P связь в молекуле гербицида разрушается с образованием неорганического фосфата. Такие бактериальные деструкторы имеют активные C–P лиазные ферментные системы [10, 11]. В пределах одного рода бактерий только отдельные штаммы имеют активные C–P лиазы и способны обеспечивать детоксикацию ГФ.

Мировые исследования подтверждают существование фосфатнезависимой C–P лиазы у многих штаммов глифосатутилизирующих бактерий. Большинство исследователей ставят бактерии рода *Pseudomonas* sp. на передний план в разложении ГФ [13–18].

В ходе поиска биодеструкторов и путей деградации ГФ и АМФК среди ризосферных бактерий, имеющих в исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии, было выявлено, что ризобактерии рода *Pseudomonas*, которые проявляют способность растворять труднодоступные (трехзамещенные) почвенные фосфаты, характеризуются деструктивной активностью по отношению к глифосату.

Цель исследований – изучение биодegradационного потенциала фосфатмобилизирующих штаммов ризосферных бактерий *Pseudomonas* spp. по отношению к глифосату с оценкой их деструктивной активности.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований служили ранее отобранные наиболее активные ГФ-утилизирующие коллекционные штаммы ризосферных бактерий р. *Pseudomonas* spp. (*Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42) из фонда исследовательской коллекции.

Для определения продуктов биodeградации глифосата проведены *in vitro* эксперименты по культивированию фосфатмобилизующих ризобактерий в модифицированной жидкой питательной среде Дворкина-Фостера с разным содержанием гербицида в качестве источника фосфора. Состав среды (г/л): глюкоза – 5,0 г/л,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 0,375,  $\text{MgSO}_4$  – 0,075,  $\text{CaCO}_3$  – 0,03,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0,001;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 0,000001,  $\text{MnSO}_4$  – 0,000001; дрожжевой экстракт – 0,0053; трис-буфер – 6,05; (рН до 7,0; автоклавирование при 121 °С, 1,5 атм., 15 мин.). Стерильный 10%-й раствор глюкозы (0,5 атм, 15 мин.) и 50%-й раствор Торнадо (110 °С, 20 мин) готовили отдельно и вносили в питательную среду непосредственно перед использованием.

В ходе исследований в три конические колбы (V 500 мл) с 300 мл жидкой питательной среды вносили разные дозы гербицида Торнадо ( $\text{C}_1$ ,  $\text{C}_2$  и  $\text{C}_3$ ) из расчета до конечной концентрации 1,0, 2,0 и 3,0 мг/мл. В колбы прибавляли по 5,0 мл исследуемой посевной бактериальной культуры, тщательно перемешивали. Инокулированную среду разливали в три стерильные конические колбы объемом 250 мл по 100 мл в каждую (повторность в опыте трехкратная). Культуры бактерий инкубировали в термостате при температуре 28 °С с периодическим перемешиванием на шейкере орбитальном KS-501 digital IKA WERKE (GmbH&Co.KG) при 80 об/мин) в течение двух недель. Контроль: среда без внесения гербицида и среда с внесением ГФ ( $\text{C}_1$ ,  $\text{C}_2$  и  $\text{C}_3$ ).

В качестве посевного материала использовали двухсуточные культуры отобранных ранее наиболее активных по утилизации ГФ коллекционных штаммов ризобактерий *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-11, P-15 и P-42), выращенных на плотном агаре. Бактериальные культуры смывали физиологическим раствором и разбавляли до концентрации  $1,5 \cdot 10^8$  КОЕ/мл.

Для изучения биодеструкции ГФ методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) использовали бесклеточные экстракты *Pseudomonas* spp., полученные путем центрифугирования культуральных жидкостей ризобактерий при 5000 об/мин в течение 30 мин и фильтровании надосадочных жидкостей через мембранный фильтр с диаметром пор 0,2 мкм.

Хроматографическую подвижность  $R_f$  глифосата и продуктов его деградации ризосферными бактериями *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-11, P-15, P-42) определяли на пластинках Сорбфил ПТСХ-АФ-А-УФ на алюминиевой подложке с силикагелем в качестве сорбента при вертикальном элюировании в системе растворителей изопропанол : 5%-й водный  $\text{NH}_4\text{OH}$  в соотношении 1 : 1 (V/V).

Для мониторинга жизнеспособности ризобактерий в *in vitro* экспериментах проводили определение оптической плотности инкубационной смеси (OD при  $\lambda = 500$  нм) на спектрофотометре UV/VIS SP 8001. После окончания эксперимента определяли жизнеспособность клеток бактерий. Для этого проводили посев соответствующих разведений культуральной жидкости бактерий (разные concentra-

ции ГФ) на картофельный агар. Результаты считали достоверными при отклонении величин в пределах  $\pm 5\%$ .

В целях определения активности деструкции глифосата штаммами *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42 проведены лабораторные эксперименты по культивированию ризобактерий в жидкой среде Дворкина-Фостера с содержанием 300 мг ГФ/л и 500 мг ГФ/л (0,3 мг ГФ/мл и 0,5 мг ГФ/мл) в качестве источника фосфора. Оценку деструктивной активности ризобактерий *Pseudomonas* spp. осуществляли по накоплению неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной культуральной жидкости (БКЖ). Концентрацию неорганического фосфора определяли по методу Мэрфи и Райли [19]. В мерные колбы (объем 50 мл) отбирали по 2 мл БКЖ и доводили до метки дистиллированной водой. Тщательно перемешивали. Для определения содержания неорганического фосфата в пробирки отбирали по 5 мл разбавленной БКЖ, приливали 1 мл окрашивающего раствора и выдерживали 10 минут при комнатной температуре для полного развития окраски. Оптическую плотность ( $OD_{710}$ ) окрашенного раствора измеряли на спектрофотометре Metertech UV-VISSP 8001. В присутствии неорганического фосфата раствор окрашивается в голубой цвет с фиолетовым оттенком.

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.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовательской коллекции ризобактерий Института почвоведения и агрохимии имеются штаммы фосфатмобилизующих бактерий рода *Pseudomonas*. Коллекционные ризобактерии этой группы микроорганизмов обладают PGP-потенциалом (ростостимулирующим эффектом на растения), способны к растворению ортофосфата кальция и обладают фунгистатическим действием против корневых гнилей. Действие отдельных штаммов *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-16, P-25 и P-28) на растения изучены в полевых, вегетационных и модельных лабораторных опытах. Установлено, что они повышают урожайность сельскохозяйственных культур, улучшают качество продукции, оказывают положительное влияние на фотосинтетический потенциал растений [20, 21].

В серии лабораторных *in vitro* исследований установлено, что фосфатрастворяющие ризобактерии *Pseudomonas* spp. способны расти на твердых и в жидких питательных средах в присутствии глифосата, как источника фосфора, и способны к его утилизации. Наибольшей активностью обладали штаммы *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42, которые и были отобраны для дальнейшей работы [22]. Для установления продуктов биodeградации глифосата этими штаммами ризобактерий и количественной оценки их деструктивной активности проведена серия лабораторных экспериментов.

Необходимо отметить сложность проблемы идентификации глифосата в смесях, которая обусловлена его химическими свойствами. Молекула глифосата содержит фрагмент фосфоновой кислоты, фрагмент карбоновой кислоты и аминокгруппу. Глифосат проявляет свойства трех классов химических соединений, что усложняет

его идентификацию. В молекулах ГФ и АМФК отсутствуют хромофоры, поэтому невозможно использование спектральных методов для определения этих веществ в видимой части спектра. В настоящее время основными методами идентификации глифосата являются хроматография (жидкостная, газовая, ионная), сочетание хроматографии с масс-спектрометрией и тонкослойная хроматография [23].

Хроматография в тонком слое сорбента является доказательным экспресс-методом разделения и идентификации малых количеств органических соединений и широко используется, в том числе для идентификации продуктов катаболизма глифосата в культуральной жидкости ГФ-утилизирующих ризобактерий [24, 25]. Важным показателем в тонкослойной хроматографии является величина  $R_f$ -коэффициент подвижности, который представляет собой отношение расстояния, пройденного пятном вещества, к расстоянию, пройденному фронтом растворителя от линии старта. По этому критерию проводят распознавание компонентов в смеси.

Глифосат и продукты его деградации по химической классификации относятся к аминам. Для их обнаружения ТСХ-пластину опрыскивали раствором нингидрина в ацетоне (0,25 %), нагревали в течение 1–2 мин при 80 °С [24, 26]. Сначала на хроматограмме проявляются первичные амины (глицин и аминометилфосфоновая кислота), а потом – вторичные амины (глифосат и саркозин). Наибольшей хроматографической подвижностью в системе «изопропанол – 5%-й раствор аммиака» обладает глицин, а наименьшей – аминометилфосфоновая кислота.

В результате проведения экспериментов получены хроматограммы бесклоточных экстрактов ризобактерий *Pseudomonas* spp. после двух недель инкубации при содержании ГФ в среде 1,0, 2,0 и 3,0 мг/мл. Анализ ТСХ-хроматограмм (рис.) показывает, что протестированные штаммы ризобактерий *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-11, P-15, P-42) нашей коллекции разлагают глифосат, в культуральной жидкости он практически отсутствует. Аминометилфосфоновой кислоты ( $R_f = 0,25 \pm 0,01$ ) среди продуктов катаболизма не обнаружено. На ТСХ-хроматограмме регистрируется новое вещество с более высокой хроматографической подвижностью,  $R_f$  которого выше, чем глифосата ( $R_f = 0,33 \pm 0,010$ ) и близкое к саркозину (метилглицину,  $R_f = 0,54 \pm 0,022$ ).

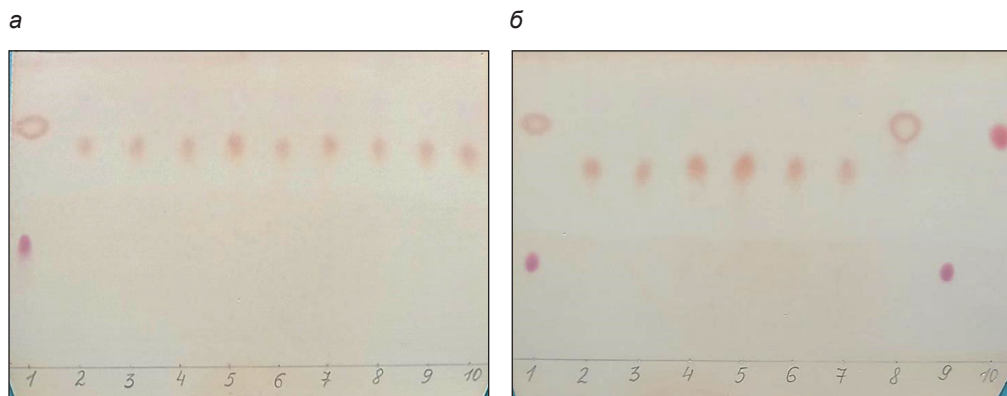


Рис. ТСХ -хроматограммы БКЖ штаммов *Pseudomonas* sp. P-6 (2–4 а), *Pseudomonas* sp. P-7 (5–7 а), *Pseudomonas* sp. P-11 (8–10 а), *Pseudomonas* sp. P-15 (2–4 б) и *Pseudomonas* sp. P-42 (5–7 б); вещества-свидетели: глифосат + глицин (1 а, 1 б), глицин (8 б), глифосат (9 б)

Исходя из анализа хроматограмм БКЖ штаммов *Pseudomonas* spp. следует, что отобранные пять штаммов ГФ-утилизирующих ризобактерий метаболизируют глифосат до безопасного метилглицина без образования АМФК, что, судя по всему, связано с разрывом фосфоновой связи в молекуле гербицида благодаря С–Р лиазной активности рассматриваемых нами штаммов.

В процессе катаболизма глифосата по фосфоновой С–Р связи в культуральной жидкости бактерий накапливался неорганический фосфор (Pi), содержание которого дает возможность дать количественную оценку деструктивной активности штаммов *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-11, P-15, P-42) нашей коллекции. В целях определения деструктивной активности ризобактерий по накоплению неорганического фосфата (Pi) выполнены лабораторные эксперименты по культивированию коллекционных ризобактерий *Pseudomonas* spp. в жидкой среде Дворкина-Фостера с разным содержанием глифосата (C<sub>1</sub> – 300 мг/л и C<sub>2</sub> – 500 мг/л) в качестве источника фосфора.

Содержание неорганического фосфата в БКЖ по методу Мэрфи и Райли проводили с использованием традиционного колориметрического метода. Показатели оптической плотности (OD<sub>710</sub>) БКЖ ГФ-утилизирующих бактерий *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42 приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Показатели оптической плотности (OD<sub>710</sub>) БКЖ ризобактерий *Pseudomonas* spp.**

Штамм	C <sub>ГФ</sub> мг/л	OD <sub>710</sub>			
		1	2	3	4
<i>Pseudomonas</i> sp. P-6	300	0,078	0,073	0,079	0,073
	500	0,106	0,105	0,113	0,113
<i>Pseudomonas</i> sp. P-7	300	0,072	0,072	0,067	0,068
	500	0,113	0,111	0,106	0,115
<i>Pseudomonas</i> sp. P-11	300	0,089	0,082	0,097	0,071
	500	0,127	0,129	0,119	0,117
<i>Pseudomonas</i> sp. P-15	300	0,071	0,073	0,079	0,079
	500	0,104	0,109	0,121	0,123
<i>Pseudomonas</i> sp. P-42	300	0,086	0,085	0,115	0,113
	500	0,120	0,118	0,136	0,134

В таблице 2 приведены количественные данные (мг/л) по содержанию неорганического фосфата (Pi) в БКЖ штаммов *Pseudomonas* spp., рассчитанные по калибровочному графику с учетом разбавления и использования калибровочного коэффициента (K = 1,1) для спектрофотометра Metertech UV/VIS SP 8001 и в пересчете на 1 л объема. Результаты считали достоверными при отклонении величин в пределах ± 5 %.

Таблица 2

**Содержание неорганического фосфата (Pi) в БКЖ ГФ-утилизирующих бактерий *Pseudomonas* spp.**

Штамм	C <sub>ГФ</sub> мг/л	Содержание неорганического фосфата (Pi), мг/л				
		1	2	3	4	среднее
<i>Pseudomonas</i> sp. P-6	300	21,5	20,1	21,7	20,1	20,9
	500	29,2	28,9	31,1	31,1	30,1

Штамм	C <sub>ГФ</sub> мг/л	Содержание неорганического фосфата (Pi), мг/л				
		1	2	3	4	среднее
<i>Pseudomonas</i> sp. P-7	300	19,8	19,8	18,4	18,7	19,2
	500	31,1	30,5	29,2	31,6	30,6
<i>Pseudomonas</i> sp. P-11	300	24,5	22,6	26,7	19,5	23,3
	500	34,9	35,5	32,7	32,2	33,8
<i>Pseudomonas</i> sp. P-15	300	19,5	20,1	21,7	21,7	20,8
	500	28,6	30,0	33,3	33,8	31,4
<i>Pseudomonas</i> sp. P-42	300	23,7	23,4	31,6	31,1	27,5
	500	33,0	32,5	37,4	36,9	35,0
HCP <sub>0,5</sub> фактор А (штамм) – 2,19 фактор В (C <sub>ГФ</sub> ) – 1,39 фактор АВ – 3,10						

На основании количественных данных по содержанию неорганического фосфата (Pi) в БКЖ и с учетом химического состава глифосата рассчитаны показатели деструктивной активности пяти штаммов ризобактерий *Pseudomonas* spp. Установлено, что при концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42 находилась в диапазоне 45,8–65,6 %. (табл. 3).

Таблица 3

**Деструктивная активность ГФ-утилизирующих штаммов бактерий *Pseudomonas* spp. при исходной концентрации глифосата 300 мг/л**

Штамм	Накопление неорганического фосфата (Pi) за 7 дней инкубации, мг/л	Разложилось глифосата, мг/л	Деструктивная активность, %
<i>Pseudomonas</i> sp. P-6	20,9	149,6	49,9
<i>Pseudomonas</i> sp. P-7	19,2	137,4	45,8
<i>Pseudomonas</i> sp. P-11	23,3	166,7	55,6
<i>Pseudomonas</i> sp. P-15	20,8	148,9	49,6
<i>Pseudomonas</i> sp. P-42	27,5	196,8	65,6

При концентрации глифосата 500 мг/л активность деструкции ГФ пятью штаммами ризобактерий *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-11, P-15, P-42) находилась в пределах 43,1–50,1 % (табл. 4).

Таблица 4

**Деструктивная активность ГФ-утилизирующих штаммов бактерий *Pseudomonas* spp. при исходной концентрации глифосата 500 мг/л**

Штамм	Накопление неорганического фосфата (Pi) за 7 дней инкубации, мг/л	Разложилось глифосата, мг/л	Деструктивная активность, %
<i>Pseudomonas</i> sp. P-6	30,1	215,4	43,1
<i>Pseudomonas</i> sp. P-7	30,6	219,0	43,8
<i>Pseudomonas</i> sp. P-11	33,8	241,9	48,4
<i>Pseudomonas</i> sp. P-15	31,4	224,7	44,9
<i>Pseudomonas</i> sp. P-42	35,0	250,5	50,1



## ВЫВОДЫ

Проведена серия *in vitro* экспериментов по культивированию ризобактерий *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42 исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии в жидких средах с глифосатом как источником фосфора. Результаты экспериментов показали, что все пять штаммов ризобактерий проявляют биодеградационную способность по отношению к глифосату. Согласно данным планарной хроматографии процесс катаболизма глифосата осуществляется по саркозиновому пути без выявления токсичной аминотетилфосфоновой кислоты, с образованием безопасного метилглицина.

Деструктивная активность коллекционных штаммов *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42, рассчитанная по накоплению неорганического фосфата (Pi) в культуральной жидкости, при концентрации глифосата 300 мг/л составила 49,9 %, 45,8 %, 55,6 %, 49,6 % и 65,6 %, при концентрации глифосата 500 мг/л – 43,1 %, 43,8 %, 48,4 %, 44,9 % и 50,1 % соответственно. Штаммы этих ризосферных бактерий могут рассматриваться в качестве деструкторов глифосата для биоремедиации загрязненных природных объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borggaard, O. K. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review / O. K. Borggaard, L. Gimsing // *Pest Management Science*. – 2008. – Vol. 64. – P. 441–456.
2. Bai, S. H. Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination / S. H. Bai, S. M. Ogbourne // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – Vol. 23(19). – P. 18988–19001. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7425-3>
3. Potential toxic effects of glyphosate and its commercial formulations below regulatory limits, / R. Mesnage, N. Defarge, J. Spiroux de Vendomois, G.E. Sйralini // *Food and Chemical Toxicology*. – 2015. – Vol. 84. – P. 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.08.012>.
4. Swanson, N. L. Genetically engineered crops, glyphosate and the deterioration of health in the United States of America. / N. L. Swanson, A. Leu, J. Abrahamson, B. Wallet // *Journal of Organic Systems*. – 2014. – Vol. 9. – P. 6–37.
5. Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: an overview / M. P. Gomes., E. Smedbol, A. Chalifour [et al.] // *Journal of Experimental Botany*. – 2014. – Vol. 65. – P. 4691–4703.
6. Antibacterial activity and mechanism of action of phosphonopeptides based on aminomethylphosphonic acid / F. R. Atherton, M. J. Hall, C. H. Hassall [et al.] // *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. – 1982. – Vol. 22. – P. 571–578.
7. Glyphosate: monograph / M. Watts, P. Clausen, A. Lyssimachou [et al.]. – Malaysia: Pesticide Action Network, 2016. – 95 p. – URL: <https://pan-international.org/wp-content/uploads/Glyphosate-monograph.pdf> (date of access: 14.04.2025).
8. Dick, R. E. Glyphosate-degrading isolates from environmental samples: occurrence and pathways of degradation / R. E. Dick, J. P. Quinn // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 1995. – Vol. 43. – P. 545–550.

9. Recent advances in glyphosate biodegradation / H. Zhan, Y. Feng, X. Fan, S. Chen // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 102. – P. 5033–5043.

10. Kamat, S. S. The enzymatic conversion of phosphonates to phosphate by bacteria / S. S. Kamat, F. M. Raushel // *Current Opinion in Chemical Biology*. – 2013. – Vol. 17. – № 4. – P. 589–596. – Doi: 10.1016/j.cbpa.2013.06.006.

11. Биодegradация фосфорорганических загрязнителей почвенными бактериями: биохимические аспекты и нерешенные проблемы / А. В. Свиридов, Т. В. Шушкова, Д. О. Эпиктетов [и др.] // *Биотехнология*. – 2020. – Т. 36, № 4. – С. 126–135. – Doi: 10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135.

12. Михайловская, Н. А. Глифосат и аминометилфосфоновая кислота в природных средах и их микробная трансформация (обзор) / Н. А. Михайловская // *Весті НАН Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 114–125.

13. Kishore, G. M. Degradation of glyphosate by *Pseudomonas* SP-PG2982 via a sarcosine intermediate / G. M. Kishore, G. S. Jacob // *Journal of Biological Chemistry*. – 1987. – Vol. 262. – Iss. 25. – P. 12164–12168. – Doi: 10.1016/S0021-9258(18)45331-8.

14. Environmental health criteria 159. Glyphosate. International programme on chemical safety // IPCS INCHEM Home – URL: <https://incchem.org/documents/ehc/ehc/ehc159.htm> (date of access: 02.05.2025).

15. Glyphosate induced specific and widespread perturbations in the metabolome of soil *Pseudomonas* species / L. Aristilde, M. L. Reed, R. A. Wilkes [et al.] // *Frontiers in Environmental Science*. – 2017. – Vol. 5. – Doi: 10.3389/fenvs.2017.00034.

16. Groom, E. Control of glyphosate uptake and metabolism in *Pseudomonas* sp. 4ASW / E. Groom, J. P. Quinn // *FEMS Microbiology Letters*. – 1995. – Vol. 134. – Iss. 2–3. – P. 177–182. – Doi: 10.1111/j.1574-6968.1995.tb07934.x.

17. Мкртумян, Д. У. М. Е. Isolation, characterization and biodegradation assay of glyphosate utilizing bacteria from exposed rice farm / D. U. M. E. Мкртумян, V. O. E. Simeon // *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. – 2015. – Vol. 5. – Iss. 5. – P. 96–109. – URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JBAH/article/download/20632/21566> (date of access: 05.05.2025).

18. Characterization of a New *Pseudomonas Putida* Strain Ch2, a Degradator of Toxic Anthropogenic Compounds Epsilon-Caprolactam and Glyphosate / T. Z. Esikova, T. O. Anokhina, N. E. Suzina [et al.] // *Microorganisms*. – 2023. – Vol. 11. – Iss. 3. – P. 650. – Doi: 10.3390/microorganisms11030650.

19. Murphy, J. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters / J. Murphy, J. P. Riley // *Analytica Chimica Acta*. – 1962. – Vol. 27. – P. 31–36. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)88444-5)

20. Влияние фосфатмобилизирующих бактерий на ростовые процессы, урожайность и фитосанитарное состояние посевов зерновых культур на д-п супесчаных почвах / Н. А. Михайловская, И. М. Богдевич, О. Миканова [и др.] // *Почвоведение и агрохимия*. – 2012. – № 1(48). – С. 136–149.

21. Влияние ризобактерий р. *Pseudomonas* на фотосинтетический потенциал кукурузы в присутствии глифосата в почве / Н. А. Михайловская, С. А. Касьянчик, Т. Б. Барашенко [и др.] // *Почвоведение и агрохимия*. – 2023. – № 2(71). – С. 80–90.

22. Скрининг фосфатрастворяющих ризобактерий *Pseudomonas* spp. по активности культурального роста в зависимости от содержания глифосата в жидкой

среде Дворкина-Фостера / Н. А. Михайловская, С. А. Касьянчик, Т. Б. Барашенко [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2023. – № 1(70). – С. 136–148.

23. Лапа, В. В. Способность калиймобилизирующих бактерий *Bacillus* метаболизировать гербицид глифосат с образованием метилглицина / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. В. Погирницкая // Доклады НАН Беларуси. – 2025. – № 3 (69). – С. 258–264.

24. Zelenkova, N. F. Determination of glyphosate and its biodegradation products by chromatographic methods / N. F. Zelenkova, N. G. Vinokurova // Journal of Analytical Chemistry. – 2008. – Vol. 63. – № 9. – P. 871–874. <https://doi.org/10.1134/s106193480809013x>

25. Ragab, M. T. H. Thin-layer chromatographic detection of glyphosate herbicide (N-phosphonomethyl glycine) and its aminomethyl phosphonic acid metabolite / M. T. H. Ragab // Chemosphere. – 1978. – Vol. 7. – No 2. – P. 143–153. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(78\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(78)90041-3)

26. Методы определения микроколичеств пестицидов в продуктах питания, кормах и внешней среде: Справочник: в 2 т. / М. А. Клисенко, А. А. Калинина, К. Ф. Новикова, Г. А. Хохолькова. – М.: Агропромиздат, 1992. – Т. 2. – 416 с.

## BIODEGRADATION POTENTIAL OF PHOSPHATE-MOBILIZING RHIZOBACTERIA *PSEUDOMONAS* SPP. TOWARDS GLYPHOSATE

N. A. Mikhailouskaya, S. S. Romanenko, T. V. Pogirnitskaya, T. B. Barashenko, S. V. Dyusova, A. L. Novik

### Summary

A series of in vitro experiments were conducted cultivating phosphate-mobilizing rhizobacteria in a modified Dworkin-Foster liquid nutrient medium with varying concentrations of herbicide as a phosphorus source. Planar (thin-layer) chromatography was used to study glyphosate biodegradation. Experimental data indicate that *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-11, P-15, P-42) rhizobacteria from the collection of the Institute of Soil Science and Agrochemistry metabolize glyphosate to safe sarcosine (methylglycine,  $R_f = 0,54 \pm 0,022$ ) and inorganic phosphate (Pi) without forming toxic aminomethylphosphonic acid. Using the data below on the inorganic phosphate (Pi) content in the cell-free culture fluid and taking into account the chemical composition of glyphosate, the destructive activity indices were calculated. At glyphosate concentrations of 300 mg/l, the destructive activity of *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 and *Pseudomonas* sp. P-42 sources in some cases was 45,8–65,6 %. At glyphosate concentrations of 500 mg/l, the activity of GP destruction by strains of rhizobacteria *Pseudomonas* spp. (P-6, P-7, P-11, P-15, P-42) was within 43,1–50,1 % and was respectively: 43,1 %; 43,8 %; 48,4 %; 44,9 % and 50,1 %.

Поступила 05.11.25

## КАТАБОЛИЗМ ГЛИФОСАТА У СИМБИОТИЧЕСКИХ РИЗОБАКТЕРИЙ *RHIZOBIUM TRIFOLII*

Н. А. Михайловская<sup>1</sup>, С. С. Романенко<sup>1</sup>, Т. В. Погирницкая<sup>1</sup>,  
Т. Б. Барашенко<sup>1</sup>, С. В. Дюсова<sup>1</sup>, А. Л. Новик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт почвоведения и агрохимии,  
г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Беларусь

### ВВЕДЕНИЕ

Применение глифосата (ГФ) в качестве гербицида обусловлено его эффективностью, невысокой стоимостью и созданием устойчивых к ГФ сортов основных сельскохозяйственных культур. Однако международные научные данные свидетельствуют, что глобальное использование гербицида привело к практически повсеместному присутствию остаточных количеств глифосата и его основного метаболита, аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), в окружающей среде: в воздухе, в почвах, природных водах и в продукции растениеводства. В настоящее время, по мере совершенствования методов исследований и роста их количества, уже невозможно утверждать, что применение глифосата не влияет или оказывает незначительное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [1, 2]. Однако противоречия при оценке экологической опасности глифосата по-прежнему сохраняются.

Главным аргументом в пользу безопасности ГФ считалось быстрое снижение его концентрации в почве, однако сейчас установлено, что это связано с трансформацией гербицида в основной метаболит, АМФК, который сильнее адсорбируется почвой, медленнее разлагается и более опасен, чем собственно гербицид [3, 4]. В качестве аргументов в защиту безопасности ГФ и АМФК приводятся такие факторы, как отсутствие летучести и сильная адсорбция к почвенным компонентам. Принцип действия глифосата [5], как ингибитора клеточного биосинтеза ароматических аминокислот в шикиматном пути, также приводится как аргумент в пользу безопасности гербицида, на том основании, что у человека и животных этот путь биосинтеза отсутствует.

В последние десятилетия число научных публикаций, подтверждающих негативный экологический эффект и токсическое действие глифосата и аминометилфосфоновой кислоты на живые организмы, значительно возросло. В соответствии с современными научными данными глифосат рассматривается как опасный загрязнитель, приносящий хронический отдаленный вред живым организмам и окружающей среде [1, 3, 6].

К настоящему времени выявлен широкий спектр воздействий глифосата на здоровье человека. По данным G. Chaufan, I. Coalova, M. Molina глифосат и его коммерческие формы оказывают цитотоксическое действие на клетки человека и вызывают их апоптоз [7]. Установлено негативное действие на репродуктивное здоровье человека, глифосат вызывает апоптоз и некроз эмбриональных и плацентарных клеток [8, 9]. Исследования C. Gasnier, C. Dumont, N. Benchour

и др. показали, что ГФ-содержащие гербициды приводят к эндокринным нарушениям у человека [10]. Установлено негативное действие глифосата на эритроциты крови [11]. В исследованиях A. DeRoos, A. Blair, J.A. Rusieck и др. установлена повышенная распространенность онкологических заболеваний среди работников, непосредственно выполняющих обработки глифосатом [12]. В ряде научных исследований отмечается, что аминотетилфосфоновая кислота вызывает нарушения жизненно важных процессов репарации ДНК и синтеза мРНК в растительных и животных организмах [1].

В настоящее время детоксикация глифосата и аминотетилфосфоновой кислоты в окружающей среде представляет глобальную проблему. По современным представлениям самыми эффективными являются микробные методы разложения глифосата и АМФК [3, 4]. Для решения проблемы детоксикации необходимы поиски бактериальных деструкторов, разлагающих глифосат и АМФК до экологически безопасных конечных продуктов. Это подразумевает, что целевые объекты должны утилизировать гербицид как источник фосфора. Установлено, что именно такие бактерии имеют активный C–P лиазный мультиферментный комплекс, расщепляющий фосфоновую C–P связь с образованием экологически приемлемых продуктов [1, 3, 4].

Несмотря на то, что способность к биодegradации глифосата проявляют бактерии разных родов, коммерческие препараты для безопасной детоксикации ГФ пока не разработаны из-за высокого уровня штаммовой специфичности, связанной с различием путей его катаболизма (разложения) у бактерий разной таксономической принадлежности. По современным представлениям способность к биодegradации глифосата в почве и воде проявляют бактерии разных родов. Глифосат-утилизующие бактерии распространены среди pp. *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* [3, 13, 14], *Azospirillum* [14–17], *Arthrobacter* [3], *Flavobacterium* sp. [3] и некоторых других.

Симбиотические бактерии *Rhizobium* sp. исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии характеризуются комплексом полезных свойств: обладают азотфиксирующей активностью, оказывают гормональное воздействие на растения, эффективно растворяют трехзамещенные фосфаты кальция. В серии *in vitro* экспериментов установлено, что симбиотические (*Rhizobium* sp.) диазотрофы способны метаболизировать гербицид глифосат в качестве источника фосфора [18]. Это предполагает безопасную детоксикацию гербицида.

Цель исследований – изучение катаболизма гербицида глифосат у штаммов клубеньковых ризобактерий *Rhizobium trifolii* с оценкой их деструктивной активности.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объекты исследований – штаммы симбиотических бактерий *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) из фонда исследовательской коллекции.

Для определения продуктов биодegradации глифосата проведены *in vitro* эксперименты по культивированию ризобактерий *Rhizobium trifolii* в модифицированной жидкой питательной среде Дворкина-Фостера с разным содержанием гербицида (0,3–2,0 мг/мл) в качестве источника фосфора.

Для проведения лабораторных экспериментов по культивированию коллекционных ризобактерий *Pseudomonas* spp. в жидкой среде Дворкина-Фостера при разных концентрациях глифосата в качестве источника фосфора готовили инокулянты: штаммы ризобактерий *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) высевали на агаризованную гороховую среду в пробирки и выдерживали в термостате при температуре 25°C в течение трех суток. Бактериальные культуры смывали физиологическим раствором и разбавляли до концентрации  $1,5 \cdot 10^8$  КОЕ/мл.

В лабораторных экспериментах с ризобактериями *Rhizobium trifolii* (R-45, R-107 и R-63/3) использовали жидкую модифицированную минеральную среду Дворкина-Фостера [19] следующего состава (г/л): глюкоза – 5,0 г/л,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 0,375,  $\text{MgSO}_4$  – 0,075,  $\text{CaCO}_3$  – 0,03,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0,001;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 0,000001,  $\text{MnSO}_4$  – 0,000001; дрожжевой экстракт – 0,0053; трис-буфер – 6,05; (pH до 7,0).

Источником фосфора в лабораторных исследованиях служил глифосат в составе гербицида Торнадо 500:в.р., 500 г/л (изопропиламинная соль). Изготовитель: АО Фирма «Август», Россия, ТУ 20.20.12-071-18015953-2017 г.

**Лабораторный эксперимент 1.** В две конические колбы (V 500 мл) с 300 мл жидкой питательной среды Дворкина-Фостера вносили разные дозы гербицида Торнадо ( $C_1$  и  $C_2$ ) из расчета до конечной концентрации 1,0 и 2,0 мг/мл. В колбы прибавляли по 5,0 мл исследуемой посевной бактериальной культуры, тщательно перемешивали. Инокулированную среду разливали в три стерильные конические колбы объемом 250 мл по 100 мл в каждую (повторность в опыте 3-кратная). Культуры бактерий инкубировали в термостате при температуре 25°C с периодическим перемешиванием на шейкере орбитальном KS-501 digital IKA WERKE (GmbH&Co.KG) при 80 об/мин) в течение четырех недель. Контроль: среда без внесения гербицида и среда с внесением ГФ ( $C_1$  и  $C_2$ ).

Для изучения биодеструкции ГФ методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) использовали бесклеточные экстракты *Rhizobium trifolii* полученные путем центрифугирования культуральных жидкостей ризобактерий при 5000 об/мин в течение 30 мин. и фильтровании надосадочных жидкостей через мембранный фильтр с диаметром пор 0,2 мкм. Хроматографическую подвижность  $R_f$  глифосата и продуктов его деградации ризосферными бактериями *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) определяли на пластинах Сорбфил ПТСХ-АФ-А-УФ на алюминиевой подложке с силикагелем в качестве сорбента при вертикальном элюировании в системе растворителей изопропанол : 5% водный  $\text{NH}_4\text{OH}$  в соотношении 1 : 1 (V/V).

Для мониторинга роста *Rhizobium trifolii* в *in vitro* экспериментах проводили определение биомассы бактерий по оптической плотности инкубационной смеси (OD при  $\lambda = 500$  нм) на спектрофотометре UV/VIS SP 8001 и жизнеспособности клеток бактерий методом предельных разведений с высевом соответствующих разведений на картофельный агар. Результаты считали достоверными при отклонении величин в пределах  $\pm 5\%$ .

**Лабораторный эксперимент 2.** Активность деструкции глифосата у штаммов *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) изучена в лабораторном эксперименте по культивированию ризобактерий в жидкой среде Дворкина-Фостера с содержанием 0,3 мг ГФ/мл и 0,5 мг ГФ/мл в качестве источника фосфора. Продолжительность эксперимента – 7 суток. Повторность



опыта – 3-кратная. Оценку деструктивной активности ризобактерий *Rhizobium trifolii* осуществляли по накоплению неорганического фосфата (Pi) в БКЖ. Концентрацию Pi определяли по методу Мэрфи и Райли [20]. В мерные колбы (объем 50 мл) отбирали по 2 мл бесклеточной культуральной жидкости (БКЖ) и доводили до метки дистиллированной водой. Тщательно перемешивали. Для определения содержания неорганического фосфата в пробирки отбирали по 5 мл разбавленной бесклеточной КЖ, приливали 1 мл окрашивающего раствора и выдерживали 10 мин при комнатной температуре для полного развития окраски. В присутствии неорганического фосфата раствор окрашивается в голубой цвет с фиолетовым оттенком. Оптическую плотность ( $OD_{710}$ ) окрашенного раствора измеряли на спектрофотометре Metertech UV-VISSP 8001.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метаболизирующие глифосат бактерии выделяют не только из загрязненных почв, но и на территориях, где глифосат никогда не применяли. Деструкторы глифосата выявлены как среди грамположительных, так и среди грамотрицательных бактерий [1, 3, 4].

Клубеньковые бактерии рода *Rhizobium* представляют собой грамотрицательные неспорообразующие подвижные палочки размером от 0,5 до 3 мкм. Колонии ризобактерий округлой формы, имеют слизистую консистенцию, полупрозрачные. Слизь, вырабатываемая клубеньковыми бактериями, представляет собой комплексное соединение полисахаридного типа, в состав которого входят гексозы, пентозы и уроновые кислоты. Клубеньковые бактерии – микроаэрофилы (развиваются при незначительных количествах кислорода в среде), однако для роста предпочитают аэробные условия. В лабораторных условиях клубеньковые бактерии хорошо растут при температуре 25 градусов на средах Фреда, Норриса, бобовой (гороховой), маннитно-дрожжевой [21].

Клубеньковые бактерии могут жить свободно в почве, но обычно вступают в симбиоз с бобовыми растениями. При проникновении в корневой волосок, они вызывают активное деление клеток корня, что приводит к появлению клубенька. Клубеньки, образованные активными *Rhizobium*, содержат пигмент леггемоглобин и поэтому имеют розоватый цвет. При старении бактерии теряют подвижность, сильно разбухают и образуют крупные клетки-бактероиды. В бактериоиды превращается лишь часть клубеньковых бактерий, большинство же остается в клубеньке в недифференцированном состоянии и после его отмирания переходит в почву.

Внедряясь в корневую систему, микроорганизмы питаются органическими соединениями, синтезированными растениями. Кроме свободного азота, клубеньковые бактерии способны усваивать азот из минеральных соединений: аммонийных солей, нитратов, аминокислот и др. Для питания в качестве источника углерода бактерии используют моносахариды, дисахариды, некоторые полисахариды, а также органические кислоты и спирты. В свою очередь растения получают от симбиотических микроорганизмов ряд необходимых им веществ. Благодаря симбиозу становятся возможными фиксация молекулярного азота и частичное удовлетворение потребности растений в этом элементе. Эффективная азотфиксация создается при определенном комплексе факторов: оптимальные параметры влажности, кислотности и обеспеченности почвы элементами питания для растений

(Р, К, микроэлементы) и других условий. Небольшие дозы азотных удобрений действуют благоприятно, высокие – подавляют азотфиксацию [21].

Поиск деструкторов и путей деградации ГФ и АМФК среди коллекционных симбиотических диазотрофов *Rhizobium* sp. остается актуальным и перспективным. Пути катаболизма глифосата у *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) изучены в серии *in vitro* экспериментов, включающих культивирование ризобактерий в жидких питательных средах с содержанием глифосата 1,0 и 2,0 мг/мл. Идентификацию продуктов катаболизма глифосата проводили в бесклеточных экстрактах культуральной жидкости ризобактерий. Продукты катаболизма глифосата у ризобактерий *Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3 идентифицированы с применением метода тонкослойной хроматографии (ТСХ).

Тонкослойная хроматография – самый распространенный метод идентификации химических веществ в смесях, который постоянно применяется в химических и биохимических лабораториях [22–25]. Критериями идентификации индивидуальных веществ в методе ТСХ являются визуальная оценка (сравнение с веществом-свидетелем) и расчет величины  $R_f$  (коэффициент хроматографической подвижности).

Величина  $R_f$  – отношение расстояния, пройденного фронтом пятна компонента разделяемой смеси (от старта до центра пятна), к расстоянию, пройденному фронтом растворителя (от старта до границы фронта растворителя) – основная характеристика хроматографической подвижности веществ в методе ТСХ. Значения  $R_f$  находятся в пределах от 0 до 1. Величина  $R_f$  является характеристикой конкретного химического соединения, на конкретном сорбенте, в конкретной системе растворителей и в конкретных условиях эксперимента [22–25]. Для идентификации веществ по значению  $R_f$  используют стандарты, коэффициент хроматографической подвижности, для которых известен (табл. 1). Стандарты наносят на линию старта рядом с разделяемой смесью, при этом процесс хроматографии проходит в одинаковых условиях.

Таблица 1

**Хроматографическая подвижность продуктов катаболизма глифосата на пластинах Сорбфил в системе изопропанол : 5% водный  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1 : 1, V/V)**

Продукты катаболизма	$R_f$ (хроматографическая подвижность)
Глицин	$0,64 \pm 0,025$
Саркозин	$0,54 \pm 0,022$
Глифосат (ГФ)	$0,33 \pm 0,010$
Аминометилфосфоновая кислота (АМФК)	$0,25 \pm 0,010$

При тестировании штаммов *Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3 на способность к деградации глифосата методом ТСХ установлено, что их культивирование в жидкой среде с содержанием в качестве источника фосфора глифосата 1,0 мг ГФ/мл и 2,0 мг ГФ/мл (эксперимент 1) приводит к разложению гербицида. Анализ результатов тонкослойной хроматографии бесклеточной КЖ штаммов *Rhizobium trifolii* (R-45, R-107 и R-63/3) показал, что после четырех недель инкубации ризобактерий в жидкой среде с гербицидом среди продуктов катаболизма аминокислот метилфосфоновая кислота ( $R_f = 0,25 \pm 0,01$ ) не обнаружена. На хроматографи-

ческой пластине визуализируются пятна ( $R_f = 0,52 \pm 0,012$ ), расположенные ниже глицина и предположительно соответствующие безопасному саркозину (метилглицину), что свидетельствует о наличии С–Р лиазной активности у исследуемых штаммов *Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3. На пластине также фиксируются пятна остаточных количеств глифосата, особенно в образцах с повышенной концентрацией ГФ (табл. 1, рис.).

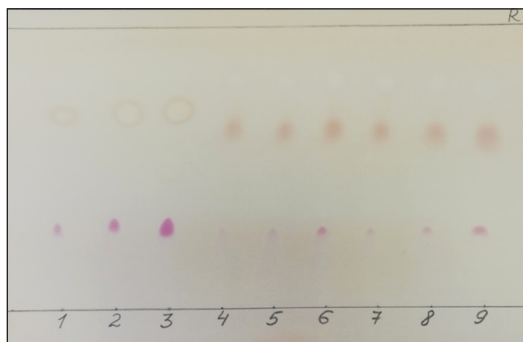


Рис. Хроматограмма бесклеточных экстрактов *Rhizobium* sp. R-45 (4–5), *Rhizobium* sp. R-63/3 (6–7) и *Rhizobium* sp. R-107 (8–9) на пластине Сорбфил ПТСХ-АФ-А-УФ в системе растворителей изопропанол : 5%-ный раствор аммиака после 4 недель инкубации в жидкой среде с дозами ГФ 1,0 и 2,0 мг ГФ/мл; вещества-свидетели: глифосат + глицин (1–3)

В течение двух недель эксперимента жизнеспособность протестированных штаммов ризобактерий *Rhizobium* sp. при культивировании в жидкой среде с разным содержанием ГФ сохранялась, но при этом рост биомассы был незначительным (табл. 2).

Таблица 2

**Показатели оптической плотности (OD) культуральной жидкости ризобактерий *Rhizobium* sp. в жидкой среде с разным содержанием глифосата в течение двух недель инкубации**

Штамм	OD ( $\lambda = 500$ нм)	
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
<i>Rhizobium</i> sp. R-45	0,073–0,081	0,099–0,112
<i>Rhizobium</i> sp. R-63/3	0,085–0,109	0,102–0,124
<i>Rhizobium</i> sp. R-107	0,070–0,081	0,086–0,104
Контроль среды	0,048–0,051	0,048–0,052

Ризобактерии исследовательской коллекции *Rhizobium trifolii* также разлагают глифосат без образования аминометилфосфоновой кислоты, что косвенно предполагает наличие С–Р лиазной активности у бактерий *Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3. Однако биodeградация ГФ исследованными симбиотическими бактериями *Rhizobium trifolii* по-видимому, незначительная, так как на хроматограммах визуализируются остаточные количества гербицида.

Конечным продуктом биodeградации глифосата является неорганический фосфат (Pi), по накоплению которого можно количественно оценить деструктивную активность штаммов *Rhizobium trifolii* [5; 6]. Количественные данные (мг/л) по со-

держанию неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ штаммов *Rhizobium trifolii* рассчитаны по калибровочному графику с учетом разбавления, использования калибровочного коэффициента ( $K=1,1$ ) для спектрофотометра Metertech UV/VIS SP 8001 и в пересчете на 1000 мл объема.

*In vitro* экспериментах по культивированию бактерий *Rhizobium trifolii* (R-45, R-107 и R-63/3) в жидкой среде Дворкина-Фостера с содержанием 300 мг и 500 мг/л (эксперимент 2) глифосата в качестве источника фосфора по показателям оптической плотности рассчитано содержание неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной культуральной жидкости ризобактерий (табл. 3).

Таблица 3

**Показатели оптической плотности ( $OD_{710}$ ) и содержание неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ *Rhizobium trifolii* при разной концентрации глифосата в среде**

Штамм	Оптическая плотность ( $OD_{710}$ )			Содержание неорганического фосфата (Pi), мг/л			
	1	2	3	1	2	3	среднее
С <sub>ГФ</sub> 300 мг/л							
<i>Rh. trifolii</i> R-45	0,068	0,065	0,062	10,4	10,0	9,5	10,0
<i>Rh. trifolii</i> R-107	0,075	0,070	0,075	11,5	10,7	11,5	11,2
<i>Rh. trifolii</i> R-63/3	0,118	0,120	0,115	18,1	18,4	17,7	18,1
С <sub>ГФ</sub> 500 мг/л							
<i>Rh. trifolii</i> R-45	0,112	0,110	0,108	17,2	16,9	16,6	16,9
<i>Rh. trifolii</i> R-107	0,110	0,112	0,115	16,9	17,2	17,7	17,3
<i>Rh. trifolii</i> R-63/3	0,165	0,168	0,169	25,3	25,8	25,9	25,7
НСП <sub>05</sub> фактор А (штамм)							0,54
фактор В (С <sub>ГФ</sub> )							0,44
фактор АВ							0,77

Показатели деструктивной активности штаммов бактерий *Rhizobium trifolii* рассчитаны на основании количественных данных по содержанию неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной культуральной жидкости с учетом химического состава глифосата (изопропиламинная соль  $C_3H_8NO_5P$ ). Установлено, что деструктивная активность ГФ-утилизирующих бактерий *Rhizobium trifolii* при исходной концентрации глифосата 300 мг/л находилась в пределах 23,9–43,2 %, при концентрации 500 мг/л – в пределах 24,2–36,8 %. Активность деструкции глифосата зависела от штамма бактерий; большей активностью обладал штамм *Rhizobium trifolii* R-63/3 (табл. 4).

Таблица 4

**Деструктивная активность ГФ-утилизирующих бактерий *Rhizobium trifolii* при концентрации глифосата в среде 300 мг/л и 500 мг/л**

Показатель	<i>Rh. trifolii</i> R-45		<i>Rh. trifolii</i> R-107		<i>Rh. trifolii</i> R-63/3	
С <sub>ГФ</sub> , мг/л	300	500	300	500	300	500
Накопление неорганического фосфата (Pi) за 7 дней инкубации, мг/л	10,0	16,9	11,2	17,3	18,1	25,7
Разложилось глифосата, мг/л	71,6	121,0	80,2	123,9	129,6	184,0
Деструктивная активность, %	23,9	24,2	26,7	24,8	43,2	36,8

## ВЫВОДЫ

*In vitro* экспериментах по культивированию *Rhizobium* sp. в жидких средах с глифосатом с последующим анализом бесклеточных экстрактов методом тонкослойной хроматографии установлено, что 3 штамма *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) разлагают глифосат по фосфоновой С–Р связи, без образования токсичной аминометилфосфоновой кислоты с образованием безопасного метилглицина (саркозиновый путь катаболизма).

По содержанию неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной культуральной жидкости рассчитана деструктивная активность коллекционных штаммов *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3). Активность деструкции штаммов симбиотических ризобактерий *Rhizobium trifolii* при концентрации глифосата 300 мг/л составила 23,9 %, 26,7 %, 43,2 %, при концентрации 500 мг/л – 24,2 %, 24,8 %, 36,8 % соответственно. Способность ризосферных бактерий *Rhizobium trifolii* исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии метаболизировать гербицид глифосат по экологически безопасному пути свидетельствует об их перспективности в качестве инокулянтов, в особенности в условиях интенсивного применения гербицида глифосат.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микробная деградация гербицида глифосата (обзор) / А. В. Свиридов, Т. В. Шушкова, И. Т. Ермакова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2015. – Т. 51. – № 2. – С. 183–190.
2. Биodeградация фосфорорганических загрязнителей почвенными бактериями: биохимические аспекты и нерешенные проблемы / А. В. Свиридов, Т. В. Шушкова, Д. О. Эпиктетов, С. В. Тарлачков // Биотехнология. – 2020. – Т. 36. – № 4. – С. 126–135.
3. Recent advances in glyphosate biodegradation / H. Zhan, Y. Feng, X. Fan, S. Chen // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2018. – Vol. 102. – P. 5033–5043.
4. Кононова, С. В. Фосфонаты и их деградация микроорганизмами / С. В. Кононова, М. А. Несмеянова // Биохимия. – 2002. – Т. 67. Вып. 2. – С. 220–233.
5. Haslam, E. The shikimate pathway: biosynthesis of natural products series / E. Haslam. – Elsevier, New York. – 2014.
6. Bai, S. H. Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination / S. H. Bai, S. M. Ogbourne // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2016. – Vol. 23(19). – P. 18988–19001.
7. Chaufan, G. Glyphosate commercial formulation causes cytotoxicity, oxidative effects, and apoptosis on human cells: Differences with its active ingredient / G. Chaufan, I. Coalova, M. Molina // International Journal of Toxicology. – 2014. – Vol. 33(1). – P. 29–38.
8. Benachour, N. Glyphosate formulations induce apoptosis and necrosis in human umbilical, embryonic, and placental cells / N. Benachour, G. Seralini // Chemical Research in Toxicology. – 2009. – Vol. 22. – P. 97–105.
9. Séralini, G. Differential Effects of Glyphosate and Roundup on Human Placental Cells and Aromatase / G. Séralini, S. Moslemi // Molecular and Cellular Endocrinology. – 2018. – Vol. 178(1–2). – P. 117–131.

10. Glyphosate-based herbicides are toxic and endocrine disruptors in human cell lines / C. Gasnier, C. Dumont, N. Benachour, E. Clair [et.al.] // *Toxicology*. – 2009. – Vol. 262(3). – P. 184–191.
11. Kwiatkowska, M. The effect of metabolites and impurities of glyphosate on human erythrocytes / M. Kwiatkowska, B. Huras, B. Bukowska // *Pesticide Biochemistry and Physiology*. – 2014. – Vol. 109. – P. 34–43.
12. Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in agricultural health study / A. DeRoos, A. Blair, J.A. Rusiecki, J.A. Hoppin [et.al.] // *Environmental Health Perspectives*. – 2005. – Vol. 113. – P. 49–54.
13. Degradation of the Herbicide Glyphosate by Members of the Family Rhizobiaceae / C.-M. Liu, P. A. McLean, C. C. Sookdeo, F. C. Cannon // *Appl. and Environ. Microbiol.* – 1991. – Vol. 57(6). – P. 1799–1804.
14. Towards sustainable maize production: Glyphosate detoxification by *Azospirillum* sp. and *Pseudomonas* sp. / C. Travaglia, O. Masciarelli, J. Fortuna, G. Marchetti [et al.] // *Crop Protection*. – 2015. – Vol. 77. – P. 102–109.
15. Moneke, A. N. Biodegradation of glyphosate herbicide in vitro using bacterial isolates from four rice field / A. N. Moneke, G. N. Okpala, C. U. Anyanwu // *Afr. J. Biotechnol.* – 2010. – Vol. 9(26). – P. 4067–4074.
16. Gadkari, D. Influence of herbicides on growth and nitrogenase activity of *Azospirillum* // *Azospirillum*. IV. Genetics, Physiology, Ecology / Klingmüller, W. (Ed.) Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. – 1988. – P. 150–158.
17. Inoculation of rice with *Azospirillum brasilense* in EGYPT: results of five different trials between 1985 and 1990 / N. Omar [et al.] // *Symbiosis*. – 1992. – Vol. 13. – P. 281–289.
18. Скрининг азотфиксирующих бактерий по способности метаболизировать гербицид глифосат как источник фосфора / Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко, Т. В. Погирницкая, С. В. Дюсова // *Почвоведение и агрохимия*. – 2023. – № 2(71). – С.110–120.
19. Dworkin, M. Experiments with some microorganisms which utilized methane and hydrogen / M. Dworkin, J. W. Foster // *J. Bacteriol.* – 1958. – Vol. 75. – P. 592–603.
20. Murphy, J. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters / J. Murphy, J. P. Riley // *Analytica Chimica Acta*. – 1962. – Vol. 27. – P. 31–36.
21. Клубеньковые бактерии бобовых <https://bio.niv.ru/doc/encyclopedia/life-of-plants/articles/1177/klubenkovye-bakterii-bobovyh.htm> (дата обращения: 12.11.2025)
22. Златкис, А. Высокоэффективная тонкослойная хроматография / А. Златкис, А. Кайзер // *High-Performance Thin-Layer Chromatography*. – М. : МИР. – 1979. – 245 с.
23. Клисенко, М. А. Методы определения микроколичеств пестицидов в продуктах питания, кормах и внешней среде / М. А. Клисенко, А. А. Калинина, К. Ф. Новикова. – М. : Колос, 1992. – 567 с.
24. Жебентяев, А. И. Хроматографические методы анализа / А. И. Жебентяев – Витебск: ВГМУ. 2011. – 220 с.
25. Touchstone, J. C. Practice of thin layer chromatography / J. C. Touchstone. – University of Pennsylvania, Philadelphia. – 1992. – 354 p.



## GLYPHOSATE CATABOLISM IN SYMBIOTIC RHIZOBACTERIA *RHIZOBIUM TRIFOLII*

N. A. Mikhailouskaya, S. S. Romanenko, T. V. Pogirnitskaya,  
T. B. Barashenko, S. V. Dyusova, A. L. Novik

### Summary

*In vitro* laboratory experiments, strains of *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) decompose glyphosate at the phosphonic C-P bond to form safe methylglycine (sarcosine).

The destruction activity of *Rhizobium trifolii* symbiotic rhizobacteria strains at a glyphosate concentration of 300 mg/l was 23,9%, 26,7%, 43,2%, at a concentration of 500 mg/l – 24,2%, 24,8%, 36,8%, respectively. The ability of *Rhizobium trifolii* rhizospheric bacteria to metabolize the herbicide glyphosate in an environmentally friendly way indicates their promise as inoculants, in particular in conditions of intensive use of the herbicide glyphosate.

УДК 631.82:633.358:631.445

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИНКОВОГО УДОБРЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ГОРОХА ПОСЕВНОГО НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДЕРНОВО- ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ЦИНКОМ

М. В. Рак, Е. Н. Пукалова, С. Г. Кудласевич,  
Л. Н. Гук, Е. И. Гутько

Институт почвоведения и агрохимии,  
г. Минск, Беларусь

### ВВЕДЕНИЕ

В агротехнике возделывания зернобобовых культур научно обоснованная система применения удобрений, наряду с другими агротехническими приемами, обеспечивает высокую и устойчивую продуктивность с хорошим качеством товарной продукции. Среди удобрений, оказывающих благоприятное действие на урожайность и качество зернобобовых культур, большое значение принадлежит микроудобрениям [1–5]. По обобщенным данным ряда опытов, цинк повышают урожайность гороха на 3,0–3,6 ц/га, содержание белка – на 0,4–1,2 %. При оптимальном количестве цинка в почве в биомассе гороха значительно увеличивается содержание азота и суммарный выход аминокислот, в т. ч. и незаменимых. Под действием цинка существенно увеличивается и сбор сырого протеина с биомассой бобовой культуры, что способствует улучшению качества растительной продукции [6–8].

При возделывании сельскохозяйственных культур в условиях Беларуси, среднее содержание цинка в зерне и семенах основной и побочной продукции

составляет – 17,3–38,0 мг/кг. Предельно допустимая концентрация цинка в кормовом зерне, зернофураже равна 50 мг/кг, грубых и сочных кормах – 100 мг/кг. Потребность крупного рогатого скота в цинке удовлетворяется при содержании 30–50 мг в 1 кг сухого вещества корма. Минимальная потребность в цинке оценивается примерно в 20 мг/кг [9–11].

Обобщение имеющихся в настоящее время материалов по изучению влияния цинка на растения свидетельствуют о том, что действие этого микроэлемента в значительной степени зависит от биологических особенностей культуры. Слабо изучен вопрос влияния цинка на процессы формирования и реализации потенциала продуктивности растений в зависимости от почвенно-агрохимических условий. Горох является ценной кормовой культурой и увеличение урожайности, повышение содержания в зерне белка и цинка под воздействием цинковых удобрений при различной обеспеченности почвы подвижным цинком актуально и имеет практическую значимость. Особенно это важно для дерново-подзолистых почв республики, где доля пахотных почв с низким содержанием подвижного цинка составляет 64,3 % от общей площади [12].

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования по изучению зависимости урожайности и качества зерна гороха от обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы подвижным цинком и доз цинкового удобрения проводили в полевом опыте в РУП «Экспериментальная база им. Котовского» Узденского района на дерново-подзолистой супесчаной почве, развивающейся на рыхлых водно-ледниковых супесях, сменяемых с глубины около 0,5 м связной супесью. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы:  $pH_{KCl}$  – 6,0–6,2, содержание гумуса – 2,48–2,70 %,  $P_2O_5$  – 228–269 мг/кг,  $K_2O$  – 200–288 мг/кг.

Опыт с горохом (сорт Астронавт) включал варианты с применением в некорневую подкормку цинкового удобрения 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 горохом проводились на фоне минеральных удобрений ( $N_{40}P_{60}K_{120}$ ).

Схема опыта:

1. Контроль без удобрений;
2.  $N_{40}P_{60}K_{120}$  – фон;
3. Фон +  $Zn_{0,04}$ ;
4. Фон +  $Zn_{0,08}$ ;
5. Фон +  $Zn_{0,12}$ .

Азотные, фосфорные и калийные удобрения под горох внесены в форме карбамида, суперфосфата аммонизированного, хлористого калия до посева с заделкой под культивацию. Некорневую подкормку гороха цинком проводилась в фазе начало бутонизации 70 г/га. В качестве цинкового микроудобрения для некорневой подкормки применяли жидкое удобрение МикроСтим-Цинк, содержащее 70 г/л цинка. Расход рабочего раствора – 200 л/га.

Период исследований 2024–2025 гг. отличался от среднесезонных значений по температурному режиму и влагообеспеченности. В вегетационный период

2024 г. гидротермический коэффициент (ГТК) в среднем за вегетацию составил 2,7, при среднемноголетнем значении 1,9. В течение вегетации 2024 г. отмечались аномально теплые периоды, особенно в летние месяцы, когда средняя температура воздуха превышала норму. Среднемесячная температура воздуха в апреле и мае превышала среднемноголетние показатели. Количество выпавших атмосферных осадков в апреле составило 258 % от нормы, в мае – 82 % от месячной нормы. В июне и в июле, во время цветения и плодообразования гороха, среднемесячная температура была выше нормы. В июле отмечалось избыточное количество осадков, которое составляло 171 % от месячной нормы при ГТК 2,7.

Вегетационный период 2025 г. характеризовался по значениям ГТК (3,0–3,9) как избыточно-увлажненный. При этом, значения ГТК в 2025 г. превышали среднемноголетние показатели в 1,8–2,5 раза. Количество выпавших атмосферных осадков в мае составило 164 % климатической нормы, в июне – 219 %, в июле – 183 %. Май оказался аномально холодным, наблюдались ночные заморозки, что в совокупности сказалось на развитии гороха, вызывая замедление роста и развития растений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований установлена зависимость урожайности зерна гороха от обеспеченности почвы подвижным цинком и дозы внесения цинкового удобрения. Некорневые подкормки микроудобрениями наиболее эффективны на первых двух уровнях содержания подвижного цинка в почве в дозе внесения цинка 0,12 кг д. в./га (табл.1). Применение минеральных удобрений в дозе  $N_{40}P_{60}K_{120}$  повышает урожайность зерна гороха на 11,7–14,3 ц/га (42,6–52,0 %). Некорневые подкормки гороха цинковыми удобрениями на низкой и средней обеспеченности супесчаной почвы подвижным цинком на фоне внесения минеральных удобрений в дозе  $N_{40}P_{60}K_{120}$  повышают урожайность зерна на 4,0–5,7 и 2,6–3,9 ц/га, при урожайности 43,8–45,5 и 44,4–45,7 ц/га соответственно.

Таблица 1

**Влияние цинкового удобрения на урожайность гороха и содержание белка в зерне при различной обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы цинком (среднее за 2024–2025 гг.)**

-	Варианты	Урожайность, ц/га	Прибавка		Содержание белка, %	Сбор белка, ц/га
			ц/га	%		
Контроль без удобрений		27,5	—	—	17,0	4,0
Низкий, 3,0 мг/кг	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон*	39,8	12,3	44,7	19,2	6,6
	Фон + Zn <sub>0,04</sub> **	43,8	4,0	9,9	20,0	7,6
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	44,5	4,7	11,7	20,2	7,8
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	45,5	5,7	14,2	20,8	8,2
Средний, 5,0 мг/кг	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	41,8	14,3	52,0	19,8	7,2
	Фон + Zn <sub>0,04</sub>	44,4	2,6	6,2	20,1	7,7
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	45,0	3,2	7,5	20,5	8,0
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	45,7	3,9	9,3	21,0	8,3

-	Варианты	Урожайность, ц/га	Прибавка		Содержание белка, %	Сбор белка, ц/га
			ц/га	%		
Высокий, 7,7 мг/кг	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	39,2	11,7	42,6	20,8	7,0
	Фон + Zn <sub>0,04</sub>	41,0	1,8	4,6	19,9	7,1
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	41,3	2,1	5,2	20,2	7,2
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	42,0	2,8	7,0	20,7	7,5
Избыточный, 11,4 мг/кг	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	39,2	11,7	42,6	21,4	7,2
	Фон + Zn <sub>0,04</sub>	40,5	1,3	3,3	20,5	7,1
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	40,5	1,3	3,3	21,6	7,5
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	41,3	2,1	5,3	21,2	7,5
HCP <sub>05</sub>		2,21	–		1,1	0,7

\* В вариантах 2 N<sub>40</sub>P<sub>60</sub>K<sub>120</sub> – прибавка рассчитывалась к контролю без удобрений; в вариантах 3–5 с внесением Zn<sub>0,04</sub>, 0,08, 0,12 – прибавка рассчитывалась к фону NPK.

Более высокие прибавки урожайности зерна гороха отмечены при внесении в возрастающих дозах цинкового удобрения на низком уровне обеспеченности почвы цинком. Так, некорневые подкормки цинком в дозах 0,04, 0,08 и 0,12 кг/га увеличивали урожайность гороха на 4,0, 4,7 и 5,7 ц/га (9,9, 11,7 и 14,2 %) соответственно. При среднем уровне обеспеченности почвы цинком урожайность гороха от некорневой подкормки микроудобрениями повышалась на 2,6, 3,2 и 3,9 ц/га (6,2, 7,5 и 9,3 %) (рис.).

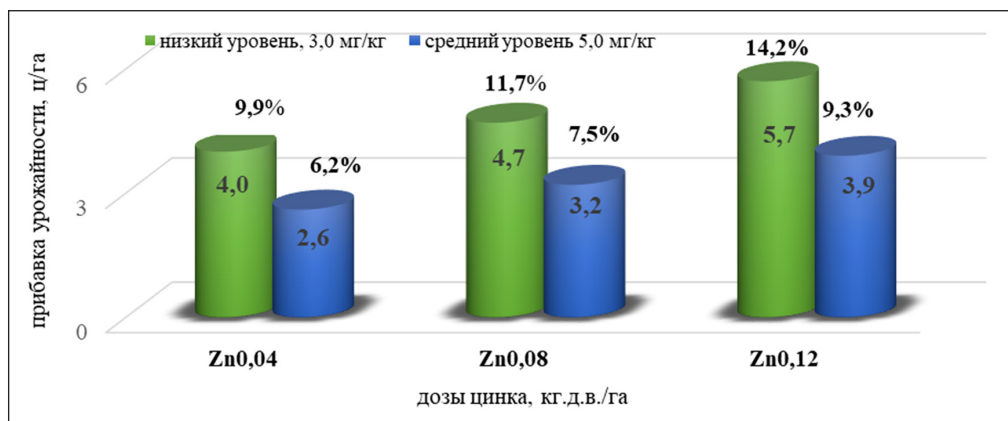


Рис. Прибавки урожайности гороха от цинковых удобрений при низком и среднем уровнях обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы подвижным цинком

При высоком уровне содержания цинка в почве не отмечается достоверного повышения урожайности зерна гороха от некорневой подкормки цинковым удобрением (за исключением цинка в дозе 0,12 кг/га). При избыточном содержании подвижного цинка в почве некорневые подкормки гороха посевного цинковым удобрением нецелесообразны.

Внесение минеральных удобрений (N<sub>40</sub>P<sub>60</sub>K<sub>120</sub>) под горох повышало содержание белка в зерне на 2,2–3,8 %, сбор белка увеличился на 2,6–3,2 ц/га по сравнению с вариантом без удобрений. Применение минеральных удобрений в сочета-

нии с некорневыми подкормками цинковым удобрением максимально повышает содержание (на 1,6 и 1,2 %) и сбор белка (8,2 и 8,3 ц/га) в горохе в дозе внесения цинка 0,12 кг д. в./га при низком и среднем уровнях обеспеченности почвы цинком (табл. 1).

Потребление цинка растениями гороха возрастает линейно с повышением его концентрации в почве и с увеличением дозы цинкового удобрения (табл. 2).

Таблица 2

**Динамика содержания цинка в растениях гороха при различной обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы этим элементом, мг/кг сухой массы (среднее за 2024–2025 гг.)**

Уровни обеспеченности почвы цинком	Фазы роста и развития		
	ветвление	бутонизация	цветение
Низкий, 3,0 мг/кг	16,0	15,5	$\frac{12,3^*}{16,2-18,0}$
Средний, 5,0 мг/кг	25,0	23,1	$\frac{21,0}{24,3-27,0}$
Высокий, 7,7 мг/кг	35,6	29,9	$\frac{27,3}{33,2-36,5}$
Избыточный 11,4 мг/кг	57,8	44,3	$\frac{41,2}{45,3-49,8}$
Оптимум по Церлинг В. В. [13]		–	21–50

\* Над чертой – фон ( $N_{40}P_{60}K_{120}$ ), под чертой – некорневые подкормки ( $Zn_{0,04-0,12}$ ).

Экспериментальные данные показывают, что по мере накопления вегетативной массы гороха в течение вегетации количество цинка в растениях уменьшалось. Самое высокое содержание цинка отмечается в фазе ветвления растений гороха, наименьшее – в фазу цветения. Так, повышение содержания подвижного цинка в почве от низкого (3,0 мг/кг) до избыточного (11,4 мг/кг) уровня увеличивало потребление элемента растениями гороха с 16,0 до 57,8 мг/кг сухой массы в начале вегетации (в фазу ветвления) и с 12,3 до 41,2 мг/кг в фазу цветения. К фазе цветения содержание цинка в среднем уменьшилось на 23,1–28,7 %.

Повышение содержания подвижного цинка в почве увеличивало накопление цинка в зерне гороха. Так, с увеличением концентрации подвижного цинка в почве от низкого до избыточного уровня, содержание элемента в зерне гороха возрастает с 17,8 до 35,7 мг/кг, в соломе – с 5,0 до 10,7 мг/кг сухой массы (табл. 3). Некорневая подкормка гороха цинковым удобрением при низком содержании подвижного цинка в почве увеличивала концентрацию элемента в зерне на 2,0–2,6 мг/кг (11,2–15,4 %), в соломе – на 0,3–1,0 мг/кг (6,0–20,0 %), при среднем уровне – на 2,4–4,0 мг/кг (10,4–17,3 %) и 0,2–1,4 мг/кг (3,1–21,9 %), на высоком уровне – на 1,3–3,2 мг/кг (4,3–10,4 %) и 1,1–2,8 мг/кг (12,5–31,8 %), на избыточном – на 1,3–3,6 мг/кг (3,6–9,9 %) и 2,9–5,1 мг/кг (27,1–47,7 %) соответственно. При низкой и средней обеспеченности супесчаной почвы цинком некорневая подкормка цинковым удобрением в дозе 0,12 кг д. в./га повышает концентрацию элемента в зерне до 20,4 и 27,1 мг/кг соответственно, что соответствует нижней границы оптимальных концентраций для кормов 20–60 мг/кг сухой массы [11].

Таблица 3

**Содержания цинка в зерне и соломе гороха в зависимости от дозы цинкового удобрения при различной обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы этим элементом, мг/кг (среднее за 2024–2025 гг.)**

Уровни обеспеченности почвы цинком	Варианты	Зерно			Солома		
		содержание	повышение к фону		содержание	повышение к фону	
			мг/кг	%		мг/кг	%
Низкий, 3,0 мг/кг	Контроль	16,1	–	–	4,5	–	–
	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	17,8	–	–	5,0	–	–
	Фон + Zn <sub>0,04</sub>	19,8	2,0	11,2	5,3	0,3	6,0
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	20,5	2,7	15,2	5,6	0,6	12,0
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	20,4	2,6	14,6	6,0	1,0	20,0
Средний, 5,0 мг/кг	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	23,1	–	–	6,4	–	–
	Фон + Zn <sub>0,04</sub>	25,5	2,4	10,4	6,6	0,2	3,1
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	26,1	3,0	13,0	7,1	0,7	10,9
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	27,1	4,0	17,3	7,8	1,4	21,9
Высокий, 7,7 мг/кг	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	30,3	–	–	8,8	–	–
	Фон + Zn <sub>0,04</sub>	31,6	1,3	4,3	9,9	1,1	12,5
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	32,3	2,0	6,6	10,9	2,1	23,9
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	33,5	3,2	10,4	11,6	2,8	31,8
Избыточный, 11,4 мг/кг	N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	35,7	–	–	10,7	–	–
	Фон + Zn <sub>0,04</sub>	37,0	1,3	3,6	13,6	2,9	27,1
	Фон + Zn <sub>0,08</sub>	37,9	2,2	6,0	14,9	4,2	39,2
	Фон + Zn <sub>0,12</sub>	39,3	3,6	9,9	15,8	5,1	47,7

Расчеты коэффициента биологического поглощения показали, что растения гороха обладают высоким потенциалом поглощения цинка, особенно при низкой его концентрации в почве (табл. 4). Установлено, что при низком (3,0 мг/кг) содержании цинка в супесчаной почве коэффициент биологического поглощения для зерна гороха составил 5,9–6,8, для соломы – 1,7–2,0. При высоких концентрациях подвижного цинка в почве (11,4 мг/кг) поглощение его горохом снижается до 3,1–3,4 (зерно) и до 0,9–1,4 (солома). При внесении цинкового удобрения в некорневые подкормки гороха коэффициент биологического поглощения увеличивается с повышением доз микроудобрения.

Таблица 4

**Коэффициенты биологического поглощения цинка горохом в зависимости от уровня обеспеченности почвы подвижным цинком и дозы цинкового удобрения (среднее за 2024–2025 гг.)**

Варианты	Низкий, 3,0 мг/кг	Средний, 5,0 мг/кг	Высокий, 7,7 мг/кг	Избыточный, 11,4 мг/кг
Зерно				
2. N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> – фон	5,9	4,6	3,9	3,1
3. Фон + Zn <sub>0,04</sub>	6,6	5,1	4,1	3,2
4. Фон + Zn <sub>0,08</sub>	6,8	5,2	4,2	3,3
5. Фон + Zn <sub>0,12</sub>	6,8	5,4	4,4	3,4



Окончание табл. 4

Варианты	Низкий, 3,0 мг/кг	Средний, 5,0 мг/кг	Высокий, 7,7 мг/кг	Избыточный, 11,4 мг/кг
Солома				
2. $N_{40}P_{60}K_{120}$ – фон	1,7	1,3	1,1	0,9
3. Фон + $Zn_{0,04}$	1,8	1,3	1,3	1,2
4. Фон + $Zn_{0,08}$	1,9	1,4	1,4	1,3
5. Фон + $Zn_{0,12}$	2,0	1,6	1,5	1,4

Для оценки эффективности применения цинкового удобрения при возделывании гороха на различных уровнях обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы цинком был проведен экономический анализ. Экономическая эффективность рассчитана на основании полученных в опыте прибавок кормовых единиц и нормативных данных затрат и цен на текущий год [14]. Расчет экономической эффективности показал, что применение микроудобрения МикроСтим-Цинк в некорневую подкормку гороха является экономически выгодным, поскольку способствует повышению урожайности, компенсирующей затраты на удобрение и увеличению прибыли (табл. 5).

Таблица 5

**Агроэкономическая эффективность применения микроудобрения МикроСтим-Цинк при возделывании гороха на различных уровнях обеспеченности почвы цинком (среднее за 2024–2025 гг.)**

Уровни обеспеченности почвы цинком	Варианты	Прибавка к. ед., ц/га	Стоимость прибавки, руб./га	Общие затраты, руб./га	Прибыль, руб./га	Рентабель- ность, %
Низкий, 3,0 мг/кг	Фон + $Zn_{0,04}$	5,6	179,2	61,8	117,4	190
	Фон + $Zn_{0,08}$	6,6	210,6	75,5	135,1	179
	Фон + $Zn_{0,12}$	8,0	255,4	92,2	163,2	177
Средний, 5,0 мг/кг	Фон + $Zn_{0,04}$	3,6	116,5	47,1	69,4	147
	Фон + $Zn_{0,08}$	4,5	143,4	59,7	83,7	140
	Фон + $Zn_{0,12}$	5,5	174,7	73,3	101,5	138
Высокий, 7,0 мг/кг	Фон + $Zn_{0,04}$	2,5	80,6	38,7	41,9	108
	Фон + $Zn_{0,08}$	2,9	94,1	48,2	45,9	95
	Фон + $Zn_{0,12}$	3,9	125,4	61,7	63,7	103

\* Фон –  $N_{40}P_{60}K_{120}$ .

Некорневая подкормка гороха микроудобрением МикроСтим-Цинк при низкой обеспеченности подвижного цинка в супесчаной почве обеспечивает прибыль 117,4–163,2 руб./га при рентабельности 177–190 %, на среднем уровне обеспеченности – 69,4–101,5 руб./га и 138–147 %, на высоком уровне – 41,9–63,7 руб./га и 95–108 % соответственно. Наиболее высокие экономические показатели от некорневой подкормки гороха микроудобрением МикроСтим-Цинк в дозе внесения цинка 0,12 кг д. в./га отмечаются при низкой и средней обеспеченности почвы подвижным цинком на фоне внесения минеральных удобрений в дозе  $N_{40}P_{60}K_{120}$ , что обеспечивает прибавки урожая 8,0–5,5 к. ед. ц/га, прибыль 163,2 и 101,5 руб./га при рентабельности 177 и 138 % соответственно.

## ВЫВОДЫ

1. На дерново-подзолистой супесчаной почве низко- и среднеобеспеченной подвижным цинком некорневая подкормка гороха посевного цинковым удобрением в дозе 0,12 кг д. в./кг на фоне внесения минеральных удобрений  $N_{40}P_{60}K_{120}$  обеспечивает повышение урожайности зерна на 5,7 и 3,9 ц/га, белка – на 1,6 и 1,2 %, прибыль 163,2 и 101,5 руб./га при урожайности 45,5 и 45,7 ц/га и рентабельности 177 и 138 % соответственно.

2. Потребление цинка растениями гороха возрастает линейно с повышением его концентрации в почве и с увеличением дозы цинкового удобрения. С повышением концентрации подвижного цинка в почве от низкого до избыточного уровня, содержание элемента в зерне гороха возрастает с 17,8 до 35,7 мг/кг, в соломе – с 5,0 до 10,7 мг/кг сухой массы. При низкой и средней обеспеченности почвы подвижным цинком некорневая подкормка гороха цинковым удобрением в дозах 0,04–0,12 кг д. в./га повышает концентрацию элемента в зерне до 19,8–20,5 и 25,5–27,1 мг/кг сухой массы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зернобобовые культуры / Д. Шпаар, Ф. Элмер, А. Постников [и др.]. – Минск: ФАУинформ, 2000. – 264 с.
2. Ханиева, И. М. Эффективность микро- и макроудобрений при выращивании гороха / И. М. Ханиева, А. Л. Бозиев // Земледелие. – 2010. – № 1. – С. 22–23.
3. Цыганов, А. Р. Эффективность применения микроудобрений при возделывании гороха / А. Р. Цыганов, О. И. Вильдфлуш // Известия Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2004. – № 3. – С. 28–31.
4. Вильдфлуш, И. Р. Рациональное применение удобрений: учебное пособие / И. Р. Вильдфлуш, А. Р. Цыганов, В. В. Лапа [и др.]. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2002. – 324 с.
5. Михалев, И. В. Азотфиксирующая деятельность, урожайность и качество семян сортов кормовых бобов и гороха в зависимости от макро- и микроудобрений в лесостепи ЦЧР: дис. ... канд. с-х. наук : 06.01.01 / И. В. Михалев. – Воронеж, 2014. – 223 с.
6. Куликов, Я. К. Экологические функции растительно-микробных симбиозов и их роль в развитии ресурсосберегающих биотехнологий / Я. К. Куликов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2022. – № 2. – С. 243–256.
7. Ионова, Л. П. Влияние некорневых подкормок марганцем и цинком на сорта гороха с различным вегетационным периодом / Л. П. Ионова // Экология биосистем: проблемы изучения, индикации и прогнозирования: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 20–25 авг. 2007 г. – Астрахань, 2007. – Ч. 1. – С. 273–277.
8. Елькина, Г. Я. Влияние различного содержания цинка в почве на аминокислотный состав биомассы кормовых трав / Г. Я. Елькина // Агрохимия. – 2020. – № 4. – С. 57–65.
9. Побилат, А. Е. Микроэлементы в сельскохозяйственных растениях (обзор) / А. Е. Побилат, Е. И. Волошин // Микроэлементы в медицине. – 2021. – № 22(3). – С. 3–14.
10. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

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

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

13. Церлинг В. В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур: справочник / В. В. Церлинг. – М.: Агропромиздат, 1990 – 235 с.

14. Методика определения агрономической и экономической эффективности минеральных и органических удобрений / И. М. Богдевич, Г. М. Сафроновская, Н. Д. Терещенко [и др.]. – Мн. : Институт почвоведения и агрохимии, 2010. – 24 с.

## THE EFFECTIVENESS OF ZINC FERTILIZER IN THE CULTIVATION OF FIELD PEAS AT VARIOUS LEVELS OF PROVISION OF SOD-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL WITH ZINC

M. V. Rak, E. N. Pukalova, S. G. Kudlasevich, L. N. Guk, E. I. Gutko

### Summary

The article presents the results of research on the study of the most effective dose of zinc fertilizer in the technology of pea cultivation on sod-podzolic sandy loam soil with different levels of zinc content. In the technology of pea cultivation on sod-podzolic sandy loam soil, low- and medium-provided with zinc, foliar top dressing of peas with zinc fertilizer at a dose of 0,12 kg/ha increases grain yield by 5,7 and 3,9 c/ha, increases protein content by 1,6 and 1,2 % with profitability of 177 and 138 %, respectively.

*Поступила 08.12.25*

УДК 631.8:633.11: 631.445

## ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДА $^{137}\text{Cs}$ И $^{90}\text{Sr}$ В МНОГОЛЕТНИЕ БОБОВО-ЗЛАКОВЫЕ ТРАВΟΣМЕСИ НА ТОРФЯНОЙ ПОЧВЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДОЗ ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

А. Г. Подоляк<sup>1</sup>, В. В. Дробышевская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гомельская ОПИСХ,  
г. Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>НПЦ радиационной медицины и экологии человека,  
г. Гомель, Беларусь

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сельскохозяйственное производство на загрязненных радионуклидами землях Республики Беларусь ведется на площади около 700,2 тыс. га земель, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  с плотностью 1,0 Ки/км<sup>2</sup> и выше,

в том числе 253,1 тыс. га земель одновременно загрязнены  $^{90}\text{Sr}$  с плотностью 0,15 Ки/км<sup>2</sup> и выше.

Реабилитация загрязненных территорий по радиационному фактору предполагает производство сельскохозяйственной продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам и не превышение средней годовой эффективной дозы облучения населения 1 мЗв над уровнем естественного и техногенного радиационного фона. В настоящее время свыше 50 % коллективной дозы облучения населения республики обусловлено радионуклидами, содержащимися в продуктах питания. Не менее важным условием является также устойчивое самокупаемое производство продукции и сельскохозяйственного сырья для перерабатывающей промышленности, без которых не могут быть обеспечены социально-экономические условия реабилитации. Реализация этих двух важнейших требований в большой мере зависит от уровня плодородия почв, используемых в сельскохозяйственном производстве пахотных и кормовых земель [1–4].

В результате катастрофы на Чернобыльской АЭС более 500 тыс. га торфяных почв республики было загрязнено радионуклидами, при этом под пашней используется 236,3 тыс. га торфяных почв, что составляет только 5,2 % от общей площади пашни [5]. По данным Института почвоведения и агрохимии в настоящее время в республике используется 64,6 тыс. га сенокосов и пастбищ на торфяных почвах с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  выше 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>). Эти проблемные земли преимущественно сосредоточены в Гомельской (66 %), Могилевской (14 %) и Брестской (14 %) областях. Большая часть луговых земель на торфяных почвах в Гомельской области (61%) одновременно загрязнены и  $^{90}\text{Sr}$  выше 5,55 кБк/м<sup>2</sup> (0,15 Ки/км<sup>2</sup>). Луговые биогеоценозы на таких почвах относятся к радиоэкологическим структурам, в которых могут формироваться максимальные дозовые нагрузки. Это обусловлено как биологическими особенностями многолетних трав, так и высокой адсорбционной способностью органического вещества и емкостью катионного обмена торфяных почв. С увеличением доли торфяных почв в структуре сенокосов и пастбищ переход  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в молоко возрастает в несколько раз [1–3].

Выпавшие на поверхность почвы радионуклиды мигрируют как вглубь почвы, так и в горизонтальном направлении. Показана возможность значительного вторичного перераспределения радионуклидов с ветровой и водной эрозией. Установлено, что вторичное загрязнение многолетних трав за счет пылепереноса может достигать 8–13 % в год от корневого поступления радионуклидов, что, вместе с тем, не оказывает существенного влияния на качество корма [2].

На торфяных почвах  $^{137}\text{Cs}$  имеет наиболее высокую биологическую доступность. Исследования показывают, что коэффициенты перехода для  $^{137}\text{Cs}$  в основные сельскохозяйственные культуры с течением времени после катастрофы постепенно снижаются. Для  $^{90}\text{Sr}$ , наоборот, наблюдается устойчивая тенденция к повышению перехода его из почвы в растения [4]. Однако основная доля растениеводческой продукции и кормов, не отвечающих требованиям РДУ, производится именно на почвах данного типа. Оптимальным содержанием для торфяных почв республики является содержание подвижных форм  $\text{K}_2\text{O}$  400–800 мг/кг, а  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 600–1000, обменных форм  $\text{CaO}$  – 3600–4800,  $\text{MgO}$  – 450–900 мг/кг [5–7].

В этой связи постоянно проводится изучение характера и скорости миграционных процессов, определяющих поступление радионуклидов в культуры из раз-

личных типов почв в зависимости от уровня использования средств химизации. Применение известковых и минеральных удобрений на таких почвах обеспечивает минимальное поступление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в корма и сохранение высокого уровня почвенного плодородия за счет оптимизации основных агрохимических свойств [5–10].

На торфяных почвах республики возделываются в основном кормовые культуры, которые хорошо отзываются на внесение минеральных удобрений, преимущественно калийных. В получении максимальной продуктивности животных большое значение имеет питательная ценность используемых кормов. Низкое качество травяных кормов, не соответствующих требованиям, является сдерживающим фактором повышения продуктивности животноводства. Поэтому в районах республики, территория которых загрязнена радионуклидами, актуальной является разработка эффективных агрохимических мер, учитывающих особенности почв и уровни их загрязнения, для получения нормативно чистых и питательных кормов [4–6, 10, 15].

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель работы – разработать систему применения удобрений на торфяной почве, способствующей максимальной продуктивности многолетних бобово-злаковых трав с оптимальными параметрами зоотехнического качества, а также минимальным накоплением в сене радионуклидов, соответствующих требованиям гигиенических нормативов.

Для решения поставленной цели в СПК «Оборона» Добрушского района Гомельской области в 2008 г. был заложен полевой опыт на низинной торфяной, маломощной (0,8–1,0 м), подстилаемой песком, почве. Торф древесно-осоковый с зольностью –  $17,6 \pm 2,0$  %, объемным весом почвы –  $0,28 \text{ г/см}^3$ . Плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  –  $369 \text{ кБк/м}^2$  ( $10 \text{ Ки/км}^2$ ),  $^{90}\text{Sr}$  –  $14,0 \text{ Бк/м}^2$  ( $0,38 \text{ Ки/км}^2$ ). Средняя мощность эквивалентной дозы –  $0,50 \text{ мкЗв/ч}$ .

Агрохимические показатели пахотного слоя торфяной почвы имели следующие показатели: уровень  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  – 5,38, содержание подвижного калия –  $300 \text{ мг/кг}$  и фосфора –  $202 \text{ мг/кг}$ , обменного кальция и магния – 13495 и  $524 \text{ мг/кг}$  соответственно, сумма поглощенных оснований –  $93,7 \text{ ммоль/100 г}$ , содержание подвижной меди –  $7,4 \text{ мг/кг}$ .

В опыте с многолетними бобово-злаковыми травами, возделываемыми на торфяной почве, на протяжении 3 лет проводилось изучение накопления в них  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на фоне без известкования и с известкованием (3 т/га  $\text{CaCO}_3$  в форме доломитовой муки) при различных уровнях доз внесения и соотношения NPK в минеральных удобрениях. Минимальные дозы удобрений под травы составляли  $\text{N}_{30}\text{P}_{60}\text{K}_{120} \text{ кг/га д. в.}$ . В опыте испытывали различные дозы азота (30, 60, 90 кг/га д. в.), а также определялась эффективность различных доз фосфора (60 и 90 кг/га д. в.) и калия (120, 180 и 240 кг/га д. в.) в различных сочетаниях. В качестве медного удобрения использовали медь сернокислую в дозе  $50 \text{ г/га д. в.}$  ( $200 \text{ г/га}$  в пересчете на сульфат меди), которую вносили при некорневой подкормке в фазе выхода в трубку злаковых трав с различными дозами азотных, фосфорных и калийных удобрений. Азотные удобрения – сульфат аммония, фосфорные – суперфосфат аммонизированный, калийные – калий хлористый, известко-

вые – доломитовую муку в год закладки опыта вносились в полной дозе в соответствии со схемой опыта (табл. 1). Во второй год пользования фосфорные удобрения вносили в полной дозе под первый укос, а азотные и калийные удобрения – 75 % под первый укос и 25 % под второй укос. Общая площадь делянки – 18 м<sup>2</sup>, учетная – 10 м<sup>2</sup>. Повторность в опыте – 4-кратная. Агрохимические показатели почвы определены по общепринятым методикам: обменная кислотность  $pH_{KCl}$  – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85); подвижные формы фосфора и калия – по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91); обменные кальций и магний – на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС-30 (ГОСТ 26487-85); зольность торфяного горизонта – (ГОСТ 27784-88).

Измерения удельной активности <sup>137</sup>Cs в растительных и почвенных образцах проводили в соответствии с методами испытаний МИ 2143-91 «Государственная система обеспечения единства измерений. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре». Для измерений использовался  $\gamma$ -спектрометрический комплекс «Canberra-GX 3020» (США). Аппаратурная ошибка измерений не превышала 15 %. Удельную активность <sup>90</sup>Sr определяли радиохимическим методом по стандартной методике ЦИНАО с радиометрическим окончанием на  $\gamma$ - $\beta$ -спектрометре «Прогресс БГ».

Питательная ценность сена трав оценивалась по ГОСТ 4808-87, согласно которому содержание сырого протеина в сухом веществе должно составлять не менее 8–10 %, клетчатки – не более 28–30 %, калия – 1,2–2,5 %, а отношение катионов  $K/(Ca + Mg)$  – 2,2–2,4.

Статистическая обработка полученных данных проводилась методом дисперсионного и регрессионного анализа с использованием стандартного компьютерного программного обеспечения (Excel 7.0, Statistic 7.0).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате полевых исследований установлено, что внесение минеральных удобрений в дозах  $N_{30}P_{60}K_{120}$  кг/га д. в. обеспечило прирост урожайности сена бобово-злаковых трав по сумме двух укосов практически в два раза (на 43,7 ц/га) по сравнению с контролем. Применение меди в некорневую подкормку в фазе выхода в трубку (50 г/га д. в.) на фоне минеральных удобрений  $N_{30}P_{60}K_{120}$  кг/га д. в. способствовало повышению прибавки урожайности сена в среднем на 5,7 ц/га (до 49,4 ц/га) (табл. 1).

Для торфяных почв оптимальным уровнем кислотности, который обеспечивает максимальную урожайность культур, принято считать  $pH$  5,0–5,3, а известкованию подлежат кислые торфяные почвы с  $pH$  менее 5,0. Поэтому внесение при залужении в торфяную почву с  $pH$  5,38 доломитовой муки в дозе 3,0 т/га  $CaCO_3$  в нашем случае не оказало положительного влияния на рост продуктивности злаковых трав [2–6, 16].

Увеличение дозы азота с 30 до 60 кг/га д. в. повышало урожайность сена до 64,6 ц/га и обеспечивало дополнительное получение в среднем 15,2 ц/га сена при окупаемости 1 кг азота 50,6 кг сена. Дальнейшее повышение дозы азота с 60 до 90 кг/га д. в. увеличивало урожайность менее значительно – только на 4 ц/га и снижало окупаемость 1 кг азота в 4 раза – до 13,3 кг сена с гектара. По этой причине считаем, что наиболее обоснованной дозой азота для внесения под многолетние



бобово-злаковые травы на почве данного типа является 60 кг/га д. в. Исследования показали, что повышение дозы фосфора с 60 до 90 кг/га д. в. в варианте с минеральными удобрениями  $N_{30}P_{90}K_{120}$  кг/га + н/п  $Ca$  нецелесообразно, поскольку урожайность сена на фоне как без известкования, так и с известкованием возрастала незначительно – на 1,4 и 4,1 ц/га соответственно.

Таблица 1

**Урожайность сена\* многолетних бобово-злаковых трав в зависимости от вносимых доз и соотношения форм минеральных и известковых удобрений (в среднем за 2008–2010 гг. исследований)**

Вариант	Урожайность, ц/га	Прибавка, ц/га	Вариант	Урожайность, ц/га	Прибавка, ц/га
Без удобрений – Фон 1	47,2	–	$N_{30}P_{60}K_{120} + 3,0 \text{ т/га } CaCO_3$ – Фон 2	49,5	2,3
$N_{30}P_{60}K_{120}$	90,9	43,7	$N_{30}P_{60}K_{120} + Cu_{50}$	91,5	44,3
$N_{30}P_{60}K_{120} + Cu_5$	96,6	49,4	$N_{60}P_{60}K_{120} + Cu_{50}$	99,9	52,7
$N_{60}P_{60}K_{120} + Cu_5$	111,8	64,6	$N_{90}P_{60}K_{120} + Cu_{50}$	104,7	57,5
$N_{90}P_{60}K_{120} + Cu_5$	115,8	68,6	$N_{30}P_{90}K_{120} + Cu_{50}$	95,6	48,4
$N_{30}P_{90}K_{120} + Cu_5$	98,0	50,8	$N_{30}P_{60}K_{180} + Cu_{50}$	112,2	65,0
$N_{30}P_{60}K_{180} + Cu_5$	108,0	60,8	$N_{30}P_{60}K_{240} + Cu_{50}$	110,9	63,7
$N_{30}P_{60}K_{240} + Cu_5$	120,6	73,4	$N_{60}P_{90}K_{120} + Cu_{50}$	103,6	56,4
$N_{60}P_{90}K_{120} + Cu_5$	108,1	60,9	$N_{60}P_{90}K_{180} + Cu_{50}$	109,2	62,0
$N_{60}P_{90}K_{180} + Cu_5$	118,3	71,1	$N_{60}P_{90}K_{240} + Cu_{50}$	121,5	74,3
$N_{60}P_{90}K_{240} + Cu_5$	124,6	77,4			
$HCP_{0,95}$	5,6		$HCP_{0,95}$	4,9	

\* При 16 % стандартной влажности.

При возделывании на торфяных почвах для нормального роста и развития многолетних бобово-злаковых трав преимущественное значение имеет обеспеченность их условий питания калием. Так при и высоком уровне содержания в почве подвижных форм калия внесение калийных удобрений не дает прибавки урожая, а накопление калия в сухом веществе растений возрастает, что негативно сказывается на качестве получаемых кормов. Поэтому на сенокосах и пастбищах при внесении высоких доз калийных удобрений их применяют дробно, контролируя содержание калия в кормах, а также его соотношение с двухвалентными катионами кальция и магния  $K/(Ca + Mg)$ . Как показали исследования, на торфяных почвах оптимальным соотношением между фосфором и калием в питательном растворе для многолетних трав являются показатели от 1 : 1,5 до 1 : 2 [5–8, 10].

Установлено, что на низкообеспеченной подвижным калием торфяной почве (< 300 мг/кг почвы) на фоне доз минеральных удобрений  $N_{30}P_{60}$  кг/га д. в. + н/п  $Cu_{50}$  увеличение дозы калийного удобрения с 120 до 180 и 240 кг/га д. в. положительно сказывалось на росте трав, повышая урожайность сена соответственно на 11,4 и 24,0 ц/га и обеспечивая сравнительно одинаковую окупаемость 1 кг калия – 19 и 21 кг сена с гектара. На более высоком фоне доз минеральных удобрений  $N_{60}P_{90}$  кг/га д. в. + н/п  $Cu_{50}$ , по мере увеличения дозы калийного удобрения с 120

до 180 и 240 кг/га д. в., урожайность сена возрастала соответственно на 10,2 и 16,5 ц/га, обеспечивая более низкую окупаемость 1 кг калия – 17 и 13,8 кг сена с гектара. Установлено, что повышение дозы фосфора с 60 до 90 кг/га д. в. в варианте с минеральными удобрениями  $N_{30}P_{90}K_{120}$  кг/га д. в. + н/п  $Cu_{50}$  нецелесообразно, поскольку урожайность сена на фоне как без известкования, так и с внесением доломитовой муки возрастала незначительно – только 1,4 и 4,1 ц/га с гектара. Следовательно, полученные нами на бобово-злаковых травах результаты свидетельствуют о возможности применения на загрязненных торфяных почвах более низких доз азотных и калийных удобрений.

В отношении радионуклидов было установлено, что на загрязненной радионуклидами торфяной почве максимальная удельная активность  $^{137}Cs$  в сене многолетних бобово-злаковых трав была на контрольном варианте – 8706 Бк/кг. Самое минимальное значение активности в эксперименте (635 Бк/кг) наблюдалось в варианте с дозой внесения минеральных удобрений  $N_{60}P_{90}K_{240}$  кг/га д. в. и некорневой подкормкой  $Cu$  в дозе 50 г/га д. в. Увеличение дозы азотных удобрений от 60 до 90 кг/га д. в. на фоне фосфорно-калийных удобрений усиливает накопление  $^{137}Cs$  в сене в 1,2–1,4 раза (табл. 2).

Применение удобрений также влияет на накопление  $^{90}Sr$  в растениях. Средняя удельная активность накопления  $^{90}Sr$  в растениях в эксперименте колебалась в пределах 28,0–46,4 Бк/кг. Максимальная кратность снижения концентрации радионуклида на единицу массы в результате применения полного минерального удобрения в дозе  $N_{60}P_{90}K_{240}$  кг/га д. в. + н/п  $Cu_{50}$  составила в 1,4 раза по сравнению с контрольным вариантом –  $N_{30}P_{60}K_{120}$ .

Таблица 2

**Влияние минеральных удобрений на поступление  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  в сено бобово-злаковой травосмеси на торфяной маломощной почве (в среднем за 2008–2010 гг. исследований)**

Вариант	*Кп $^{137}Cs$ Бк/кг : кБк/м <sup>2</sup>	Кратность снижения $^{137}Cs$ , раз	*Кп $^{90}Sr$ Бк/кг : кБк/м <sup>2</sup>	Кратность снижения $^{90}Sr$ , раз
Без удобрений	21,9 ± 4,4	–	3,4 ± 0,8	–
$N_{30}P_{60}K_{120}$	3,7 ± 0,3	–	2,6 ± 0,3	–
$N_{30}P_{60}K_{120} + Cu_{50}$	3,4 ± 0,2	1,1	2,5 ± 0,2	1,1
$N_{60}P_{60}K_{120} + Cu_{50}$	4,5 ± 0,4	0,8	2,9 ± 0,1	0,9
$N_{90}P_{60}K_{120} + Cu_{50}$	5,1 ± 0,4	0,7	3,1 ± 0,2	0,8
$N_{60}P_{90}K_{120} + Cu_{50}$	2,1 ± 0,3	1,8	2,0 ± 0,1	1,3
$N_{60}P_{90}K_{240} + Cu_{50}$	1,6 ± 0,1	2,2	1,8 ± 0,1	1,4
$N_{30}P_{60}K_{120} + Cu_{50} + CaCO_3$	3,1 ± 0,1	1,2	2,4 ± 0,2	1,1
$N_{60}P_{90}K_{240} + Cu_{50} + CaCO_3$	2,1 ± 0,3	1,8	2,0 ± 0,3	1,3
$HCP_{0,95}$	1,1		0,7	

\* Кп – коэффициент перехода радионуклида.

Проведение поддерживающего известкования в дозе 3 т/га  $CaCO_3$  не оказало существенного влияния на снижение поступления  $^{90}Sr$  в сено многолетних бобово-злаковых трав, так как Кп  $^{90}Sr$  снизился незначительно с показателя 2,5 до 2,4 Бк/кг : кБк/м<sup>2</sup>.

Проведение поддерживающего известкования в дозе 3 т/га  $\text{CaCO}_3$  не оказало существенного влияния на снижение поступления  $^{90}\text{Sr}$  в сено многолетних бобово-злаковых трав, так как Кп  $^{90}\text{Sr}$  снизился с показателя 2,5 до 2,0 Бк/кг : кБк/м<sup>2</sup> (максимально на 25 %). Анализ значений коэффициентов перехода  $^{90}\text{Sr}$  за время наблюдений показал, что накопление радионуклида травами в первый год пользования было выше, чем во второй. Установлено, что в двух укосах трав первого и второго года пользования минимальное накопление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  биомассой бобово-злаковых трав происходило при внесении минеральных удобрений в дозах  $\text{N}_{60}\text{P}_{90}\text{K}_{180-240}$  кг/га д. в. + н/п  $\text{Cu}_{50}$ .

Анализ результатов исследований показал, что содержание сырого протеина в сене трав по вариантам опыта изменялось в пределах 9,5–14,7 %, что соответствовало оптимальным значениям [12–16]. Оптимальные показатели зоотехнического качества сена были получены при дозе минеральных удобрений  $\text{N}_{60}\text{P}_{90}\text{K}_{180}$  кг/га д. в. + н/п  $\text{Cu}_{50}$ , где содержание сырого протеина составило 10,3 %, сырой клетчатки 30,1 % и энергии 0,65 к. ед. в 1 кг сухого вещества (табл. 3). Содержание калия в сене трав находилось в оптимальном диапазоне (1,2–2,5 %), при этом оптимальное соотношение катионов  $\text{K}/(\text{Ca}+\text{Mg})$  в большинстве случаев отклонялось от рекомендуемого 2,2–2,4 в сторону увеличения. Содержание нитратов в сене многолетних бобово-злаковых трав не превышало пределов допустимых концентраций в корме для животных (ПДК 1000 мг/кг) в оптимальных вариантах при дозе азота 60 кг д. в. на гектар [7].

Таблица 3

**Зоотехнические показатели сена многолетних бобово-злаковых трав  
в зависимости от системы применения удобрений  
(в среднем за 2008–2010 гг. исследований)**

Вариант	Сырые		K	Ca	Mg	K/ (Ca + Mg)	Нитраты мг/кг
	клетчатка	протеин					
	%						
Без удобрений	36,1	9,9	2,1	0,69	0,30	2,1	347
N <sub>30</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub>	36,5	11,6	2,5	0,57	0,21	3,2	477
N <sub>30</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> + Cu <sub>50</sub>	32,0	10,7	2,5	0,52	0,18	3,6	536
N <sub>60</sub> P <sub>90</sub> K <sub>180</sub> + Cu <sub>50</sub>	30,2	11,1	2,6	0,75	0,33	2,4	651
N <sub>60</sub> P <sub>90</sub> K <sub>240</sub> + Cu <sub>50</sub>	33,3	11,8	2,6	0,64	0,35	2,6	865
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> + Cu <sub>50</sub>	34,4	14,7	2,5	0,67	0,24	2,7	1015
N <sub>60</sub> P <sub>90</sub> K <sub>240</sub> + Cu <sub>50</sub> + CaCO <sub>3</sub>	30,4	12,5	2,7	0,64	0,27	3,0	855
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>120</sub> + Cu <sub>50</sub> + CaCO <sub>3</sub>	31,5	14,1	2,6	0,75	0,26	2,6	1095
HCP <sub>0,95</sub>	1,5	0,62	0,2	0,04	0,02	—	130

## ВЫВОДЫ

Анализ трехлетних результатов экспериментальных исследований показал, что наибольший радиоэкологический эффект по снижению накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  от применения защитных мероприятий на торфяных почвах дает внесение повышенных доз калийных удобрений на фоне сбалансированного азотного и фосфорного питания, с применением медных микроудобрений. Рекомендуется при залужении загрязненных радионуклидами кормовых угодий на торфяных поч-

вах с низким содержанием подвижных форм  $P_2O_5$  (менее 600 мг/кг) и  $K_2O$  (менее 400 мг/кг) с целью получения высоких урожаев сена многолетних бобово-злаковых трав (120–130 ц/га) с оптимальными показателями зоотехнического качества кормов, целесообразно применять дозы минеральных удобрений на уровне  $N_{60}P_{60-90}K_{180-240}$  кг/га д. в. и проводить некорневую подкормку медью под каждый укос в фазу выхода в трубку многолетних злаковых трав из расчета 50 г/га д. в. на гектар.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич, В. В. Лапа, Н. И. Смеян [и др.]. – Минск : РНИУП «Институт радиологии», 2012 г. – 120 с.
2. Научные основы реабилитации сельскохозяйственных территорий, загрязненных в результате крупных радиационных аварий: монография / Н. Н. Цыбулько, В. С. Аверин, А. Г. Подоляк [и др.]: под общ. ред. Н. Н. Цыбулько. – Мн. : РНИУП «Институт радиологии», 2011. – 438с.
3. Аверин, В. С. Роль защитных мероприятий для снижения доз облучения населения и получения нормативно чистой сельскохозяйственной продукции / В. С. Аверин, А. Г. Подоляк // Белорусское сельское хозяйство. – 2010. – № 4 (96). – С. 18–22.
4. Подоляк, А. Г. Защитные агрохимические мероприятия в АПК Республики Беларусь / А. Г. Подоляк, И. М. Богдевич, И. Д. Шмигельская // Агрохимический вестник. – 2006. – № 2 – С. 13–19.
5. Расчет доз минеральных удобрений для кормовых угодий, загрязненных радионуклидами / А. Г. Подоляк, И. М. Богдевич, Л. Е. Одинцова, И. И. Ивашкова // Агрохимический вестник. – 2006. – № 2 – С. 21–23.
6. Сычев, В. Г. Влияние калийных удобрений на содержание цезия-137 в зеленой массе природных кормовых угодий при поверхностном улучшении / В. Г. Сычев, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский // Плодородие. – 2012. – № 1. – С. 2–4.
7. Ведение лугового кормопроизводства в Российской Федерации и Республики Беларусь при радиоактивном загрязнении территорий / Е. В. Смольский, А. Г. Подоляк, И. Н. Белоус [и др.] // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2015. – № 11. – С. 30–34.
8. Подоляк, А. Г. Повышаем качество трав на загрязненных радионуклидами торфяных почвах / А. Г. Подоляк, А. Ф. Карпенко, Т. В. Ласько // Наше сельское хозяйство. – 2015. – № 21. – С. 60–63.
9. Подоляк, А. Г. Научные аспекты сельскохозяйственного производства в постчернобыльских условиях / А. Г. Подоляк, В. В. Валетов, А. Ф. Карпенко. – Мозырь: МГПУ им. И. П. Шамякина, 2017. – 242 с.
10. Подоляк, А. Г. Повышаем качество трав на загрязненных радионуклидами торфяных почвах / А. Г. Подоляк, А. Ф. Карпенко, Т. В. Ласько // Наше сельское хозяйство. – 2015. – № 21. – С. 60–63.
11. Эффективность защитных мероприятий при реабилитации кормовых угодий России и Беларуси, загрязненных после катастрофы на Чернобыльской АЭС /

Н. М. Белоус, А. Г. Подоляк, А. Ф. Карпенко, Е. В. Смольский // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2016. – Т. 56, № 4. – С. 405–413.

12. Радиологические аспекты применения минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных кормовых угодьях / Н. М. Белоус, А. Г. Подоляк, Е. В. Смольский, А. Ф. Карпенко // Агрохимический вестник. Сер. хим. наук. – 2016. – № 2. – С. 10–14.

13. Параметры поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в многолетние злаковые травы и зоотехнические показатели качества кормов в зависимости от доз внесения удобрений на торфяной почве / А. Г. Подоляк, А. Ф. Карпенко, Т. В. Ласько, С. А. Тагай // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства: сб. науч. тр. – Горки, 2016. – Вып. 19. – С. 185–193.

14. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы / Н. Н. Цыбулько, В. В. Лапа, И. М. Богдевич [и др.]. – НАН Беларуси, Мин-во сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь. Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2021. – 144 с.

15. Комплекс мероприятий по повышению плодородия и защите от деградации почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь на 2021–2025 годы / В. В. Лапа, Н. Н. Цыбулько, М. В. Рак [и др.]; под ред. В. В. Лапы. – НАН Беларуси, Мин-во сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2021. – 148 с.

16. Подоляк, А. Г. К вопросу возврата в хозяйственное использование земель, выведенных из оборота по радиационному фактору. / А. Г. Подоляк, Т. Ф. Персикова // Плодородие почв – основа продовольственной безопасности государства: материалы VI съезда общества почвоведов и агрохимиков, Минск, 21 июля 2022 г. / Ин-т почвоведения и агрохимии; редкол.: Ю. К. Шашко [и др.]. – Мн. : Ин-т систем. исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – С.236–240.

## PARAMETERS OF $^{137}\text{Cs}$ AND $^{90}\text{Sr}$ TRANSITION TO PERENNIAL LEGUMINOUS GRASS MIXTURES ON PEAT SOIL DEPENDING ON DOSES FERTILIZER APPLICATION

A. G. Podolyak, V. V. Drobyshevskaya

### Summary

The article discusses a system of applying fertilizers on peat soil that promotes maximum productivity of perennial legume grasses, as well as the zootechnical quality of feed and minimal accumulation of radionuclides in them. It was determined that when sodding hayfields with legume grasses on low-lying peat-bog soils with low content of phosphorus, potassium and contaminated with radionuclides, it is most effective to apply mineral fertilizers in doses: nitrogen – 60 kg/ha active ingredient, phosphorus – 60–90 kg/ha active ingredient, potassium – 180–240 kg active ingredient and copper – 50 g/ha active ingredient.

*Поступила 04.12.25*

## СУБСТРАТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

Ю. К. Шашко, Н. Ю. Жабровская

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

В настоящее время основное производство продукции защищенного грунта сосредоточено в 20 ведущих тепличных комплексах, на их долю приходится более 97 процентов всего объема. Площадь крупных зимних теплиц в Беларуси составляет 252 га. В числе организаций с наибольшими площадями защищенного грунта – тепличное хозяйство ОАО «ДорОрс» (43 га), «Агрокомбинат «Ждановичи» (31,4 га), ТК «Берестье» (22 га), КУП «Минская овощная фабрика» (18,6 га), КСУП «Рудаково» (16 га), КСУП «Тепличное» (13,4 га), РУАП «Гродненская овощная фабрика» (13,9 га), УП «Минский парниково-тепличный комбинат» (11,07 га), ОАО «Рассвет» им. К. П. Орловского» (10 га), КСУП «Брилево» (9,5 га), ОАО «Тепличный комбинат Мачулищи» (6,44 га) [1–11].

За последние годы значительно увеличился ассортимент культур, выращиваемых в условиях защищенного грунта. Как отметили в Минсельхозпрод, сегодня он насчитывает более 15 наименований. Наряду с традиционными томатами и огурцами различных сортов ежегодно в тепличных комбинатах выращивается от 1,5 до 2 тыс. т таких культур, как перец, баклажаны, лук на перо, салат, укроп, кучерявая и листовая петрушка, руккола, щавель, гвоздичный базилик, кинза, листовой сельдерей, кориандр, мята. Выращивают цветочную продукцию, грибы и землянику. В обновленной версии госпрограммы «Аграрный бизнес» на 2021–2025 гг., которая принята правительством в мае 2023 г., представлен план-график модернизации теплиц для того, чтобы выйти на необходимые для населения республики объемы продукции защищенного грунта [12–14].

На начальном этапе развития выращивания овощных и цветочных культур в теплицах по всему миру применялись местные почвы, агрофизические и агрохимические свойства которых улучшались для достижения максимального урожая. Удобрениями служили органические материалы: торф, навоз и различные компосты. При этом не проводилось детального изучения влияния этих добавок на урожайность выращиваемых культур [15–18].

В настоящее время тепличное овощеводство стремительно переходит на энергосберегающие и компактные технологии выращивания. В конце двадцатого века в сфере растениеводства возникла инновационная технология – гидропоника, которая кардинально изменила подход к выращиванию культур, предоставляя возможность более точного управления растениями. Разработаны методы выращивания растений на искусственных субстратах с применением малообъемных систем. Такие технологии обеспечивают более благоприятные гигиенические условия и позволяют сократить трудозатраты и расходы на работы по уходу за растениями и обслуживанию сооружений. С 1975 г. по сегодняшний день, в таких странах как США, Испания, Италия и Израиль, площадь, занимаемая теплицами



с малообъемной технологией, ежегодно увеличивается на десятки тысяч гектаров [18–21].

Гидропоника – это технология выращивания растений без почвы, на искусственных средах или смешанных субстратах с использованием компьютерного управления питанием. При этом растение получает из рабочего раствора все необходимые питательные вещества в нужных количествах и точных пропорциях, что почти невозможно осуществить при почвенном выращивании [22, 23]. Малообъемная технология выращивания овощей в теплицах предусматривает создание оптимальных водно-воздушных, питательных и температурных параметров в корнеобитаемой зоне растений. Полностью автоматизирует процессы приготовления и подачи минерального питания, оптимизирует водный и воздушный режимы, значительно улучшает условия для работающих в теплицах, стандартизирует агротехнику и питательные растворы по культурам [24].

Одним из ключевых факторов, значительно влияющих на урожайность культур защищенного грунта при малообъемной технологии, является субстрат. В производственных условиях отмечен значительный прогресс в выращивании растений на искусственных субстратах как органического, так и инертного происхождения. Найти идеальный универсальный состав, который гарантировал бы оптимальные условия для развития растений, довольно сложно. При выборе субстрата важно учитывать его способность обеспечивать благоприятные условия для роста и нормальной работы здоровой корневой системы. Субстраты, которые применяются в условиях защищенного грунта, должны соответствовать биологическим особенностям возделываемых культур, иметь устойчивую структуру в течение длительного времени, быть безопасными для окружающей среды при изготовлении, применении и утилизации, пригодными для стерилизации, инертными, с хорошей воздухоемкостью, должны обладать достаточной влагоемкостью, не засоляться и легко промываться от избытка солей. Кроме того, они должны быть дешевыми и не требующими высоких затрат на эксплуатацию [25–29].

В результате многолетних исследований установлено, что хорошими свойствами обладают почвогрунты, имеющие плотность  $0,2\text{--}0,7\text{ г/см}^3$ ,  $20\text{--}30\%$  воздуха,  $50\text{--}60\%$  влаги и общую влагоемкость –  $70\text{--}90\%$  от объема (объемная масса или показатель плотности до  $0,5\text{ г/см}^3$  для рыхлых почвогрунтов,  $0,5\text{--}0,7$  – для средних и  $0,7\text{--}1,0\text{ г/см}^3$  – для плотных) [30].

Правильно подготовленный субстрат обеспечивает формирование растений со здоровой и мощной корневой системой.

В современных тепличных комбинатах наиболее распространенными материалами являются торф, минеральная вата, перлит, кокосовый субстрат, цеолит, отходы деревообрабатывающей промышленности и др. Однако практика показывает, что не все субстраты, несмотря на их ценные агрофизические свойства, способны выдерживать длительное использование в условиях гидропонного производства. Продолжительная эксплуатация нередко приводит к их химическому и биологическому ухудшению, изменению характеристик и созданию сложных экологических проблем, связанных с накоплением и утилизацией отходов.

*Торф.* Верховой торф широко используется в теплицах как субстрат для выращивания овощей или в составе сложных субстратных смесей, а также служит основой для многих видов компостов. Использование торфа при создании корнеобитаемых сред широко распространено благодаря его исключительным фи-

зическим, химическим и биологическим свойствам. Эти характеристики создают благоприятные условия для роста и развития всех частей растений как наземных, так и корневых. Применение торфа и торфяных субстратов с определенными характеристиками позволяет эффективно контролировать условия выращивания растений. Для создания пористого субстрата рекомендуется добавлять рыхлящие компоненты в количестве 30–50 %. Наиболее эффективным вариантом считается перлит, однако на замену также подойдут мелкий керамзит, вермикулит или опилки. Использование субстратов на основе торфа актуально только в определенный период его эксплуатации. [31–34].

Как отмечает М. Raviv [35], органические субстраты по мере их минерализации изменяют свои физические, химические и биологические свойства. В результате происходит уплотнение, увеличение объемного веса субстрата, уменьшение воздухоемкости и содержания кислорода в ризосфере, повышается уровень засоления, а также накапливаются патогенные микроорганизмы. Для дальнейшего использования требуется регулярно добавлять свежий грунт в объеме 18–20 % от первоначального или полностью заменять субстрат, утилизируя изношенный материал. К числу недостатков торфа как субстрата также относится его недостаточно высокая катионообменная емкость.

Производство грунтов, состоящих из верхового или низинного торфа с внесением минеральных удобрений, для выращивания рассады овощей и цветов, а также сеянцев, саженцев, деревьев и кустарников, ведется как частными фирмами, так и государственными предприятиями. Последние десять лет в Европейском сообществе характеризуются ограничениями на промышленную добычу торфа, включая его использование для производства субстратов. Такие ограничения вводятся в рамках ключевых международных природоохранных директив, ставящих своей целью сохранение окружающей среды, в частности болотных экосистем. В связи с этим, прогнозировать значительное увеличение объемов торфяной добычи для субстратов в ближайшем будущем не приходится [36].

*Глина.* При необходимости в смеси могут добавляться природные разрыхлители (песок, глина) [34].

Результаты экспериментов, проведенных в Институте экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси, продемонстрировали перспективность разработки искусственных субстратов на основе органоминерального сырья, таких как торф и глина. Исследования, касающиеся особенностей продукционного процесса овощных культур в условиях защищенного грунта, показали, что глино-торфяной субстрат без добавления минеральных удобрений является оптимальным для выращивания рассады овощей. Для дальнейшего роста растений, например, при пикировке томатов, рекомендуется использовать субстраты, обогащенные макро- и микроэлементами. При этом выращивание редиса на глино-торфяном субстрате, дополненном минеральными солями и агроперлитом, позволяет получить значительно более высокий урожай корнеплодов по сравнению с использованием почвогрунта «Двина» в качестве среды для корней. [37].

*Опилки.* На предприятиях по переработке древесины накапливаются значительные объемы древесных отходов, требующих утилизации для предотвращения вреда окружающей среде. При выбросе этих материалов в природу они оказывают негативное воздействие, что может привести к загрязнению и нарушению баланса животной и растительной микрофлоры [38].

В период с 1960 по 1980 гг. наблюдался рост интереса к использованию отходов древесины, в основном измельченной древесной коры, в качестве органического субстрата или его части [39–44]. Множество исследований связано с разнообразием выращиваемых цветочно-декоративных и овощных культур, а также с особенностями химического состава древесины и коры различных пород деревьев и разной скоростью их разложения [45–47].

Современным и эффективным способом утилизации древесных отходов считается вермикомпостирование. Этот метод привлекателен тем, что при переработке органических материалов с помощью червей не только улучшаются водно-физические свойства и снижается токсичность отходов, но и происходит закрепление элементов минерального питания растений в конечном продукте [48].

Рассматривается использование вермикомпостирования для переработки крупнотоннажных древесных отходов с целью создания субстратов для теплиц. М. С. Шамаевой и др. в процессе исследования были проведены эксперименты с семью вариантами смесей, содержащих различное соотношение опилок и навоза мелкого рогатого скота, где применялись черви *Eisenia fetida* (Sav.). Выявлено оптимальное содержание опилок в составе смеси, благоприятное для жизнедеятельности червей. Оценивалась степень переработки органических отходов и пригодность полученных вермикомпостов для выращивания семян древесных растений. Также проведен анализ агрохимических характеристик смесей и вермикомпостов, что позволило определить их эффективность в повышении плодородия [49].

*Коковит (кокосовый субстрат)* – это относительно новый материал, используемый в качестве субстрата для выращивания различных культур в защищенном грунте. Его основными компонентами являются волокна и измельченная скорлупа кокосовых орехов. Благодаря своей грубоволокнистой структуре такие субстраты не уплотняются и сохраняют отличную воздухоемкость на протяжении нескольких лет. Высокая влагоемкость в сочетании с хорошей аэрацией делает кокосовый субстрат идеальной средой для выращивания растений в защищенном грунте, особенно культур с корневой системой, чувствительной к переувлажнению. Баланс воды и воздуха в корневой среде способствует успешному укоренению черенков и их дальнейшей приживаемости. Кокосовый субстрат, в свою очередь, не является полностью инертным и оказывает непредсказуемое воздействие на корни растений. Он способствует отличному развитию растений на начальном этапе, но при продолжительном использовании (более года) уступает, например, субстратам на основе минеральной ваты по однородности, стабильности и управляемости. Этот субстрат также содержит избыточное количество солей, которые необходимо удалить посредством тщательного промывания. Перед использованием органических материалов с высоким содержанием углерода по отношению к азоту, таких как кокосовая кожура, в составе субстрата или его компонентов, требуется провести ферментацию. Для чего коковит выдерживается в буртах на протяжении трех лет. За это время материал частично разлагается, однако его структура все равно остается более грубой и жесткой по сравнению с торфом [50–54].

*Сапропель* используют в качестве добавок в торфяные и многокомпонентные субстраты. Сапропель – органическое вещество, образованное путем отложения на дно пресноводных водоемов отмирающих растений и микроорганизмов с ог-

раниченным доступом кислорода. Содержит комплекс органических и минеральных веществ, соединения азота, фосфора, калия, серы, меди, бора, молибдена и других микроэлементов. В составе органической части сапропелей имеются биологически активные вещества – гуминовые кислоты, витамины [55].

В защищенном грунте применяют как органические субстраты, так и неорганические (минеральные). На первых Международных Симпозиумах по использованию субстратов в садоводстве (International Symposium on Substrates in Horticulture other than Soils In Situ), состоявшихся в Шотландии (1980) и Испании (1983), кроме субстратов с участием измельченной древесной коры, большое внимание также было уделено инертным минеральным субстратам. В качестве субстратов или их компонентов изучались перлит, вермикулит, керамзит. Эти материалы могут использоваться как по отдельности, так и в комбинации друг с другом. У каждого типа субстратов есть свои преимущества и недостатки, но получаемые смеси должны отвечать определенным агротехническим требованиям [34, 56–60].

*Перлит.* В последнее время перлит стал предметом особого внимания в растениеводстве благодаря своим полезным свойствам. Перлит изначально был создан для промышленных целей. Этот пористый и легкий материал обладает высокой способностью удерживать воздух и влагу. Его уровень pH находится в диапазоне от 6,0 до 8,0. По своей природе это минерал вулканического происхождения с характерной стекловидной структурой. Перлит получают из вулканических апломосиликатных пород. Агроперлит (вулканическое стекло) представляет собой экологически чистую разновидность перлита, предназначенную специально для выращивания растений. Он полностью нейтрален, не включает химически активных или вредных для растений веществ, стерильный и не содержит болезнетворных микроорганизмов, семян или насекомых. В растениеводстве обычно используют его фракцию размером 1,5–4,5 мм. Материал крайне легкий – в 3–4 раза легче воды. Применение перлита помогает поддерживать водно-воздушный баланс в субстрате, предотвращая слеживание и уплотнение грунта. Кроме того, он обеспечивает качественный дренаж, что исключает кислородное голодание у растений. Благодаря прочной структуре с закрытыми порами он способен впитывать жидкости в объеме, превышающем собственную массу в 6–7 раз, эффективно впитывает воду во время полива и постепенно отдает ее корням растений, обеспечивая равномерное увлажнение. В настоящее время субстраты для выращивания растений в странах Скандинавии включают 25–30 % перлита. Применение смесей, состоящих из торфа и перлита, способствует снижению веса субстрата, значительно упрощает процесс работы с контейнерами и обеспечивает высокий уровень производства качественного посадочного материала. Тем не менее, по мнению ряда авторов инертный перлит обладает определенными недостатками в регулировании водно-воздушного баланса. Из-за отсутствия пор среднего размера он, с одной стороны, хорошо пропускает воду, но с другой – крайне медленно высыхает, так как мелкие поры внутри гранул задерживают влагу. Это осложняет эффективное управление уровнем его влажности. Из-за того, что перлит сильно пылит в сухом состоянии, для защиты дыхательных путей работников требуются дополнительные меры предосторожности при работе с ним [61–69].

*Цеолиты.* Цеолиты были впервые описаны в 1756 г. шведским минералогом и химиком Акселем Кронштедтом. На сегодняшний день основные природные запасы цеолитов сосредоточены в Европе, России, США и Японии. Цеолиты

представляют собой группу минералов, образованных в результате осадочных или вулканических процессов, насчитывающую до 30 различных наименований. Эти минералы являются водными алюмосиликатами натрия и кальция и внешне напоминают мелкие острые камешки с легким стеклянным блеском. Они характеризуются уникальной структурой кристаллической решетки, пронизанной тонкими каналами и полостями, что придает им свойства своеобразного молекулярного сита [70–72].

В последние годы в Центральной России начало активно эксплуатироваться Хотынецкое месторождение в Орловской области, богатое цеолитсодержащими трепелами. Эти природные минералы осадочного происхождения формируются за счет кремнийсодержащих остатков диатомовых водорослей, простейших морских губок, игл и радиолярий. Они преимущественно состоят из соединений кремния, кальция, магния, калия, фосфора и других микроэлементов, жизненно важных и легкоусвояемых для растений. В трепелах содержится до 35 % цеолита (клиноптилолита), а также до 7 % глинистых минералов [73].

В качестве минерального компонента используют природный активированный цеолит Татарско-Шатрашанского месторождения с высокой влагоемкостью и содержанием доступного кремния и микроэлементов. Минеральный состав: клиноптилолит – 20–30 %, монтмориллонит – 20–30 %, опал-кристобалит – 28,0–36,7 %, кальцит – 10,6–21 %, кварц – 4,6–11,3 %. Химический состав, окислы, % масс., средние значения:  $\text{SiO}_2$  – 65,8,  $\text{TiO}_2$  – 0,35,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 6,19,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  общ. – 2,65;  $\text{MnO}$  – < 0,01,  $\text{CaO}$  – 17,16,  $\text{MgO}$  – 1,45,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,16,  $\text{K}_2\text{O}$  – 1,43,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,13, п.п.п. (потери при прокаливании) – 4,6. Суммарная ионообменная (катионообменная) способность природного цеолита ZEOL составляет 130,0 мг-экв/100 г. Основная роль в обмене принадлежит кальцию, на его долю приходится 86–88 %, на калий – 5–8 %, натрий – 3–4 %, магний – 3 % [74].

Цеолиты обладают двумя важными характеристиками: они способны поглощать и высвобождать воду в зависимости от температуры и уровня влажности; благодаря своей ионообменной активности они избирательно поглощают и выделяют различные вещества. Цеолит способствует улучшению физических характеристик почвы. Он разрыхляет тяжелые, плотные и заплывшие глинистые почвы, делая их более пористыми и воздухопроницаемыми, а также предотвращает образование комков и корки на поверхности. Минерал также уменьшает кислотность почвы [70].

Цеолит в виде мелкозернистых гранул выступает в качестве минерального удобрения, обогащая почву кальцием, калием, магнием, кремнием, цинком и другими микроэлементами, которые растения легко усваивают. Помимо этого, цеолит, благодаря своим абсорбирующим качествам, препятствует вымыванию из почвенного профиля внесенных удобрений, в том числе органических, удерживая их в зоне корневой системы растений. В результате этого снижается вымывание азота на 4–5 раз, а общее усвоение удобрений возрастает на 30 %. Использование цеолита с минеральными удобрениями пролонгирует их действие, уменьшает слеживаемость, насыщает дополнительными микроэлементами, удерживает в прикорневой зоне растения [72, 73–75]. Использование цеолита в почве для выращивания овощных культур может значительно повысить урожайность. При этом плоды обогащаются витаминами, а уровень нитратов и токсичных веществ уменьшается [60, 75].

В опытах Т. Ю. Анисимовой введение биопрепаратов в состав торфогрунта на основе торфонавозного компоста обеспечило получение здоровой стандартной рассады томата и капусты. Тенденция к увеличению биомассы растений в варианте с цеолитом объясняется особенностями самих цеолитов, которые являясь источником минеральных веществ, способны поглощать, удерживать и постепенно расходовать влагу и минеральные элементы в почве, создавая благоприятные условия для роста и развития растений [33].

Для растений рекомендуется использовать только вулканический цеолит. Океанический или осадочный цеолит в воде разрушается, превращаясь в густую массу, поэтому его применение в растениеводстве нежелательно, такие пометки, как «океанический» или «цеолитсодержащая глина», указывают на непригодность материала для выращивания растений.

*Диатомит* – это высококремнистая осадочная порода, имеет высокую пористость и адсорбирующую поверхность, содержит высокий процент (от 40 до 85) аморфного кремния, обладающего растворимостью больше 0,012 %, более 1 % окиси калия, а также марганец, фосфор и серу. Широко используется в растениеводстве, ландшафтном дизайне, садоводстве, а также при выращивании комнатных и контейнерных растений. Применение способствует улучшению увлажнения и аэрации почвы, снижению частоты полива и увеличению урожайности [76–80].

*Керамзит* получают из тяжелой глины, при спекании которой освобождается газ, который вызывает ее расширение. Для получения керамзита используют только специальные сорта глины с низким содержанием растворяющихся в воде солей. Он имеет очень низкую плотность. Керамзит содержит очень много воздуха и мало воды, имеет величину pH около 7,0 и низкую величину ЕС (электропроводность). Керамзит можно применять в течение многих лет, но как субстрат он не долговечен, разрушается в результате интенсивного почвообразовательного процесса под действием выделений корней, питательного раствора и микроорганизмов [80–82].

*Вермикулит* – это природный слоистый минерал группы гидрослюд, который при электрообжиге вспучивается и превращается в легкий, пористый, золотистый материал, образующий «гармошку». Полученный материал в целом приобретает ряд ценных физических и химических свойств в качестве субстрата для выращивания любых видов растений. Вермикулитовые субстраты можно использовать как в открытом грунте, так и в защищенном при гидропонном способе возделывания культур. Обожженные при высоких температурах гранулы становятся стерильными, не содержат возбудителей болезней и вредителей. Вермикулитовые субстраты обладают хорошо развитой капиллярной системой и способны поглощать и удерживать большое количество воды и питательного раствора, что способствует увеличению влагоемкости почвы, сокращению поливов и расхода поливочной воды [83–86].

По данным Л. А. Ивановой благодаря высокой влагоемкости вермикулитовых субстратов, в ряде случаев поливы проводят не чаще 1 раза в течение 7–14 дней. Гранулы вермикулита содержат много воздуха, поэтому они очень легкие. Высокая внутренняя пористость (объем пор 74–85 %) сохраняется даже при полном насыщении субстратов водой и на протяжении всего периода их эксплуатации [83]. Исходная pH субстратов – 7,0–7,5, на протяжении всего периода выращивания в питательной среде сохраняется заданный уровень pH, что позволяет выращи-



вать культуры с различными требованиями к кислотности субстрата. Важно, что водно-физические свойства субстрата не меняются с течением времени, при этом качество и выравненность среды обитания корневой системы растений гарантированы [83, 85–87].

Вермикулит не подвержен физико-химическому старению, засолению, поэтому долговечен. допускает многократное повторное применение. В исследованиях, проведенных М. F Hirai и др., в гидропонике вермикулит может быть использован для выращивания многолетних растений – до 15 лет без замены [39].

При выращивании культур гидропонным методом с вермикулитом можно увеличить объем субстрата в корнеобитаемой среде в несколько раз и плотность посадок до 6 растений на 1 м<sup>2</sup>, при этом облегчается процесс отделения корней от субстрата после окончания вегетации [88].

Эффективность использования вермикулита в защищенном грунте изучали в 1960–1970 гг. на примере вермикулитов Наткруитского (Южная Африка), Потанинского (Урал) и Кокшаровского (Дальний Восток) месторождений. Была доказана возможность его успешного применения для выращивания растений [85, 87]. На северо-западе России находится богатейшее в мире Ковдорское месторождение вермикулита (Кольский полуостров), где сосредоточено 80 % мировых запасов этого минерала. Начиная с 1963 г. до настоящего времени исследования по выявлению возможности использования ковдорского вермикулита для выращивания растений проводятся в ФИЦ «Кольский научный центр РАН». Сотрудниками центра разрабатываются технологии эффективного применения вермикулита для гидропонного культивирования одно- и многолетних культур защищенного грунта [83, 88]. По данным М. А. Ярцевой и др. применением вермикулитовых субстратов способствуют более интенсивному по сравнению с почвой, прорастанию семян, росту надземной части и корней сеянцев овощных культур [88].

В настоящее время вермикулитовые субстраты в чистом виде или в многокомпонентных составах широко используются в странах с высокой культурой земледелия в промышленном тепличном производстве, а также при дражировании семян, хранении и транспортировке фруктов и овощей.

В условиях защищенного грунта применяют *многокомпонентные субстраты*, состоящие из вышеперечисленных материалов. Зачастую базовой составляющей является торф и в разных пропорциях перлит, вермикулит, керамзит, органические отходы производства (опилки, коковит, лузга гречихи, костра льна и др.). В опытах И. В. Андреевой и др. оптимальные параметры роста и развития растений были получены при использовании вермикулита и его смеси с керамзитом (в соотношении 1:1). В неорганических субстратах в процессе их длительной эксплуатации колониеобразующих единиц фитопатогенных грибов рода *Fusarium* было в 3,3–3,8 раза меньше по сравнению с почвой, в связи с чем отмечали улучшение фитосанитарного состояния растений [89].

В опытах, проведенных И. А. Козловской и Е. А. Саковой, при выращивании салата листового методом проточной гидропоники наибольшее количество растений с хорошо сформированными четвертым и пятым листом оказалось на многокомпонентных субстратах. Добавки к торфу сапропеля (25 %) и агроперлита (25 %) обеспечили формирования четырех листьев у 90,1 % растений и пяти листьев у 24,1 %. Аналогичное влияние на развитие листьев оказали добавки (25 %) керамзита. Наибольшая площадь листьев сформировалась у растений салата

листового, выращенного на многокомпонентных субстратах. Причем у растений с четвертым и пятым листом это превышение составило 3,8–4,4 и 3,8–3,2 см<sup>2</sup> к контролю соответственно. Использование торфяных субстратов с добавками сапропеля (25 %), в сочетании с агроперлитом (25 %) или керамзитом (25 %), обеспечивает формирование листового аппарата, площадь которого на 7,8–6,6 % больше, чем на торфяном субстрате [61].

*Минеральная вата.* В настоящее время на 81 % общей площади теплиц во всех тепличных комбинатах Республики Беларусь применяется голландская технология, где корнеобитаемой средой является минеральная вата. Благодаря своей пористой структуре, она обладает свойствами, сравнимыми с сфагновым мхом. Для питания растений в такой среде используется капельная система орошения с водным раствором минеральных солей. Поставка минеральной ваты в тепличные комплексы осуществляется из-за рубежа [15, 90–94].

Бессубстратная технология стала мощным фактором экономического развития производства культур защищенного грунта. Сегодня этот метод является золотым стандартом в производстве, обеспечивая максимальную эффективность труда, высокую урожайность и превосходное качество выращиваемой продукции. Бессубстратный способ выращивания – ярчайший пример инноваций, которые задают темп прогресса в отрасли [15, 92].

В 1969 г. на опытной станции в Хорнуме (Дания) началось применение минеральной ваты в качестве субстрата для выращивания растений. Данная инновация, запущенная сотрудниками Бьовре и Кноблаух, положила начало новому подходу к беспочвенному земледелию. С 1975 г. исследования и разработка рекомендаций по использованию минеральной ваты в сельском хозяйстве были развернуты в скандинавских странах, а затем получили дальнейшее развитие и распространение в Голландии, Франции, Англии и Бельгии. Минеральную вату получают путем плавления базальта с добавлением известняка при температуре 1500 °С. Известняк придает субстрату слабощелочную реакцию, однако, не обладая буферной способностью, минераловатный субстрат быстро принимает реакцию используемого питательного раствора [96].

При использовании минеральной ваты для выращивания растений открываются широкие возможности управления их ростом. Инертные свойства субстрата облегчают контроль за развитием корневой системы, что способствует улучшению качества плодов, снижает вероятность заболеваний и поддерживает растения в гармоничном состоянии. Минеральная вата позволяет экономнее расходовать воду и удобрения, значительно упрощает подготовку теплиц к новому циклу выращивания, но самое важное – обеспечивает стабильные и высокие урожаи овощей. Такой результат достигается благодаря оптимальному водно-воздушному балансу корневой среды, который легко поддается контролю, а также стерильности, долговечности и однородности самого субстрата [15, 90, 96–99].

Важно отметить, что это сырье не обладает экологической безопасностью и после использования требует применения специальных технологий утилизации, что требует затрат на их переработку либо складирования на полигонах ТКО [39, 100].

В последние годы научные исследования активно фокусируются на внедрении инновационных синтетических материалов в области растениеводства, таких как *сильно набухающие полимерные гидрогели (СПГ)*, почвенные структурообразо-

ватели, закрепители грунта и другие. Гидрогели, функционирующие как своеобразные «водные резервуары», обеспечивают растения достаточным количеством влаги, когда это необходимо. Эти материалы создают оптимальные условия для роста растений: обеспечивают корни водой и питательными веществами в необходимом количестве, улучшают пористость почв и их водопроницаемость, а также повышают качество смесей для растений. Их эффективность проявляется в увеличении влагоемкости субстратов на 10–25 %, в улучшении всхожести семян в грунте и в ускорении роста и развития растений [101, 102].

В связи с многообразием материалов, пригодных для использования в аграрном производстве, во всем мире продолжают поиски более совершенных субстратов для гидропоники. На сегодняшний день перед учеными, занятыми исследованиями в защищенном грунте, стоит актуальная задача – создание эффективного субстрата, который был бы лишен ряда недостатков существующих субстратов, обеспечил бы долговременное и безотходное производство высококачественной сельскохозяйственной продукции, отвечал бы необходимым требованиям тепличного производства, простого и дешевого, безопасного для окружающей среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информация о Тепличном хозяйстве ОАО «ДорОрс». URL: <https://dorors.by/teplica> (дата обращения: 01.10.2025).
2. Ждановичи – овощная столица. URL: <https://akz.by/production/ovoshi-otkrytogo-i-zakrytogo-grunta> (дата обращения: 01.10.2025).
3. ОАО Тепличный комбинат «Берестье». URL: <https://berestie.by/> (дата обращения: 01.10.2025).
4. Корпоративные ценности предприятия. Минская овощная фабрика. URL: <https://mof.by/company> (дата обращения: 01.10.2025).
5. КСУП «Рудаково» лидер аграрного рынка Витебской области. URL: <https://www.rudakovo.by> (дата обращения: 01.10.2025).
6. В КСУП «Тепличное» приступили к сбору огурцов нового урожая. URL: <https://sozhnews.by/news/selskoe-khozyaystvo/v-ksup-teplichnoe-pristupili-k-sboru-ogurtsov-novogo-urozhaya> (дата обращения: 01.10.2025).
7. Гродненская овощная фабрика. URL: <https://ovoschi.by/> (дата обращения: 01.10.2025).
8. УП «Минский парниково-тепличный комбинат». URL: [https://minsk.gov.by/ru/freepage/other/bel\\_marka/greenstolitsa.shtml](https://minsk.gov.by/ru/freepage/other/bel_marka/greenstolitsa.shtml) (дата обращения: 01.10.2025).
9. В хозяйстве Кировского района после модернизации теплиц огурцы смогут выращивать круглый год. URL: <https://mogilev-region.gov.by/news/v-hozyaystve-kirovskogo-rayona-posle-modernizacii-teplic-ogurcy-smogut-vyrashchivat-kruglyy-god> (дата обращения: 01.10.2025).
10. Брилево. Тепличный комбинат. URL: <https://brilevo.by/predpriyatie/teplichnyj-kombinat> (дата обращения: 01.10.2025).
11. ОАО «Тепличный комбинат Мачулищи». URL: <http://tk-m.by/> (дата обращения: 01.10.2025).
12. Более 20 тыс. т овощей получено в теплицах за январь-апрель. URL: <https://www.belta.by/economics/view/bole-20-tys-t-ovoschej-polucheno-v-teplitsah-za-janvar-aprel-393229-2020> (дата обращения: 01.10.2025).

13. Головченко: Беларусь полностью обеспечит себя огурцами. URL: <https://sputnik.by/20230927/golovchenko-belarus-polnostyu-obespechit-sebya-ogurtsami-1079805895.html> (дата обращения: 01.10.2025).

14. В Беларуси в 2022 году выращено на 13 % больше цветов и бутонов на срез <https://www.belta.by/society/view/v-belarusi-v-2022-godu-vyrascheno-na-13-bolshe-tsvetov-i-butonov-na-srez-554104-2023> (дата обращения: 13.11.2023).

15. Аутко, А. А. Овощеводство защищенного грунта / А. А. Аутко, Г. И. Гануш, Н. Н. Долбик. – Мн. : ВЭВЭР, 2006. – 310 с.

16. Скорина В. В. Производство овощей в защищенном грунте Беларуси / В. В. Скорина, Д. А. Романьков // Овощеводство / РУП «Институт овощеводства». – Самохваловичи, 2020. – Т. 28. – С. 149–155.

17. Козловская, И. П. Оценка производственного потенциала и пути формирования нового технологического уклада в тепличном овощеводстве Беларуси / И. П. Козловская // Вестник БГСХА. – 2020. – № 3. – С. 127–131.

18. Дьяконова, Р. Н. Малообъемная технология выращивания огурца в тепличных условиях / Р. Н. Дьяконова, В. Д. Гревцева // Наука и техника в Якутии. – 2012. – № 2(23). – С. 92–95.

19. Аутко, А. А. Инновационное обеспечение развития и эффективного функционирования тепличного хозяйства / А. А. Аутко, Г. М. Гануш, А. Г. Кабков // Земледелие и защита растений. – 2007. – № 3. – С. 7–9.

20. Литвинов, С. С. Защищенный грунт России: состояние, проблемы, внедрение новейших инновационных технологий / С. С. Литвинов, Р. Дж. Нурметов, Н. Л. Девочкина // Теплицы России. – 2011. – № 2. – С. 5–8.

21. Состояние и перспективы развития овощеводства защищенного грунта. – URL: [https://knowledge.allbest.ru/agriculture/2c0b65635a2ad69b4c53b88421206c37\\_0.html#text](https://knowledge.allbest.ru/agriculture/2c0b65635a2ad69b4c53b88421206c37_0.html#text) (дата обращения: 23.03.2018).

22. Мамедов, М. И. Структура и площади защищенного грунта в мире и глобальная тепличная технология: будущее производства продуктов питания / М. И. Мамедов // Овощи России. – 2015. – № 3–4. – С. 64–69.

23. Малообъемная технология возделывания томатов на минеральных субстратах: анализ. обзор / Л. С. Герасимович [и др.]; М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, Белорус. науч. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК. – Минск, 2004. – 54 с.

24. Герасимович, Л. С. Адаптивные системы управления капельным поливом малообъемной культуре / Л. С. Герасимович, Л. А. Веремейчик, С. Н. Телешевский // Научно-инновационная деятельность в агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч.-практ. конф., 29–30 мая, 2008 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск, 2008. – Ч. 2. – С. 8–9.

25. Контровская, И. А. Технологические аспекты повышения эффективности тепличного производства / И. А. Контровская, К. А. Ловчая // Устойчивое социально-экономическое развитие регионов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию создания кафедры экономики и МЭО в АПК; Горки, 28–29 нояб. 2019 г., БГСХА / редкол.: А. В. Колмыков [др.]. – Горки : БГСХА, 2020. – С. 128–133.

26. Кусаинова, Г. С. Изменение водно-физических свойств субстратов при выращивании томата на малообъемной гидропонике / Г. С. Кусаинова, Е. П. Петров // Аграрная наука – сельскому хозяйству : материалы XIII Междунар. науч.-практ.

конф., 15–16 февр. 2018 г., Барнаул : в 2 кн. / РИО Алтайского ГАУ. – Барнаул : РИО Алтайского ГАУ, 2018. – С. 338–340.

27. *Сирота, С. М.* Новые технологии в овощеводстве защищенного грунта / С. М. Сирота, И. Т. Балашова, Е. Г. Козарь, Е. В. Пинчук // Овощи России. – 2016. – № 4 (33). – С. 3–9.

28. Продуктивность растений салата листового в зависимости от вида субстрата – почвозаменителя в условиях замкнутой системы фитотрона ИСП-1 / А. И. Попов, В. Н. Зеленков, М. И. Иванова, [и др.] // Актуальная биотехнология. – 2018. – № 3 (26). – С. 394–398.

29. *Кусаинова, Г. С.* Использование минеральных и органических субстратов при выращивании томата на малообъемной гидропонике Г. С. Кусаинова, Е. П. Петров // Аграрная наука – сельскому хозяйству : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., 15–16 февр. 2018 г., Барнаул : в 2 кн. / РИО Алтайского ГАУ. – Барнаул : РИО Алтайского ГАУ, 2018. – С. 340–342.

30. *Bunt, A. C.* Physical properties of mixtures of peat and minerals of different particles size and bulk density for potting substrates // Acta Horticulturae (ISHS). – 1984. – № 150. – P. 143–153.

31. *Голубина, О. А.* Физикохимия и биология торфа: Использование торфа в сельском хозяйстве / О. А. Голубина. – Томск : Томский ЦНТИ, 2011. – 45 с.

32. *Иванова, Л. А.* Перспективные субстраты для гидропонного выращивания овощей / Л. А. Иванова, Е. С. Иноземцева // Гавриш. – 2010. – № 3. – С. 16–21.

33. *Анисимова, Т. Ю.* Эффективность применения торфогрунтов с использованием биопрепаратов и цеолита для выращивания рассады овощных культур / Т. Ю. Анисимова, В. А. Раскатов // Плодородие. – № 6. – 2015. – С. 23–24.

34. *Томсон, Э. А.* Торф и продукты его переработки / Э. А. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Белорус. навука. – 2009. – 328 с.

35. *Raviv, M.* Substrate's end-of-life: environmental and horticultural considerations / M. Raviv // Acta Horticulturae (ISHS). – 2016. – № 1112. – P. 281–290.

36. *Hoitink, H. A. J.* Factors affecting quality of compost for utilization in container media / H. A. J. Hoitink, H. A. Poole // The International Plant Propagation' Society. – 1979. – Vol. 29 – P. 495–504.

37. *Дорощук, О. В.* Экологически безопасные искусственные субстраты для выращивания овощных культур / О. В. Дорощук, Н. А. Ламан, С. Л. Соболевская // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2013. – № 3. – С. 11–16.

38. *Кислицына, С. Н.* Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности: учеб. пособ. по направл. подгот. 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств / С. Н. Кислицына. – Пенза : ПГУ-АС, 2016. – 140 с.

39. *Hirai, M. F.* Standard measurement for compost maturity / M. F. Hirai, V. Chan-yasak, H. Kubota // BioCycle. – 1983. – Vol. 26. – № 4. – P. 44–49.

40. *Nichols, D. G.* The effect of Pinus radiata bark toxicity on early growth of plants in containers / D. G. Nichols // Scientia Horticulturae. – 1981. – Vol. 15. – № 3. – P. 291–298.

41. *Revier, M.* The use of wood waste compost in the making of substrates for container crops / M. Revier, C. Milhau // Acta Horticulturae (ISHS). – 1984. – № 150. – P. 475–489.

42. Sant, M. D. The effect of N-fertilization on the growth of Chrysanthemum 'White horim' in bark compost and peat / M. D. Sant, A. R. Selmer-Olsen, H. R. Gislerod, K. Solbrae // *Acta Horticulturae (ISHS)*. – 1984. – № 150. – P. 371–381.
43. Worrall, R. Composting wood wastes for potting mixes / R. Worrall // *Horticultural Science* – 1985. – Vol. 83. – № 10. – P. 34–37.
44. Лях, В. М. Использование субстратов с отходами древесины для выращивания декоративных растений / В. М. Лях // *Гавриш*. – 1998. – № 2. – С. 15–19.
45. Лях, В. М. Особенности минерального питания декоративных растений, выращиваемых на отходах древесины / В. М. Лях // *Гавриш*. – 1999. – № 1. – С. 28–31.
46. Шамин, А. А. Биохимические и микробиологические процессы при компостировании еловой коры / А. А. Шамин, Л. И. Бобнева, О. Н. Колчина // *Агрохимия*. – 1977. – № 7. – С. 97–103.
47. Влияние субстратов из древесных опилок и рисовой шелухи на урожайность томатов Lilos F1 / Г. Е. Дямуршаева, Э. Б. Дямуршаева, Г. З. Сауытбаева, Р. И. Кудияров // *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*. – 2021. – № 23. – С. 30–34.
48. Основы экологического мониторинга: практ. пособие для бакалавров экологии / И. С. Белюченко, А. В. Смагин, Г. В. Волошина [и др.]. – Краснодар : КубГАУ, 2012. – 252 с.
49. Шамаева, М. С. Разработка технологии вермикомпостирования древесных отходов для производства тепличных субстратов для выращивания сеянцев древесных растений / М. С. Шамаева, М. А. Окач, Д. И. Мухортов // *Труды Поволжского госулар. технолог. ун-та*. – Йошкар-Ола, 2022. – С. 129–133.
50. Сравнительная оценка кокосового субстрата и минеральной ваты при культивировании салата листового и горчицы листовой в условиях замкнутой гидропонной системы фитотрона класса синерготрон ИСП-1 / В. Н. Зеленков, В. В. Латушкин, М. И. Иванова, [и др.]. // *Актуальная биотехнология*. – 2018. – № 3 (26). – С. 442–446.
51. Реутова, Т. О. Возвращаясь к вопросу о качестве кокосового субстрата / Т. О. Реутова, В. В. Шевлягин // *Гавриш*. – 2013. – № 3. – С. 52–54.
52. Агрофизические свойства кокосового субстрата, применяемого в тепличном овощеводстве / В. И. Галицкий, Ю. В. Егоров, А. В. Кириченко [и др.] // *Гавриш*. – 2011. – С. 22–24.
53. Козлова, Е. П. Влияние ферментации на свойства кокосовых субстратов при выращивании овощных и цветочных культур на малообъемной гидропонике / Е. П. Козлова // *Гавриш*. – № 5. – 2011. – С. 28–29.
54. Ахмедова, П. М. Экономическая эффективность выращивания гибридов томата на кокосовом субстрате в зимне-весеннем обороте в условиях Дагестана / П. М. Ахмедова // *Вестник Казанского госулар. аграр. ун-та*. – 2020. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 5–9.
55. Косов, В. И. Сапропель. Ресурсы, технология, геоэкология / В. И. Косов. – М. : Наука, 2007. – 224 с.
56. Bunt, A. C. Physical properties of mixtures of peat and minerals of different particles size and bulk density for potting substrates / A. C. Bunt // *Acta Horticulturae (ISHS)*. – 1984. – № 150. – P. 143–153.



57. *Pasquier, P.* Effect of the rooting substrate on rooting growth and flowering *Chrysanthemum morifolium* Ramat / P. Pasquier, A. Anstett, A. Amiraux // *Acta Horticulturae* (ISHS). – 1982. – № 125. – P. 37–46.

58. *Wilson, G. C. S.* The physico-chemical and physical properties of horticultural substrates / G. C. S. Wilson // *Acta Horticulturae* (ISHS). – 1984. – № 150: – P. 19–32.

59. *Wilson, G. C. S.* Use of vermiculite as a growth medium for tomato / G. C. S. Wilson // *Acta Horticulturae* (ISHS). – 1984. – № 150. – P. 283–288.

60. *Яковлева, Н. Н.* Выращивание цветочных культур на цеолитовых субстратах / Н. Н. Яковлева // *Гавриш*. – 2000. – № 1. – С. 25–26.

61. *Козловская, И. П.* Формирование листового аппарата у растений салата на субстратах различного состава при выращивании в зимних теплицах / И. П. Козловская, Е. А. Сакова // *Вестник Белорусской государ. сельскохозяйств. академии*. – 2022. – N 2. – С. 77–80.

62. Перспективы использования перлита в сельском хозяйстве / Б. Т. Багманов [и др.] // *Современные тенденции развития науки и технологий* : сб. науч. тр. по материалам III Междунар. науч.-практ. конф., 30 июня 2015 г. : в 6 ч. / под общ. ред. Е. П. Ткачевой. – Белгород : ИП Ткачева Е. П., 2015. – Ч. II. – С. 60–63.

63. *Конеева, Е.* Что такое перлит и как его правильно использовать в садоводстве / Е. Конеева. – URL: <https://dach.ru/Eleko/cto-takoe-perlit-i-kak-ego-pravilno-ispolzovat-v-sadovodstve-243790.html> (дата обращения: 20.04.2025).

64. Perlite Group [Электронный ресурс] / Перлит для растений. – URL: <https://www.perlitgroup.com/ru/svojstva-i-xarakteristiki-perlita> (дата обращения: 20.04.2025).

65. *Трефилов, Р. А.* Перспективы использования перлита в сельском хозяйстве / Р. А. Трефилов // *Инновационный потенциал сельскохозяйственной науки XXI века: вклад молодых ученых-исследователей* : материалы Всерос. науч.-практ. конф., М-во сельского хозяйства РФ, ФГБОУ ВО «Ижевская ГСХА». – 2017. – С. 54–57.

66. *Гиль, Л. С.* Опыт применения агроперлита в малообъемных тепличных субстратах / Л. С. Гиль // *Производство и применение агроперлита. Опыт, технологии, перспективы*: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Киев, 26–28 мая 2008 г. / Нац. бот. сад им. Н. Н. Гришко НАН Украины, Гос. предпр. «Украин. науч.-исслед. и проектно-конструктор. ин-т строит. материалов и изделий «НИИСМИ». – Киев, 2008. – С. 12–16.

67. *Скалий, Л. П.* Использование перлита в технологии зеленого черенкования / Л. П. Скалий, Е. Г. Самощенко // *Производство и применение агроперлита. Опыт, технологии, перспективы*: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Киев, 26–28 мая 2008 г. / Нац. бот. сад им. Н. Н. Гришко НАН Украины, Гос. предпр. «Украин. науч.-исслед. и проектно-конструктор. ин-т строит. материалов и изделий «НИИСМИ». – Киев, 2008. – С. 79–81.

68. Перлит для растений: что это, преимущества и недостатки, особенности использования URL: <https://www.novochag.ru/dacha-and-garden/gardening/perlit-dlya-rastenii-cto-eto-preimushchestva-i-nedostatki-osobennosti-ispolzovaniya> (дата обращения: 20.04.2025).

69. Субстраты на основе органических отходов для выращивания сеянцев в контейнерах / Е. М. Романов, Д. И. Мухортов, А. В. Ушнурцев, В. В. Ускова // *Лесное хозяйство*. – 2009. – № 2. – С. 35–37.

70. *Андроникашвили, Т. Г.* Применение цеолитсодержащих горных пород в растениеводстве / Т. Г. Андроникашвили, Т. Ф. Урушадзе // Агрохимия. – 2008. – № 12. – С. 63–79.

71. Патент RU RU 2343696 C1 МПК A01G 31/00 Субстрат для выращивания растений в защищенном грунте : № а 2007131920/12, заявлено 22.08.2007 / Л. П. Степанова, Е. А. Коренькова, Е. И. Степанова, А. В. Таракин ; заявитель ФГОУ ВПО Орел ГАУ. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a5/40/10/ae6ae970dc5fd1/RU2343696C1.pdf> (дата обращения: 20.04.2025).

72. Использование природных цеолитов Зауралья Башкортостана для повышения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур (рекомендации производству) / Я. Т. Суюндуков, Х. М. Сафин, М. Б. Суюндукова, Р. Ф. Хасанова. – Сибай, СИЦ – ф-л ГУП РБ : Изд. дом «Республика Башкортостан», 2017. – 40 с.

73. *Лобода, Б. П.* Орловский цеолит - перспективный компонент тепличных субстратов для малообъемного выращивания огурца // Б. П. Лобода, В. М. Ходырев, И. А. Гористова // Гавриш. – 2007. – № 2. – С. 12–13.

74. Цеолит активированный ZEOL TY 2163-001-27860096-2016. – URL: <https://zeol.ru/catalog/ceolit-aktivirovannyy> (дата обращения: 01.10.2025).

75. Биохимический состав сортов и гибридов овощных культур в зависимости от применения удобрений, цеолита и регуляторов роста / В. А. Борисов, О. Н. Успенская, И. Ю. Васючков, А. А. Коломиец // Селекция, семеноводство и сортовая агротехника овощных, бахчевых и цветочных культур. – М.: ФГБНУ ВНИИО, 2016. – С. 40–45.

76. Применение диатомитов в сельском хозяйстве. – URL: <https://diatomitural.ru/company/blog/205/> (дата обращения: 01.10.2025).

77. *Байкин, Ю. Л.* Влияние диатомита и птичьего помета на урожайность ячменя / Ю. Л. Байкин, Н. А. Цапаев // Коняевские чтения : сб. ст. Всероссийской науч.-практ. конф., 4–8 февр. 2008 г., УрГСХА. – Екатеринбург : УрГАУ, 2008. – С. 285–287.

78. *Карпухин, М. Ю.* Эффективность использования диатомита в качестве удобрения при возделывании моркови в условиях Среднего Урала / М. Ю. Карпухин // Аграрный вестник Урала. – 2014. – № 1. – С. 17–19.

79. *Карпухин, М. Ю. В.* Эффективность диатомита Камышловского месторождения Свердловской области в качестве субстрата для выращивания овощных культур / М. Ю. Карпухин, А. В. Юрина // Актуальные проблемы развития биотехнологий : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 23–24 мая 2013 г. / М-во сельского хоз-ва РФ, ФГБОУ высш. проф. образования «Уральский гос. аграрный ун-т» ; науч. ред. И. М. Донник, Б. А. Воронин. – Екатеринбург : УрГАУ, 2013. – С. 98–101.

80. *Русакова, Г.* Керамзит на гидропонике / Г. Русакова // Цветоводство. – 1969. – № 5. – С. 8.

81. *Веремейчик, Л. А.* Использование промышленного керамзита для производства томатов в условиях защищенного грунта / Л. А. Веремейчик, Л. С. Герасимович // Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности : сб. ст. по материалам Междунар. науч. экол. конф., 27–29 мар. 2018 г. / Куб. гос. аграр. унт. – Краснодар, 2018. – С. 84–86.

82. Керамзит как субстрат в гидропонике. – URL: <https://www.rzevgbi.ru/o-kompanii/stati/keramzit-kak-substrat-v-gidroponike> (дата обращения: 01.10.2025).

83. *Иванова, Л. А.* Перспективы гидропонного выращивания растений в условиях Мурманской области / Л. А. Иванова, В. А. Котельников. – Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2006. – 106 с.

84. *Иванов, Д. И.* Развитие рассады корневого сельдерея в зависимости от содержания вермикулита в составе субстрата / Д. И. Иванов, Н. Н. Иванова // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2020. – № 1(30). – С. 36–42.

85. *Бойко, Л. А.* Вермикулит в гидропонике / Л. А. Бойко, В. В. Левицкий. – Л. : Наука, 1976. – 95 с.

86. *Онохина, Ж. Ф.* Некоторые итоги исследований применения вермикулита для выращивания растений / Ж. Ф. Онохина, Л. А. Иванова // Ботанические исследования за Полярным кругом. – Апатиты, 1985. – С. 15–18.

87. *Переверзев, В. Н.* Физико-химические свойства ковдорского вермикулита как субстрата для выращивания растений на гидропонике / В. Н. Переверзев // Агрохимия. – 1965. – № 2. – С. 115–122.

88. *Ярцева, М. А.* Влияние термовермикулита на рост и развитие овощных культур на ювенильном этапе онтогенеза // М. А. Ярцева, И. П. Кременецкая, Л. А. Иванова, М. В. Слуковская // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2024. – Т. 19. – № 2. – С. 250–268.

89. Использование неорганических субстратов в технологии размножения хищного клеща фитосейулюса / И. В. Андреева, А. А. Зенкова, В. П. Цветкова, Д. Ю. Герне // Инновации и продовольственная безопасность». – 2018. – № 1(19). – С. 7–15.

90. Mineral and organic growing media have distinct community structure, stability and functionality in soilless culture systems / O. Grunert, E. Hernandez-Sanabria, R. Vilchez-Vargas [et al.] // Sci. Rep. – 2016. – Vol. 6:18837. URL: [https://www.researchgate.net/publication/289367867\\_Mineral\\_and\\_organic\\_growing\\_media\\_have\\_distinct\\_community\\_structure\\_stability\\_and\\_functionality\\_in\\_soilless\\_culture\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/289367867_Mineral_and_organic_growing_media_have_distinct_community_structure_stability_and_functionality_in_soilless_culture_systems) (дата обращения: 01.10.2025).

91. *Raviv, M.* Soilless Culture. Theory and Practice. / M. Raviv, J. H. Lieth. – Amsterdam: Elsevier Science, 2008. – 691 p.

92. *Козловская, И. П.* Энергосбережение за счет теплоизоляции почвы в зимних теплицах при бессубстратном выращивании огурца / И. П. Козловская, В. А. Курочкин // Интеллектуальные технологии и техника в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Мичуринск, 18–20 окт. 2016 г. – Мичуринск-Наукоград, 2016. – С. 379–384.

93. *Веремейчик Л. А.* Оптимизация питания томатов на минеральных субстратах: рекомендации / Л. А. Веремейчик, Л. С. Герасимович. – Минск, 2006.

94. *Веремейчик, Л. А.* Основы питания томатов, выращиваемых в малообъемной культуре: монография / Л. А. Веремейчик. – Минск : Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2002. – 176 с.

95. *Веремейчик, Л. А.* Питание, продуктивность и качество томатов на минеральных субстратах в малообъемной технологии выращивания: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Веремейчик Лариса Антоновна; РУП «Информационно-вычислительный центр М-ва финансов Респ. Беларусь». – Минск, 2008. – 42 с.

96. Тепличное овощеводство на малообъемной гидропонике / Х. Симитчиев, В. Каназирска, К. Милив [и др.]. – Пер. с болг. – М.: Агропромиздат, 1985. – 144 с.

97. *Рассоха, Н. Ф.* Об эффективности применения регуляторов роста при выращивании томатов в зимних теплицах на минеральной вате / Н. Ф. Рассоха, Г. В. Наумова, Н. А. Жмакова // Природопользование. – 2011. – № 20. – С. 100–104.

98. *Степанов, А. Ф.* Урожайность огурца при выращивании в зимней теплице на малообъемной гидропонике при разном уровне освещения / А. Ф. Степанов, К. А. Пермякова, Л. А. Кротова // вестник омского государ. аграр. ун-та. – 2023. – № 3 (51). – С. 69–76.

99. *Горохова, Т. Ю.* Особенности использования минераловатного субстрата «Агрос» производства ОАО «Комат» (г. Ростов на Дону) для выращивания овощных культур в теплицах / Т. Ю. Горохова // Гавриш. – 2005. – № 5. – С. 8–11.

100. *Куропатина, Н. Д.* О необходимости экспертизы минераловатных субстратов / Н. Д. Куропатина. – Гавриш. – 2013. – № 4. – С. 20–22.

101. *Данилова, Т. Н.* Возможности использования гидрогелей для управления водообеспеченностью полей / Т. Н. Данилова, Л. В. Козырева // Плодородие. – 2008. – № 6. – С. 24–25.

102. *Енгальчева, Н. А.* Эффективность применения гидрогеля при выращивании рассады огурца для открытого грунта / Н. А. Енгальчева, Д. И. Енгальчев, К. Л. Алексеева // Известия ФНЦО. – 2021. – № 1–2. – С. 84–89.

УДК 631.8:631.416.9

## **ВЛИЯНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА**

**Л. А. Веремейчик<sup>1</sup>, А. Р. Цыганов<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь*

*<sup>2</sup>Международный институт управления и предпринимательства,  
г. Минск, Беларусь*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы в связи с увеличением антропогенной нагрузки на экологические системы и раскрытия биологических основ тесного взаимодействия человека и окружающей среды особенно значимым является комплексное изучение вопросов динамики функционального состояния живого организма в зависимости от изменений, происходящих в окружающей природной среде. Анализ закономерностей функционирования экологических систем в условиях природопреобразующей деятельности для жизнеобеспечения современного общества требует выработки тактики и стратегии поведения человечества в целях оптимизации функционирования этих систем.

В настоящее время исследования по комплексной, научно обоснованной оценке влияния факторов среды обитания на здоровье населения считаются одним из приоритетных направлений в области экологии человека. Установлено, что

в развитии учения о микроэлементах отмечается новый этап, кроме специфического их участия в определенных реакциях обмена веществ особую роль придают их метаболическим взаимодействиям, которые наблюдаются как в процессе образования и трансформации планетного вещества, так и в биогеохимических процессах (аккумуляция и рассеяние химических элементов организмами). Основным принципом экологического соответствия заключается в том, что форма существования организма (включая его генетические особенности) всегда соответствует условиям жизни, эти связи формировались в длительном геологическом времени наряду с эволюцией организмов адекватно изменению среды их обитания [1].

Еще В. И. Вернадский отмечал, что химический состав живых организмов теснейшим образом связан с химическим составом земной коры, он первым пришел к выводу, что, несмотря на ничтожно малое содержание многих химических элементов в окружающей среде, они постоянно и не случайно присутствуют в растительных и животных организмах. Следовательно, организм человека можно рассматривать в качестве геохимического индикатора, интегрирующего в себе трансформации природной среды, что позволяет дать прогноз изменения биосферы в целом. Поэтому на современном этапе геохимических исследований человека, становится чрезвычайно актуальной проблема техногенного воздействия, проявляющегося на территориях разных регионов и ландшафтно-геохимических условий [2].

В условиях техногенеза биосферы роль биогеохимии резко возрастает, формируется новое научное направление – биогеохимия ноосферы. Предметом ее исследований становятся техногенно преобразованные таксоны биосферы, их эволюция и пути оптимального взаимодействия человека и природы. В настоящее время биогеохимическое районирование таксонов биосферы является одним из важных элементов системы современного экологического мониторинга. Биогеохимия широко использует методы исследований минерального обмена, биологической роли микроэлементов, связи организмов с геохимической средой, изучение микроэлементозов, оценки эволюционных процессов, особенностей пищевых цепей, процессов адаптации и взаимодействия различных факторов среды и организма. Биогеохимия имеет ряд тождественных с общей экологией признаков – взаимодействие организмов с геохимической средой, зависимость их химического состава от состава среды, которые придают биогеохимии экологическую направленность [1].

Установлено, что геохимический состав окружающей среды, в том числе микроэлементный фон почв, в основном из-за мозаичности содержания микроэлементов, играет огромную роль в возникновении различных заболеваний у населения. Почва – основное средство сельскохозяйственного производства, является начальным звеном цепи возможного поступления различных элементов в организм человека: «почва – вода – растение – животный организм – человек», вместе с продуктами питания человек может получать как полезные, так и вредные вещества, содержащиеся в почве. Кроме того, отмечается, что как недостаток, так и избыток микроэлементов в почве, наряду с иными причинами, приводит к дисбалансу их поступления с продуктами питания в организм человека, что в дальнейшем обуславливает возникновение возможных патологических изменений обмена веществ, которые негативно влияют на его здоровье и жизнедеятельность [3].

Следовательно, с учетом того что, почва, с имеющимися отклонениями от оптимального содержания микроэлементов, оказывает негативное влияние на состояние человека, именно поэтому в современном мире одной из важных сторон исследований является выяснение природы биогеохимических эндемий как причин ряда микроэлементозов человека.

## МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данном исследовании проведен анализ современных специализированных литературных источников и актуальных научных данных, обобщен и систематизирован материал о взаимосвязи содержания микроэлементов в почве и их воздействии на безопасность жизнедеятельности человека, в первую очередь на его здоровье. Актуальным явилось изучение спектра основных микроэлементов, определяемых в пахотных почвах Республики Беларусь, и проведение оценки уровня их содержания в сравнении с фоновыми концентрациями в почве, а также степень их значимости для организма человека. Представлены основные подходы к решению проблемы по оптимизации обеспеченности почв микроэлементами с учетом гигиенического и экологического нормирования.

Цель исследования – проанализировать показатели крупномасштабного агрохимического обследования пахотных почв по накоплению основных микроэлементов (цинк, медь, бор), определить, как может проявляться их дефицитное или избыточное содержание в форме заболеваний человека, вызванных нарушением баланса микроэлементов в организме, рекомендовать требования, разработанные Министерством здравоохранения Республики Беларусь, при применении агрохимикатов и удобрений для увеличения безопасности населения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Анализ содержания микроэлементов в пахотных почвах Республики Беларусь.** Почва – это природный ресурс, который необходим для любой деятельности человека, особенно для производства сельскохозяйственной продукции. Микроэлементы являются неотъемлемой частью биосферы, они в незначительных количествах необходимы для всех без исключения растений, животных и человека. Практически все микроэлементы относятся к группе тяжелых элементов и необходимо своевременно принимать контрмеры, позволяющие предотвратить возможное их отрицательное воздействие на агроценозы и окружающую среду в целом. Тяжелые элементы могут усваиваться живыми организмами непосредственно из воды и воздуха. Попадание микроудобрений в грунтовые и поверхностные воды также может отрицательно сказаться на здоровье животных и человека. Опасность загрязнения окружающей среды, в частности почвы, сводится к тому, что, попадая в почву, тяжелые элементы усиливают минерализацию органического вещества и вызывают негативные воздействия на почвенно-поглощающий комплекс, вследствие замещения кальция и магния. При этом снижается биологическая активность почвы, подавляется активность ферментов, что отрицательно сказывается на жизнеспособности микроорганизмов, а также приводит к деградации почвы и снижает ее способность к самоочищению [4].



Избыточное накопление микроэлементов в верхнем слое почвы оказывает разрушительное воздействие на наземную экосистему и представляет угрозу для ее обитателей. При накоплении в почве в значительных количествах они оказывают токсическое действие на растения, а через них по пищевой цепи могут попасть в организм животных и человека. Проникая в растения, тяжелые элементы частично сохраняются в виде неактивных соединений в клетках и клеточных мембранах, а также активно включаются в метаболические процессы. Это приводит к изменениям в направленности физиолого-биохимических процессов и реализации генетической программы растений, нарушаются естественно сложившиеся фитоценозы, в результате снижается величина урожая, ухудшается качество продукции. Химические соединения микроэлементов довольно устойчивы и долго сохраняют свои токсические свойства, поэтому необходимо учитывать скорость их накопления в почве, размер поступления в растения и факторы, усиливающие эти процессы [4].

Из загрязненной почвы вредные вещества поступают в растения, растения без видимых признаков отравления могут накапливать их в токсичных для человека и животных количествах. Это вызывает особую опасность, так как по трофическим цепям с кормом и продуктами питания они попадают в организм животных и человека, вызывая различные заболевания, включая онкологические. Нарушение сбалансированности питания растений макро- и микроэлементами приводит к различным заболеваниям и ухудшению фитосанитарного состояния почвы. Следует учитывать, что у микроэлементов очень узок оптимальный и безвредный интервал концентрации – это усиливает их опасность. Однако это не означает отказ от включения микроэлементов в систему удобрения севооборота, так как приведет к резкому снижению эффективности вносимых минеральных удобрений и недобору урожая. В долгосрочной перспективе последствия загрязнения в совокупности с климатическими изменениями могут привести к сокращению количества доступной пищи, снижению ее качества, в конце концов, к нехватке продовольствия, что может обернуться глобальной катастрофой [4–6].

Биогеохимические исследования свидетельствуют об определенной зависимости между содержанием микроэлементов в почвах, величиной урожайности сельскохозяйственных культур и качеством продукции соответствующей гигиеническим нормативам для продовольственных и кормовых культур. Следует учитывать, что многие почвы, в том числе пахотные почвы Беларуси, не содержат необходимое количество микроэлементов. Вместе с тем им принадлежит важное место в комплексе приемов природоохранной агротехники возделывания сельскохозяйственных культур. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования трансформации тяжелых элементов по всей экологической цепи почва – растение – животное – человек с целью улучшения гигиенического качества продукции и среды обитания человека [4].

Установлено, что недостаточное содержание подвижных форм микроэлементов в почве является фактором, лимитирующим формирование урожая и качества продукции сельскохозяйственного производства. Особенно это актуально для высококультуренных почв, которые отличаются оптимальной кислотностью, высоким содержанием гумуса, фосфора и калия. В настоящее время в Республике Беларусь площади пахотных почв с рН более 6,0 составляют 38,2 %, с повышенным и высоким содержанием гумуса – 62,5 %, фосфора – 52,3 %, калия – 44,8 %. На

таких почвах потребность растений в микроэлементах и роль сбалансированности минерального питания возрастает в условиях интенсивных технологий, направленных на формирование высокопродуктивных посевов. Кроме непосредственного влияния на развитие растений, микроэлементы усиливают активность микробиологических процессов в почве, при этом отмечается улучшение использования из минеральных удобрений фосфора и калия. Так как применение микроудобрений на дерново-подзолистых высококультурных почвах повышает эффективность азотных, фосфорных и калийных удобрений, поэтому для повышения эффективности сельскохозяйственного производства важно оптимизировать систему применения микроудобрений в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: дозы, сочетания и сроки некорневых подкормок микроудобрениями [7].

С целью определения обеспеченности почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь микроудобрениями с 1986 г. проводится крупномасштабное обследование на содержание в них подвижных форм микроэлементов – бора, меди и цинка. Полученные результаты сравниваются с установленными градациями их содержания в почве, которые разделяются на четыре группы: низкое, среднее, высокое и избыточное. Полученные данные используются для разработки системы применения микроудобрений на определенных удобряемых участках. При этом учитывается, что на участках при второй группе обеспеченности микроэлементами почв, соответствующей оптимальным параметрам, требуется только компенсирующее вынос микроэлементов внесение микроудобрений в виде некорневых подкормок, обработки семян, применение органических удобрений. На почвах третьей группы обеспеченности внесение микроудобрений не требуется, на этих почвах рекомендуется для повышения качества продукции обработка семян сельскохозяйственных культур микроэлементами или некорневые подкормки. На почвах с избыточным содержанием микроэлементов – четвертая группа, вообще исключается применение соответствующих микроудобрений [8].

Результаты агрохимического обследования по республике свидетельствуют, что в период с 1997 г. по 2008 г. наблюдался тренд снижения содержания микроэлементов в пахотных почвах, так, средневзвешенная концентрация цинка снизилась на 24,7 %, меди и бора – на 19,0 и 14,1 % соответственно. Анализ данных крупномасштабного агрохимического обследования сельскохозяйственных земель за период 2017–2020 гг. показывает, что средневзвешенное содержание бора на пахотных почвах составляет 0,61 мг В на 1 кг почвы, что близко к оптимальному значению, в соответствии с принятой градацией ко второй группе относятся почвы с содержанием В 0,31–0,70 мг/кг почвы. Средневзвешенное содержание меди в пахотных почвах составляет 1,81 мг/кг, ко второй группе обеспеченности почв Си относятся почвы с содержанием 1,51–3,00 мг/кг почвы. Следует отметить, что площади пахотных почв первой и второй групп обеспеченности с содержанием меди менее 3,0 мг/кг составляют 89,5 %. Пахотные почвы республики недостаточно обеспечены цинком, 64,8 % почв относятся к первой группе с содержанием Zn менее 3,0 мг/кг. Средневзвешенное содержание цинка в пахотных почвах на данный период обследования равно 3,05 мг/кг, что ниже оптимального уровня – 5,0 мг/кг почвы. Отмечается значительное варьирование содержания подвижных форм микроэлементов в почвах по полям и участкам, что создает предпосылки для дифференциации доз при использовании микроудобрений на пахотных почвах [8].

**Анализ воздействия микроэлементов на здоровье населения.** На современном этапе при оценке состояния естественных и антропогенных экосистем важно учитывать такое понятие, как «здоровье – интегральный показатель качества среды обитания». Благоприятная окружающая среда является важнейшей составляющей комфортных условий для жизни. Микроэлементы выполняют важнейшие функции в организме человека входят в состав структуры биологически активных веществ: ферментов, гормонов и витаминов, участвуют в обмене белков, жиров, углеводов, синтезе белка в организме, теплообмене, кроветворении, костеобразовании, размножении, реакциях иммунитета. Большую часть микроэлементов человек получает извне вместе с едой, водой, воздухом. Они должны поступать в организм человека регулярно, в небольших количествах с продуктами питания, их длительный недостаток или выраженный избыток в питании ведет к нарушениям обмена веществ и заболеваниям. Содержание микроэлементов в организме человека невысоко, общее их количество составляет менее 0,01 % массы тела [9].

Известно, что недостаток или избыток микроэлементов в почве приводит так же к их недостаточному или избыточному содержанию в растениях, организме животных и человека. Установлена тесная связь между гигиеной почвы и здоровьем жителей, чем более загрязнена почва, тем больше в данном населенном пункте обнаруживается специфических заболеваний у населения. С учетом геохимических факторов разработаны рекомендации по первичной профилактике многих социально-значимых заболеваний. Заболевания, связанные с недостатком или избытком микроэлементов, получили название эндемических. Считается, что наиболее часто при тяжелых заболеваниях следует ожидать развитие нарушений со стороны цинка (Zn), меди (Cu), марганца (Mn), селена (Se), молибдена (Mo), йода (I), железа (Fe), хрома (Cr) и кобальта (Co). Нарушение баланса микроэлементов имеет свое медицинское название – дисэлементоз [9, 10].

Дисбаланс определенных микроэлементов приводит к ряду проявлений в организме: нехватка марганца, цинка или хрома вызывает избыток веса, с которым трудно бороться; при нехватке хрома или цинка возможны нарушения процесса пищеварения; при дефиците цинка может возникать расстройство микробной флоры кишечника; дефицит цинка, селена вызывает аллергию на пищу; проблемы с поступлением хрома, цинка, марганца, молибдена приводят к повышению сахара крови; при дефиците селена, цинка, йода могут быть нарушения работы простаты; дефицит железа, цинка, меди вызывает ломкость ногтей, секущиеся волосы; при дефиците меди, селена или марганца появляется пигментация на коже; нехватка селена, меди, цинка приводит к появлению прыщей на лице и теле [10].

Следует отметить особую роль для здоровья населения микроэлементов, которые определяются в пахотных почвах Республики Беларусь – это цинк, медь и бор.

*Цинку* отводится важная роль в развитии иммунологических реакций, особенно клеточного иммунитета. В организме человека цинк является кофактором более чем 300 ферментов, участвующих в биохимических процессах. Будучи связанным с ферментами, гормонами, витаминами, цинк оказывает значительное влияние на кроветворение, обмен белков, жиров, углеводов и др., принимает участие в функционировании гормонов гипофиза, надпочечников, поджелудочной железы. Он незаменим для нормального развития и работы органов чувств: вкуса, зрения,

обоняния. Цинк необходим для синтеза инсулина, укрепления иммунной системы, образования гормонов, его недостаток вызывает риск развития депрессии, снижение иммунной защиты, проблемы с волосами и ногтями [11, 12].

*Медь* принимает активное участие в построении многих необходимых человеку белков и ферментов, участвует в процессах роста и развития клеток и тканей, способствует образованию эластина – соединительной ткани, образующей внутренний слой, выполняющий функцию каркаса сосудов. Медь необходима для нормального процесса кроветворения и работы иммунной системы, транспортирует железо из печени, поддерживая состав крови и нормальное состояние всех органов и тканей, делает здоровыми и крепкими кости, предотвращает развитие остеопороза. Вместе с аскорбиновой кислотой медь поддерживает иммунную систему в активном состоянии, помогая ей защищать организм от инфекций. Медь стимулирует активность гормонов гипофиза и поддерживает в норме работу эндокринной системы, нормализует процесс пищеварения и защищает пищеварительную систему от повреждений и воспалений. Без меди не может нормально формироваться мозг и нервная система – медь является основным компонентом миелиновых оболочек, без которых нервные волокна не могут проводить импульсы, а потом просто разрушаются. Медь поддерживает здоровье кожи, ее дефицит вызывает заболевания: анемии разного типа, дерматиты, проблемы пигментации, психические расстройства, нарушение терморегуляции [11, 12].

*Бор* содержится в окружающей среде, натуральной пище и пищевых добавках. Этот элемент не встречается в природе в чистом состоянии, а только в формах его солей (боратов, полиборатов), борной кислоты, аспартата, глюконата бора и прочих. Эксперты признают, что он может быть одним из самых сложных минералов на земле. Пока его не классифицируют как важное питательное вещество для организма, так как еще не определена его основная биологическая функция, но его наибольшие концентрации обнаружены в пище растительного происхождения. Организм всасывает до 90 % компонента, поступающего с пищей, все свойства этого микроэлемента пока до сих пор не изучены. Статус минерала обычно не измеряется в клинической практике. Однако интерес к нему постепенно растет и все больше исследований подтверждают его пользу для человека. Установлено, что он поддерживает здоровье костей, функции стероидных гормонов, укрепляет мышцы и улучшает мозговую деятельность. Симптомы дефицита бора: нехватка минерала в организме связана с плохим иммунитетом, повышенным риском смертности, остеопорозом, дефицит изучен недостаточно, поскольку встречается очень редко [13, 14].

## ВЫВОДЫ

Таким образом, применение микроудобрений должно быть сбалансированно с обязательным учетом их взаимодействия с объектами окружающей среды. Внешение в почву или накопление в ней загрязняющих веществ вследствие применения избыточного количества удобрений может создавать недопустимую угрозу для здоровья человека, животных или для окружающей среды. Применение высоких норм удобрений зачастую не только не способствует увеличению урожая и улучшению его качества, но и приводит к потерям элементов питания, снижению экономической эффективности производства. В то же время в условиях дефицита

микроэлементов нарушаются процессы обмена веществ в растениях, задерживается их развитие, снижается устойчивость к неблагоприятным условиям внешней среды и болезням. Недостаточное применение удобрений подразумевает внесение питательных веществ в объемах ниже потребностей соответствующих культур, что приводит к снижению в них содержания питательных веществ, ухудшению качества продукции, уменьшению потенциальной урожайности, уменьшению возврата углерода в почву, что отрицательно сказывается на ее плодородии. Необходимо помнить, что труднее устранить токсичность микроэлементов, чем восстановить их недостаток.

С целью наиболее полного обеспечения охраны окружающей среды и рационального использования удобрений, более обоснованного использования территории хозяйства следует учитывать агроэкологические параметры на отдельных локальных участках удобряемой площади, использовать данные крупномасштабного агрохимического обследования по содержанию микроэлементов в почве. Вместе с тем, важное место в комплексе приемов принадлежит природоохранной агротехнике возделывания сельскохозяйственных культур, недопустимо нарушение технологической дисциплины при внесении микроудобрений. Для предотвращения загрязнения окружающей среды при работе с микроудобрениями важно соблюдать научно обоснованные рекомендации: вносить оптимальные дозы в соответствующие сроки; выбирать оптимальный способ использования; применять хелатные формы микроэлементов; равномерно распределять их по удобряемой площади [4].

Предотвращению нарушения равновесия экосистемы, обеспечению безопасности применения микроудобрений будет способствовать строгое соблюдение технологической дисциплины их внесения, следует, прежде всего, предотвратить все потери от завода до поля, соблюдать требования, начиная с их транспортировки и хранения. Большое значение имеет технология внесения удобрений, для более полного их использования растениями необходимо добиться равномерного распределения удобрений по поверхности. При использовании туковысеивающей техники следует строго соблюдать точное расстояние между проходами и выбирать оптимальную ширину их захвата. Это позволит повысить коэффициенты использования питательных элементов растениями и снизить их непроизводительные потери [4].

Рациональная система удобрения должна предусматривать обязательную оценку негативного влияния агрохимикатов на агроценозы и его минимизацию, обеспечивать безопасность населения, сохраняя при этом их высокую эффективность. Министерством здравоохранения Республики Беларусь утверждены новые требования к безопасному применению указанных средств. Предотвращение загрязнения среды обитания человека при обращении с агрохимикатами обеспечивается механизацией и автоматизацией работ, соблюдением регламентов применения и способов внесения препаратов. При использовании препаратов должны соблюдаться меры безопасности, установленные нормативными правовыми актами; к выполнению работ связанных с использованием препаратов допускаются работающие в соответствии с требованиями законодательства об охране труда; не допускается нахождение посторонних лиц на участках, обрабатываемых препаратами; необходимо обеспечить через средства массовой информации или иным способом оповещение населения близлежащих населенных пунктов, на

границе с которыми размещаются подлежащие обработкам площади; применение препаратов не должно приводить к превышению показателей, определенных гигиеническим нормативом [15].

В настоящее время это новое научное направление развивается многими учеными, непреходящая роль принадлежит биогеохимии в оценке новых материалов и технологий, обеспечивающих здоровье человека и животных, целостность и организованность биосферы. Развитие проблемы концентрирования микроэлементов организмами дает не только новые знания о механизмах поведения химических элементов, особенностях их обмена и влиянии на физиологические процессы, но и служит основой создания новых технологий в экологии, микробиологии, растениеводстве, медицине и ветеринарии. Результаты биогеохимических исследований используются в биотехнологии при разработке технологий получения биопрепаратов и лекарств с определенным содержанием микроэлементов, производстве микроудобрений. Развиваются биогеохимический инжиниринг, новые методы биогеохимической индикации экологического состояния территорий, внедряются новые инфокоммуникационные системы, позволяющие отслеживать биогеохимические процессы в динамике [1].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермаков, В. В.* Современное развитие биогеохимических идей В. И. Вернадского: [сайт] / В. В. Ермаков // Геохимия. – 2023. – Т. 68. – № 10. – С. 995–1008. – URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=geokhim&y=2023&v=68&n=10&a=GeoKhim2310004Ermakov> (дата обращения: 15.10.2025).
2. *Игнатова, Т. Н.* Элементный состав организма человека и его связь с факторами среды обитания: автореф. дис... канд. геолого-минералогических наук: 25.00.36 / Т. Н. Игнатова ; Томский политех. ун-т. – Томск, 2010. – 22 с.
3. *Ибрагимова, С. С.* Медико-экологическое значение содержания некоторых микроэлементов в почвах равнинной зоны Дагестана / С. С. Ибрагимова // Журнал медико-биологических исследований. – 2021. – Т. 9. – № 1. – С. 69–76.
4. *Шеуджен, А. Х.* Экологическая агрохимия: учеб. пособие / А. Х. Шеуджен, Н. И. Аканова, Т. Н. Бондарева. – Майкоп: ООО «Полиграф-ЮГ», 2018. – 575 с.
5. Загрязнение почвы: экологическая угроза и способы решения проблемы [сайт] // Экология, 11 мая 2025. – URL: <https://science.mail.ru/articles/1860-zagryaznenie-pochvy-ekologicheskaya-ugroza-i-sposoby-resheniya-problemy> (дата обращения: 25.09.2025).
6. ФАО опубликовала «Международный кодекс поведения в области устойчивого использования удобрений и управления ими» (Кодекс по удобрениям) [сайт] – URL: <https://rskrf.ru/tips/eksperty-obyasnyayut/mikroelementy-kakie-byvayut-zachem-nuzhny-i-kak-vliyayut-na-zdorove> (дата обращения: 25.09.2025).
7. Регламент применения микроудобрений в технологии возделывания озимого рапса и ярового ячменя / М. В. Рак, Е. Н. Пукалова, Н. С. Гузова [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2023. – № 2(71). – С. 119–126.
8. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2017–2020 гг.) / И. М. Богдевич, В. В. Лапа, М. В. Рак [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Мн. : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 276 с.



9. Щетинина, С. Ю. Значение минеральных веществ для здоровья человека / С. Ю. Щетинина // Биологические науки. – International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2024. – Vol. 4(91). – С. 27–31.

10. Нарушение баланса микроэлементов [сайт]. – URL: <https://www.smclinic-spb.ru/zabolevan9iya/narushenie-balansa-mikroelementov> (дата обращения: 01.10.2025).

11. Роль макро и микроэлементов в организме человека [сайт] / Н. В. Ежикова. – URL: <https://12sanepid.ru/press/publications/3650.html> (дата обращения: 01.10.2025).

12. Микроэлементы и здоровье [сайт] / В. В. Лешкевич. – URL: <https://www.10gkb.by/informatsiya/stati/mikroelementy-i-zdorove> (дата обращения: 02.10.2025).

13. Бор в организме человека: к чему приводит дефицит, в каких продуктах содержится [сайт] / Т. В. Матвеева. – URL: <https://el-klinika.ru/bor-v-organizme-cheloveka-k-chemu-privodit-deficizt-v-kakih-produktah-soderzhitsya> (дата обращения: 15.10.2025).

14. Бор (В) – значение для организма и здоровья + 25 источников [сайт] / Н. Ткачева. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bor-v-znachenie-dlya-organizma-i-zdorovyya-25-istochnikov/viewer> (дата обращения: 15.10.2025).

15. Санитарно-эпидемиологические требования к применению средств защиты растений, агрохимикатов и минеральных удобрений / Об утверждении санитарных норм и правил; постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь 11 декабря 2024 г. № 171. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://mshp.gov.by/uploads/Files/sanpravila/postanovlenie2024.171.pdf> (дата обращения: 25.09.2025).

## THE INFLUENCE OF TRACE ELEMENTS ON HUMAN HEALTH

L. A. Veremeychik, A. R. Tsyganov

### Summary

This article evaluates the accumulation of the main trace elements (Cu, Zn and B) in the soil, the environmental problems associated with the impact of trace elements on the environment, separately analyzed the potentially adverse effects of the impact of trace elements on the human body and their impact on health, the technology of safe application of microfertilizers is considered.

*Поступила 24.10.25*

### **3. ТРИБУНА МОЛОДОГО УЧЕНОГО**

УДК 631.44:631.459.3

#### **ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ АГРОХИМИЧЕСКИХ И АГРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕФЛЯЦИОННООПАСНЫХ ПОЧВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ**

**А. А. Бенько**

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

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В контексте интенсификации климатических изменений дефляция почв идентифицируется как один из потенциально наиболее опасных видов деградации на территории Республики Беларусь. Ее интенсивность детерминирована комплексом природных условий, включая специфику климата, рельефа, свойств почвенного и растительного покрова. Процесс дефляции проявляется в двух основных формах: в виде постоянного эолового переноса почвенных частиц на обнаженных участках, лишенных растительности, и в виде эпизодических пыльных бурь. На территории Белорусского Полесья сильнее всего проявляются последствия данного деградационного процесса [1]. Это обусловлено рядом факторов – преобладание почв легкого гранулометрического состава, связанная с этим бесструктурность почвенного покрова, также не в последнюю очередь на повышения уязвимости почв к процессу дефляции повлияла проведенная на территории Полесья мелиорация земель, которая повлекла за собой изменения гидрологического режима почв и, в следствии этого, других агрохимических характеристик [2].

Оптимизация использования сельскохозяйственных земель невозможна без учета пространственной неоднородности почвенных свойств и вывода закономерностей их распределения. Неоднородность почвенного покрова в пределах поля приводит к пестроте показателей отдельных свойств, недобору урожая, затрудняет его уборку и обработку почвы. Негативные деградационные процессы и явления нередко связаны не с преобладающими, а с сопутствующими компонентами [3].

Цель исследования – изучение взаимосвязей агрохимических и агрофизических свойств дефляционноопасных почв на территории физико-географической провинции Белорусского Полесья, а также определение их прямого и косвенного влияния на процессы дефляции и деградации почвенного покрова.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований является участок площадью 1,4 га, расположенный в Калинковичском районе Гомельской области. Почвы исследуемого участка целиком представлены дерново-подзолистой глееватой песчаной почвой. Относительный перепад высот составляет 1 м в западном направлении.

Отбор почвенных проб производился агрохимическим буром из пахотного горизонта через 50 м от центра поля в направлении понижения рельефа.



Рис. 1. Схема участка с размещенными точками пробоотбора

Обработка пространственных данных и создание картографического материала проводилась в программном продукте ArcGIS ArcMap 10.7. Для проведения корреляционного анализа и построения матрицы диаграммы рассеяния был использован программный продукт ArcGIS Pro 3.4.0.

Устойчивость почв к дефляции определена по результатам структурно-агрегатного анализа – по методу Савинова [4].

Плотность почвы определяли буровым методом при помощи колец Капещкого (метод «режущих колец»).

Лабораторно-аналитические исследования агрохимических показателей почв выполнялись по следующим методикам: органическое вещество (гумус) – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), сумма поглощенных оснований и гидролитическая кислотность – по Каппену (ГОСТ 27821-88; ГОСТ 26212-91), подвижных форм фосфора и калия – по ГОСТ 26207-91.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате работы было изучено распределение значений содержания гумуса, кислотности, подвижных соединений фосфора и кальция, степени насыщенности основаниями, содержания кальция и показателей плотности почв; определена степень подверженности почв участка дефляции; установлены взаимосвязи между дефляционными процессами и агрохимическими и агрофизическими свойствами почв исследуемого участка.

По результатам обработки полученных данных были составлены цифровые картограммы распределения агрохимических и агрофизических свойств почв участка, представленные на рисунке 2 (табл.).

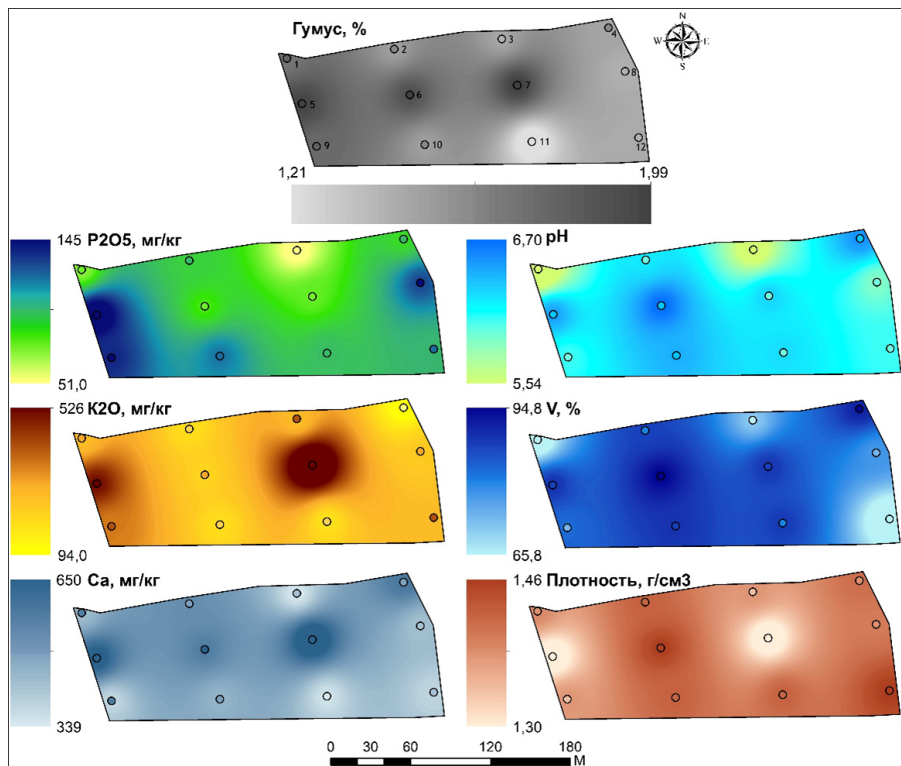


Рис. 2. Картограммы распределения агрохимических и агрофизических показателей

Таблица

**Значения показателей агрохимических и агрофизических свойств почв исследуемого участка**

N	pH	V	Гумус	Ca	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Плотность	Содержание частиц < 0,1 мм
1	5,54	66,4	1,72	413	70	202	1,4	33,77
2	6,41	88,9	1,54	499	88	151	1,43	30,70
3	5,77	75,0	1,51	339	51	203	1,39	39,82
4	6,67	92,0	1,52	542	84	94	1,42	11,52
5	6,63	90,6	1,97	608	145	376	1,30	17,44
6	6,79	94,8	1,90	529	79	170	1,46	25,86
7	6,47	90,0	1,99	650	76	526	1,30	18,60
8	6,14	80,4	1,47	407	121	184	1,41	9,62
9	6,28	85,2	1,78	366	128	274	1,39	17,34
10	6,58	90,4	1,54	428	113	153	1,43	15,04
11	6,44	89,4	1,21	349	94	145	1,43	12,38
12	6,28	65,8	1,49	372	96	207	1,46	11,52

Содержание гумуса на участке преимущественно низкое за исключением точек 6 и 7, расположенных в центре. В данных областях оно соответствует среднему значению (1,5–2,0 %). Так же выявлена небольшая зона высокого содержания на западе участка (точка 5) – содержание гумуса среднее. В точке 11 наблюдается наименьшее значение – 1,21 %. Оптимальные значения для сравнительного анализа распределения использованы в соответствии с [5].

Кислотность участка можно охарактеризовать как близкую к нейтральной. Зоны наибольших показателей на западе (точка 5), а также в точках 6 и 4, расположенных в центре и северо-востоке участка соответственно, где значения pH нейтральные (6,5–6,7). В точках на северо-западной (точка 1), северной (точка 3) и восточной (точка 8) границах участка реакция среды слабокислая, что обусловлено перепадом высот в 1 м в юго-западном направлении.

Большая часть участка имеет низкое содержание (61–100 мг/кг почвы) подвижного фосфора. Показатели возрастают на западе участка (точки 5, 9), достигая 145 мг/кг почвы. Аналогичное среднее содержание соответствуют точке 8, расположенной на востоке. Наименьшее содержание, равное 51,0 мг/кг почвы, наблюдается в точке 3 и оценивается как очень низкое.

Содержание подвижного калия очень контрастно и варьируется от 94 до 526 мг/кг почвы. В точках 5 и 7 содержание очень высокое, в точках 2, 4, 6, 10, 11 – содержание низкое с минимумом в точке 4 на северо-востоке (94 мг/кг почвы). Все остальные значения соответствуют среднему содержанию  $K_2O$ . Оптимальные значения для сравнительного анализа распределения использованы в соответствии с [6].

Степень насыщенности основаниями на всей территории участка выше среднего и варьируется от 65,8 % до 94,8 %. Высокие значения присущи большей части участка. Снижение наблюдается в точках 1, 3, 12, что также связано с незначительным переносом почвенного мелкозема в юго-западном направлении.

Диапазон значений содержания кальция составляет 330–650 мг/кг. Точки 3, 9, 11 приурочены к области с очень низким содержанием кальция, остальные точки – с низким (400–650 мг/кг почвы).

Значения плотности относятся к оптимальным (1,30–1,45 г/см<sup>3</sup>) для песчаных почв на всей территории участка. Оптимальные значения для сравнительного анализа распределения использованы в соответствии с [7].

Почвы исследуемого участка принадлежат к дефляционноопасным. Наблюдаются небольшие различия в устойчивости в точках пробоотбора. В точках 7 и 9 отношение удельного веса фракции < 0,1 мм выше, чем во всех остальных точках и составляет 13 %, что критически мало, однако в сравнении с остальными значениями (от 2 до 10 %) имеет смысл изучить данную вариацию на небольшом и однородном по данным почвенной карты участке.

Наиболее эффективным способом оценки причинно-следственных связей пространственной дифференциации любых свойств, в том числе почвенных, является анализ взаимосвязей между имеющимися характеристиками.

Установлено, что сильная положительная взаимосвязь ( $R > 0,7$ ) существует между кислотностью и степенью насыщенности основаниями и равняется 0,83.

Умеренная положительная связь лежит в диапазоне значений от 0,3 до 0,7 и наиболее очевидна между содержанием Са и степенью насыщенности осно-

ваниями и достигает 0,57, при коэффициенте детерминации равном 0,32, или 32 %. Так же наблюдается прямая корреляция между значениями Ca и pH – 0,56 и  $RI = 0,31$ . Взаимозависимости между данными свойствами существуют, так как они обуславливают кислотный режим почв.

Также умеренная положительная взаимосвязь наблюдается между содержанием Ca и плотностью.

Доля агрегатов < 1,0 мм и плотность имеют сильную отрицательную связь ( $R = -0,70$ ,  $RI = 0,52$ ), что означает при уменьшении данной фракции возрастает плотность. Обратная связь с плотностью указывает на известный и прямой признак, что почвы с долей фракции < 1,0 мм и высокой плотностью менее подвержены дефляции [8]. Все другие взаимосвязи между свойствами не имеют статистической значимости.

Высокая насыщенность основаниями и содержание кальция обычно улучшают агрегацию глинистых частиц (Ca коагулирует коллоиды), повышают устойчивость структуры и снижают подверженность к дефляции [9]. Сильная связь между pH и V демонстрирует, что щелочные условия и запас основных катионов взаимосвязаны – на таких участках прочность структуры выше, следовательно риск дефляции ниже.

Также косвенными признаками, указывающими на склонность к процессам дефляции, могут выступать низкое содержание подвижного фосфора и калия, которые непосредственно влияют на рост растений, а следовательно закрепление и защиту почв от выдувания.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований были выявлены взаимосвязи между агрохимическими и агрофизическими свойствами на экспериментальном участке. Самая сильная прямая связь отмечена между кислотностью (pH) и степенью насыщенности основаниями (V)  $R = 0,83$  и  $RI \approx 0,69$ , это означает, что около 69 % изменчивости одной переменной объясняется другой. Содержание Ca связано со степенью насыщенности основаниями и с кислотностью ( $R \approx 0,56-0,57$ ;  $RI \approx 0,31-0,32$ ), а также имеет умеренную прямую связь с плотностью. Плотность и доля фракции < 1,0 мм имеют очень сильную обратную связь. Общая оценка значимости: большинство других пар показателей не демонстрируют статистически значимых линейных связей.

Высокая насыщенность основаниями улучшает формирование почвенных агрегатов и повышают устойчивость почв к дефляции.

Почвенный контур исследуемого участка по генетической классификации имеет однородное строение. Установлено, что даже на небольшом по площади участке наблюдается значительная вариабельность данных свойств, которую очень трудно и дорого учитывать в полном объеме и на таком уровне детализации при ведении сельского хозяйства.

Данное исследование подтверждает необходимость в мониторинге дефляционноопасных почв с целью предотвращения, а в последствии улучшения и восстановления почвенного покрова.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глава 12. Рациональное использование уязвимых экосистем: борьба с опустыниванием и засухой Беларусь // ООН. – URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/agenda21\\_ch12b.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/agenda21_ch12b.shtml) (дата обращения 22.10.2025).
2. Коноплев, Е. А. Мелиорация и комплексное освоение земель Полесья / Е. А. Коноплев // Мелиорация. – 2013. – № 4. – С. 21–26.
3. Пространственная неоднородность почвенного покрова и агрохимических показателей почв Солигорского района / Н. В. Клебанович, А. Л. Киндеев, А. А. Сазонов [и др.] // Земля Беларуси. – 2019. – № 1. – С. 39–48.
4. Медведев, В. В. Структура почвы: методы, генезис, классификация, эволюция, география, мониторинг, охрана / В. В. Медведев. – Харьков: 13 типография, 2008. – 406 с.
5. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь: метод. указания / И. М. Богдевич, В. В. Лапа, А. Ф. Черыш [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии». – Мн. : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2020. – 48 с.
6. Богдевич, И. М. Итоги и перспективы оптимизации агрохимических показателей плодородия пахотных почв Беларуси / И. М. Богдевич // Известия Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – № 1, Т. 61. – С. 22–34.
7. Цырибко, В. Б. Определение оптимальных параметров агрофизических свойств почв и оценка современного состояния на их основе / В. Б. Цырибко // Почвоведение и агрохимия. – 2016. – № 1(56). – С. 36–44.
8. Computing the wind erodible fraction of soils / D. W. Fryrear, C. A. Krammes, D. L. Williamson [et al.] // J. Soil Water Conserv. – 1994. – № 49. – P. 183–188.
9. Николаенко, А. Н. Моделирование связи структуры почвы с содержанием органического вещества и обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  / А. Н. Николаенко // Вестник московского университета. Сер. 17. – Почвоведение. – 2020. – № 2. – С. 24–28.

## EVALUATION OF SPATIAL DIFFERENTIATION OF AGROCHEMICAL AND AGRONOMICAL PROPERTIES ON DEFLATIONARY SOILS

A. A. Bianco

## Summary

The article presents the results of a study of the spatial differentiation of agrochemical and agrophysical properties of deflation-hazardous soils of the Belarusian Polesie using a 1,4-hectare plot in the Kalinkovichi District of the Gomel Region as an example. A noticeable variability of soil properties was established on a small genetically homogeneous plot. The humus content is predominantly low, locally average – in the central part (points 6 and 7), with a minimum value of 1,21 % at point 11. The reaction of the environment is close to neutral and localized in the western part of the plot. The content of mobile phosphorus varies from very low to average values 51–145 mg/kg of soil, and mobile potassium – from 94 to 526 mg/kg of soil. The degree of base saturation is high (65,8–94,8 %), and the density is within the optimal values for sandy

soils (1,30–1,45 g/cm<sup>3</sup>). The proportion of the < 1,0 mm fraction is critically low (up to 13 % at only a few points).

Correlation analysis revealed a strong direct relationship between pH and V ( $R = 0,83$ ;  $RI \approx 0,69$ ). Ca content demonstrates moderate relationships with V and pH ( $R \approx 0,56$ – $0,57$ ). A strong negative relationship was found between the proportion of particles < 1,0 mm and density ( $R = -0,70$ ;  $RI = 0,52$ ), confirming the leading role of this fraction in soil resilience to deflation. These results highlight the need to monitor drained soils and consider spatial heterogeneity in reclamation and agricultural practices.

*Поступила 21.11.25*

# РЕФЕРАТЫ

## 1. ПОЧВЕННЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 631.45

**Азарёнок Т. Н., Матыченкова О. В., Дыдышко С. В., Воробей М. В.** Создание тематических картограмм для обеспечения оптимального использования почвенно-земельных ресурсов Беларуси на основе геостатистической оценки данных // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 7.

Применение геостатистической оценки служит методическим инструментом для создания тематических картограмм, которые являются наглядным средством для объективной оценки актуального состояния почвенно-земельных ресурсов республики и целей планирования их оптимального использования. С применением ГИС анализа и данных почвенно-агрохимических обследований, характеризующих агроэкологические условия произрастания сельскохозяйственных культур, созданы тематические картограммы для оптимального размещения теплолюбивых и засухоустойчивых культур (сорго, просо на зерно, донника и эспарцета) и отдельных бобовых культур (гороха посевного, вики и пелюшки) на основе комплексного учета их требовательности к почвенно-агроэкологическим условиям произрастания. Тематические картограммы создают научную основу для дифференцированного подхода в использовании почвенных ресурсов пахотных земель.

Впервые разработаны комплексные картограммы почвенно-агроклиматического потенциала размещения теплолюбивых культур (сои и подсолнечника) и почвенно-агроэкологического потенциала пахотных земель республики для выращивания отдельных бобовых культур (гороха, вики, пелюшки).

Картограмма 12. Рис. Библиогр. 15.

УДК 631.415:631.821.1

**Киндеев А. Л., Цырибко В. Б., Логачев И. А., Устинова А. М., Бенько А. А.** Изменение структуры почвенного покрова осушенных земель южной почвенно-экологической провинции Беларуси при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 22.

В статье приводятся результаты исследования структуры почвенного покрова осушенных земель на двух стационарных площадках мониторинга осушенных земель, показавшего значительное влияние интенсивности сельскохозяйственной деятельности на деградацию торфяных почв. Установлено, что на СП «Третья» при использовании земель под многолетние травы за тридцатилетний период произошла сработка торфа на 11,2 га (60,3 % площади). На СП «ПОСМЗиЛ» при интенсивном пахотном использовании территории происходит минерализация и сработка торфяного горизонта, что выражается

в снижении содержания органического вещества для торфяно-глеевых почв в 5 раз. Анализ морфометрических показателей структуры почвенного покрова показал увеличение коэффициента сложности и неоднородности на участке 2 с оптимального до допустимого (с 0,38 до 1,83 и с 0,86 до 3,55 соответственно). При использовании мультиспектральных снимков Sentinel-2 для картографирования почвенного покрова подтверждена взаимосвязь между органическим веществом и коэффициентом яркости ближнего инфракрасного канала, выражающаяся через степенную функцию с коэффициентом детерминации 0,59 и корреляционным отношением 0,77.

Табл. 3. Рис. 4. Библиогр. 16.

УДК 631.4:528.94

**Гуляй М. Е., Цырибко В. Б., Гутько Ф. С.** Комплекс автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв для возделывания сельскохозяйственных культур // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 31.

В статье представлен комплекс автоматизированного расчета радиологической и агрономической пригодности почв сельскохозяйственных земель для возделывания различных культур на территориях, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Комплекс разработан на языке Python 3 с использованием библиотеки ArcPy и реализован в виде пользовательского набора инструментов RadioAgroSuitability (19 инструментов) для ArcGIS Pro.

Инструменты позволяют в автоматизированном режиме создавать тематические картограммы пригодности, а также формировать таблицы экспликации площадей с точностью до 1 м<sup>2</sup>. Предусмотрен whitelist-фильтр для выбора анализируемых участков.

Апробация проведена на землях КСУП «Оборона» Добрушского района Гомельской области. Установлено, что основные ограничения возделывания связаны с агрономической непригодностью песчаных почв и повышенным содержанием  $^{90}\text{Sr}$ . Наиболее ограничено возделывание гороха (пригодны на пищевые и кормовые цели лишь 17,7 % пахотных земель), наименее – многолетних злаковых трав и озимой ржи (практически без ограничений). Значительные ограничения отмечены для озимой пшеницы (28,4 % непригодных земель), люпина (29,7 %) и люцерны (25,7 %).

Разработанный комплекс существенно ускоряет обработку данных, повышает точность и объективность оценки и может стать основой системы поддержки принятия решений при планировании севооборотов на радиоактивно загрязненных территориях.

Табл. 6. Рис. 5. Библиогр. 10.

УДК 631.47

**Цырибко В. Б., Устинова А. М., Логачев И. А., Юхновец А. В., Касьянчик С. А., Митькова А. А., Станилевич И. С., Карабец Н. А.** Современное

состояние почвенного покрова загрязненных радионуклидами пахотных земель Могилевской области // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 40.

В статье приведен анализ современного состояния почв загрязненных радионуклидами пахотных земель Могилевской области.

Проведенные исследования позволили установить, что по типовому составу в Могилевской области в составе загрязненной  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  пашни преобладают дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные почвы, по гранулометрическому составу – супесчаные, а по степени гидроморфизма – автоморфные. Анализ качественного состояния почв показал, что средневзвешенный балл бонитета почв пахотных земель, загрязненных радионуклидами, выше среднего по району только в Бобруйском, Климовичском, Костюковичском, Кричевском и Славгородском районах. Наименьший балл отмечен в Бельничском районе (42,8), а наибольший – в Кричевском (63,6).

Установлено, что средневзвешенные значения загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  пахотных земель в большинстве районов Могилевской области менее  $5,00 \text{ Ки/км}^2$ , а загрязненные  $^{90}\text{Sr}$  пахотные земли расположены в Быховском, Костюковичском, Краснопольском, Славгородском и Чериковском районах.

Учитывая структуру почвенного покрова загрязненных земель и уровень загрязнения цезием-137 и стронцием – 90, а также предельно допустимые плотности загрязнения радионуклидами для возделывания сельскохозяйственных культур, из изученных районов наиболее вероятно получение продукции с превышением содержания радионуклидов в продукции в Костюковичском, Чериковском и Славгородском районах.

Табл. 5. Библиогр. 9.

## 2. ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

УДК 631.8:633

**Лапа В. В., Пироговская Г. В., Хмелевский С. С., Сороко В. И.** Комплексные минеральные удобрения в технологии возделывания сельскохозяйственных культур // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 49.

Представлены технологические особенности применения новых форм комплексных минеральных удобрений под сахарную свеклу, лен-долгунец, озимый рапс, озимые и яровые зерновые культуры, сбалансированных по своему составу с учетом биологических особенностей этих культур. Определена перспективная потребность в комплексных минеральных удобрениях под сахарную свеклу, лен-долгунец, озимый рапс на период до 2030 г. В 2030 г. рекомендуемая потребность в комплексных минеральных удобрениях составляет 287 тыс. т ф. в., а всего за 2026–2030 гг. планируется их использование в растениеводческой отрасли сельского хозяйства в объеме 1018 тыс. т ф. в.

Табл. 2. Библиогр. 2.

УДК 631.442:633.14:631.559

**Серая Т. М., Богатырева Е. Н., Кирдун Т. М., Жабровская Н. Ю., Гутько Е. И.** Влияние системы удобрения и окультуренности почвы на урожайность и нормативный вынос элементов питания урожаем гибридной озимой ржи // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2 (75). – С. 56.

На дерново-подзолистых почвах проведены трехлетние испытания с гибридной озимой рожью. Урожайность зерна озимой ржи гибрид КВС Винетто за счет эффективного плодородия среднеокультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы в среднем за 3 года составила 39,4 ц/га, высокоокультуренной легкосуглинистой почвы была на 57 % выше – 62,0 ц/га.

Максимальная урожайность получена при органоминеральной системе удобрения: на среднеокультуренной почве – при внесении  $N_{70+30}P_{50}K_{90}$  на фоне заделки соломы с компенсирующей дозой азота (82,3 ц/га), на высокоокультуренной почве – при внесении  $N_{70+30+40}P_{25}K_{60}$  на фоне заделки соломы с компенсирующей дозой азота (96,4 ц/га).

Нормативный вынос с 1 т зерна гибридной озимой ржи и соответствующим количеством соломы на среднеокультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве составил: азота – 15,6 кг, фосфора – 6,3 кг, калия – 14,8 кг; на высокоокультуренной легкосуглинистой почве был выше и составил: азота – 18,3 кг/т, фосфора – 8,2 кг/т, калия – 16,8 кг/т.

Табл. 3. Рис. Библиогр. 13.

УДК 631.847.22

**Михайловская Н. А., Романенко С. С., Погирницкая Т. В., Барашенко Т. Б., Дюсова С. В., Новик А. Л.** Биодеградационный потенциал фосфатмобилизирующих ризобактерий *Pseudomonas* spp. по отношению к глифосату // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 66.

Проведена серия лабораторных *in vitro* экспериментов по культивированию ризобактерий *Pseudomonas* spp. (*Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15, *Pseudomonas* sp. P-42) в жидких средах с глифосатом как источником фосфора. Установлено, что исследуемые штаммы ризобактерий проявляют способность метаболизировать гербицид глифосат. Согласно полученным данным планарной хроматографии процесс катаболизма глифосата ризобактериями *Pseudomonas* spp осуществляется по саркозиновому пути без образования аминотетрагидрофосфоновой кислоты.

Деструктивная активность коллекционных штаммов *Pseudomonas* sp. P-6, *Pseudomonas* sp. P-7, *Pseudomonas* sp. P-11, *Pseudomonas* sp. P-15 и *Pseudomonas* sp. P-42, рассчитанная по накоплению неорганического фосфата (Pi) в культуральной жидкости, при концентрации глифосата 300 мг/л составила 49,9 %, 45,8 %, 55,6 %, 49,6 % и 65,6 %, при концентрации глифосата 500 мг/л – 43,1 %, 43,8 %, 48,4 %, 44,9 % и 50,1 % соответственно. Штаммы этих ризосферных бактерий могут рассматриваться в качестве деструкторов глифосата для биоремедиации загрязненных природных объектов.

Табл. 4. Рис. Библиогр. 26.



УДК 632.15:579.64

**Михайловская Н. А., Романенко С. С., Погирницкая Т. В., Барашенко Т. Б., Дюсова С. В., Новик А. Л.** Катаболизм глифосата у симбиотических ризобактерий *Rhizobium trifolii* // Почвоведение и агрохимия. – 20225. – № 2(75). – С. 76.

В серии лабораторных *in vitro* экспериментов по культивированию ризобактерий в жидких средах с глифосатом установлено, что штаммы *Rhizobium trifolii* (*Rh. trifolii* R-45, *Rh. trifolii* R-107 и *Rh. trifolii* R-63/3) проявляют С-Р-лиазную активность и разлагают глифосат с образованием безопасного метилглицина (саркозина).

Дана количественная оценка деструктивной активности штаммов симбиотических ризобактерий *Rhizobium trifolii*, которая при концентрации глифосата 300 мг/л составила 23,9 %, 26,7 %, 43,2 %, при концентрации 500 мг/л – 24,2 %, 24,8 %, 36,8 % соответственно. Способность ризосферных бактерий *Rhizobium trifolii* метаболизировать гербицид глифосат по экологически безопасному пути свидетельствует об их перспективности в качестве инокулянтов, в особенности в условиях интенсивного применения гербицида глифосат.

Табл. 4. Рис. Библиогр. 25.

УДК 631.82:633.358:631.445

**Рак М. В., Пукалова Е. Н., Кудласевич С. Г., Гук Л. Н., Гутько Е. И.** Эффективность применения цинкового удобрения при возделывании гороха посевного на различных уровнях обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы цинком // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 85.

В статье представлены результаты исследований по изучению наиболее эффективных доз цинкового удобрения в технологии возделывания гороха на дерново-подзолистой супесчаной почвы с различным уровнем содержания цинка. В технологии возделывания гороха на дерново-подзолистой супесчаной почве, низко- и среднеобеспеченной цинком некорневая подкормка гороха цинковым удобрением в дозе 0,12 кг д. в./га повышает урожайность зерна на 5,7 и 3,9 ц/га, увеличивает содержание белка на 1,6 и 1,2 % при рентабельности 177 и 138 % соответственно.

Табл. 5. Рис. Библиогр. 14.

УДК 631.8:633.11:631.445

**Подольяк А. Г., Дробышевская В. В.** Параметры перехода  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в многолетние бобово-злаковые травосмеси на торфяной почве в зависимости от доз внесения удобрений // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 93.

В статье рассматривается система применения удобрений на торфяной почве, способствующей максимальной продуктивности многолетних злаково-бобовых трав, а также зоотехническому качеству кормов и минимальному накоплению в них радионуклидов. Установлено, что при залужении злаково-бобовыми травами сенокосов на низинных торфяно-болотных почвах с низким содержанием

фосфора, калия и загрязненных радионуклидами, наиболее эффективно вносить минеральные удобрения в дозах: азотные – 60 кг/га д. в., фосфорные – 60–90 кг/га д. в., калийные – 180–240 кг д. в. и медные – 50 г/га д. в.

Табл. 3. Библиогр. 16.

УДК 631.8:631.416.9

**Шашко Ю. К., Жабровская Н. Ю.** Субстраты, используемые в современных технологиях защищенного грунта // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 103.

Библиогр. 102.

УДК 631.8:631.416.9

**Веремейчик Л. А., Цыганов А. Р.** Влияние микроэлементов на здоровье человека // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 118.

В данной статье оценивается накопление основных микроэлементов (Cu, Zn и В) в почве, экологические проблемы, связанные с воздействием микроэлементов на окружающую среду, отдельно проанализированы потенциально неблагоприятные эффекты воздействия микроэлементов на организм человека и их влияние на здоровье, рассматривается технология безопасного применения микроудобрений.

Библиогр. 15.

### 3. ТРУБИНА МОЛОДОГО УЧЕНОГО

УДК 631.44:631.459.3

**Бенько А. А.** Оценка пространственной дифференциации агрохимических и агрофизических свойств дефляционноопасных почв Белорусского Полесья // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 2(75). – С. 128.

В статье приведены результаты исследований пространственной дифференциации агрохимических и агрофизических свойств дефляционноопасных почв Белорусского Полесья на примере участка площадью 1,4 га в Калинковичском районе Гомельской области. Установлена заметная вариабельность свойств почв на незначительном по площади генетически однородном участке. Содержание гумуса преимущественно низкое, локально среднее – в центральной части (точки 6 и 7), с минимальным значением в точке 11 – 1,21 %. Реакция среды близка к нейтральной с локализацией на западной части участка. Содержание подвижного фосфора варьирует от очень низких до средних значений – 51–145 мг/кг почвы, подвижного калия – от 94 до 526 мг/кг почвы. Степень насыщенности основаниями высокая (65,8–94,8 %), плотность в пределах оптимальных значений для песчаных почв (1,30–1,45 г/см<sup>3</sup>). Доля фракции < 1,0 мм критично низкая (до 13 % только в отдельных точках).

Корреляционный анализ выявил сильную прямую связь между pH и V ( $R = 0,83$ ;  $RI \approx 0,69$ ). Количество Са демонстрирует умеренные связи с V и pH ( $R \approx 0,56-0,57$ ). Установлена сильная отрицательная связь между долей частиц  $< 1,0$  мм с плотностью ( $R = -0,70$ ;  $RI = 0,52$ ), что подтверждает ведущую роль данной фракции в устойчивости почв к дефляции. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости мониторинга осушенных почв и учета пространственной неоднородности при мелиоративных и агрохозяйственных мероприятиях.

Рис. 2. Табл. Библиогр. 9.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научный журнал «Почвоведение и агрохимия», согласно приказу ВАК Республики Беларусь от 24.02.2025 № 45 (с изменениями, внесенными приказами от 27.02.2025 № 48, от 06.05.2025 № 107, от 28.05.2025 № 118, от 27.06.2025 № 140, от 30.09.2025 № 189, от 17.10.2025 № 207, от 04.11.2025 № 228, от 27.11.2025 № 249), 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. Заголовки. 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