

УДК 631.8

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-90-109



### Ссылки для цитирования:

Баматов И.М., Васильева Н.А., Владимиров А.А., Васильев Т.А., Перевертин К.А. Влияние полимерной модификации комплексного удобрения на эффективность использования фосфора и калия озимой пшеницей на южном черноземе // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 90-109. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-90-109

### Cite this article as:

Bamatov I.M., Vasilyeva N.A. Vladimirov A.A. Vasiliev T.A., Perevertin K.A., Influence of polymer modification of complex fertilizer on the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat on the southern chernozem, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 113, pp. 90-109, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-90-109

### Благодарность:

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ № 22-16-00092.

### Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Science Foundation in the framework of the scientific project No. 22-16-00092.

## Влияние полимерной модификации комплексного удобрения на эффективность использования фосфора и калия озимой пшеницей на южном черноземе

© 2022 г. И. М. Баматов<sup>1</sup>, Н. А. Васильева<sup>1</sup>, А. А. Владимиров<sup>1</sup>,  
Т. А. Васильев<sup>1\*</sup>, К. А. Перевертин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

\*<https://orcid.org/0000-0003-1041-4402>, e-mail: [tarasvasiliev44@gmail.com](mailto:tarasvasiliev44@gmail.com).

<sup>2</sup>ФБГУН “Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова”,  
Россия, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33.

Поступила в редакцию 12.10.2022, после доработки 01.12.2022,  
принята к публикации 27.12.2022

**Резюме:** В современных условиях беспрецедентных вызовов в природопользовании, в том числе технологической деградации систем применения удобрений, альтернативой может стать развитие оригинальных форм удобрений пролонгированного действия. Несмотря на значительный прогресс в адаптации прогрессивных систем агрохимических воздействий, применение традиционных форм минеральных удобрений не позволяет использовать весь потенциал вносимых элементов питания, так как процессы неполной денитрификации, иммобилизация и выщелачивание (вымывание) основных макроэлементов (NPK), наряду с действием уреазы, приводят к непроизводительным потерям питательных веществ в почве. Кроме экономических потерь, включая затраты на транспортировку, хранение и внесение традиционных препаративных форм удобрений, имеют место негативные экологические последствия – эвтрофикация водоемов, эмиссия парниковых газов. Исследования проводились в 2022 г. в производственных условиях в Курском районе Ставропольского края в хозяйстве ООО “СтавАгроКом” на черноземе южном карбонатном. В качестве модификатора минеральных удобрений использовался один из наиболее распространенных синтетических полимеров – поливиниловый спирт (ПВС) Норма расхода полимера составляла – 3, 5 и 7 кг на 1 тонну удобрения. Рост урожая положительно коррелировал с дозой полимера в удобрении. Анализ почвенных свойств проведен методом главных компонент. Полученная кластеризация в координатах первых двух компонент (в сумме объясняют 65% вариабельности данных) показывает значимые различия в свойствах почвы под разными вариантами опыта. Предложен дифференциальный показатель – добавочная эффективность использования питательных элементов (Е). Она оценивалась по прибавке урожая относительно нулевой дозы полимера на единицу снижения концентрации данного элемента в почве согласно предложенной формуле. Показано, что использование полимера в модифицированном удобрении дает статистически значимое увеличение эффективности использования фосфора и калия озимой пшеницей.

**Ключевые слова:** южные черноземы, минеральные удобрения пролонгированного действия, биополимеры, метод главных компонент.

## **Influence of polymer modification of complex fertilizer on the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat on the southern chernozem**

© 2022 I. M. Bamatov<sup>1</sup>, N. A. Vasilyeva<sup>1</sup>, A. A. Vladimirov<sup>1</sup>,  
T. A. Vasiliev<sup>1\*</sup>, K. A. Perevertin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\*<https://orcid.org/0000-0003-1041-4402>, e-mail: [tarasvasiliev44@gmail.com](mailto:tarasvasiliev44@gmail.com).*

<sup>2</sup>*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution  
of the Russian Academy of Sciences,  
33, Leninsky Prospekt, Moscow 119071, Russian Federation.  
Received 12.10.2022, Revised 01.12.2022, Accepted 27.12.2022*

**Abstract:** In modern conditions of unprecedented challenges, an alternative to the technological degradation of fertilizer application systems can be the development of original forms of long-acting fertilizers. Despite significant progress in the adaptation of progressive systems of agrochemical impacts, the use of traditional forms of mineral fertilizers does not allow using the full potential of the introduced nutrients, since the processes of incomplete denitrification, immobilization and leaching (leaching) of the main macronutrients (NPK), along with the action of urease, lead to unproductive loss of nutrients in the soil. In addition to economic losses, there are negative environmental consequences – eutrophication of water bodies, emission of greenhouse gases. The studies were carried out in 2022 under production conditions in the Kursk district of the Stavropol Territory on the farm of “StavAgroCom” on southern carbonate chernozem. As a modifier of mineral fertilizers, one of the most common synthetic polymers, polyvinyl alcohol (PVA), was used. The polymer consumption rate was 3, 5 and 7 kg per 1 ton of fertilizer. Yield growth was positively correlated with the dose of polymer in the fertilizer. The analysis of soil properties was carried out by the method of principal components. The resulting clustering in the coordinates of the first two components (in total they explain 65% of the data variation) shows significant differences in soil properties under different experimental options. To assess the efficiency of the use of nutrients depending on the dose of the polymer, a differential indicator was proposed – the additional efficiency of the use of nutrients (E). It was estimated from the increase in yield relative to the zero dose of the polymer per unit reduction in the concentration of this element in the soil according to the proposed formula. It is shown that the polymer use in fertilizer gives a statistically significant increase in the efficiency of phosphorus and potassium use by winter wheat.

**Keywords:** southern chernozems, slow-release fertilizers, biopolymers, principal component method.

## ВВЕДЕНИЕ

Максимальное удовлетворение потребностей культурных растений в питательных элементах в течение вегетации при минимальном причинении вреда природной среде от использования минеральных удобрений при одновременном экономическом эффекте их действия является первоочередной задачей системы удобрения полевых культур ([Иванов, 2022](#); [Kareem et al., 2021](#)).

Озимая пшеница в аграрном секторе экономики России без всякого преувеличения является основной, базовой культурой среди стратегических сельскохозяйственных культур. Особенности ее интенсивного возделывания предполагают поэтапное внесение (подкормки) минеральными удобрениями (в оптимуме до трех раз) в течение вегетации согласно фенофазам. Сокращение числа подкормок с однократным внесением удобрения представляется крайне актуальным, как с позиций экономической рентабельности, так и экологической оправданности.

В результате усилившегося диспаритета цен в настоящее время особенно актуальными являются проблемы снижения применяемых доз минеральных удобрений, выбора наилучших форм удобрений и их сочетаний, сроков и способов их внесения ([Иванов, 2022](#)). Наиболее перспективным в этой связи представляется совместное использование минеральных удобрений и биоорганических соединений полимерной природы, которые оказывают определенное влияние на свойства почвы, процессы высвобождения элементов из удобрения и поглощения их растениями.

Вследствие обострения беспрецедентных вызовов в природопользовании, наблюдаемого в настоящее время, академиком А.Л. Ивановым в 2019 г. были сформулированы актуальные задачи в Крупном Научном Проекте (КНП) ([Иванов, 2022](#)), включая развитие подходов для эффективного использования удобрений. Природно-климатические вызовы отошли на второй план, уступив место грандиозным социально-политическим и тесно связанным с ними глобальным экономическим вызовам. Однако субъективно навязываемая системным санкционным давлением технологическая деградация в условиях дефицита ресурсов отнюдь не означает, что российский научно-производственный аграрный потенциал

не самодостаточен. Напротив, актуализируются цели: не “выживания”, а “развития” отечественных систем природопользования ([Перевертин и др., 2022](#)).

Несмотря на значительный прогресс в адаптации прогрессивных систем агрохимических воздействий, применение традиционных физических форм минеральных удобрений не позволяет использовать весь потенциал вносимых элементов питания, так как процессы неполной денитрификации, иммобилизация и выщелачивание (вымывание) основных макроэлементов (NPK), наряду с действием уреазы, приводят к непроизводительным потерям питательных веществ в почве. Кроме экономических потерь имеют место негативные экологические последствия – эвтрофикация водоемов, эмиссия парниковых газов. Другими словами, до трети массы действующего вещества используемых форм минеральных удобрений попросту “не доходит до потребителя” – сельхозкультуры ([Lawrencja, 2021](#)). Они же обременяют энергоемкость мероприятий по транспортировке, хранению и внесению традиционных препаративных форм.

От этих недостатков свободны системы применения удобрений пролонгированного действия ([Мухина и др., 2021](#)). Имеющийся интеллектуальный ([Занилов и др., 2017](#)) и технологический задел позволяют организовать производство удобрений пролонгированного действия, не уступающих зарубежным аналогам ([Бамаатов, 2018](#); [Бамаатов и др., 2022](#)). Наиболее перспективным представляется совместное использование минеральных удобрений и биоорганических соединений полимерной природы, которые оказывают определенное влияние на свойства почвы, процессы высвобождения элементов из удобрения и поглощения их растениями. Добавление к минеральным удобрениям органических полимеров, путем их поверхностного нанесения на гранулы, позволяет снизить производственные затраты на использование удобрений, получить высокие и качественные урожаи, мобилизовать процессы трансформации соединений, содержащих, например, азот и фосфор, нивелировать процессы, связанные с деградацией плодородия ([Косолопова и др., 2017](#); [Мухина и др., 2021](#); [Налиухин и др., 2017](#); [Уткин и др., 2021](#)).

В настоящей работе в качестве модификатора минеральных

удобрений использовался один из наиболее распространенных синтетических полимеров – поливиниловый спирт (ПВС). В отличие от часто используемого природного биополимера – крахмала, поливиниловый спирт имеет свои преимущества. Он нетоксичен, легко растворяется в воде. Рабочей гипотезой механизма действия полимера на удобрение является замедление растворения питательных элементов из минерального удобрения, что может повышать эффективность его применения.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в 2022 г. в производственных условиях в Курском районе Ставропольского края в хозяйстве ООО “СтавАгроКом” на черноземе южном карбонатном. С целью определения эффекта модификации минеральных удобрений полимерным веществом в виде поливинилового спирта (ПВС) был проведен полевой эксперимент на посеве озимой пшеницы сорта “Княгиня Ольга”. Площадь делянки составляла 10 000 м<sup>2</sup>. Повторность – 3-кратная. Подкормку проводили комплексным минеральным удобрением – азофоска (NPK – 16 : 16 : 16) из расчета 200 кг/га. Дата внесения модифицированного удобрения – 12 марта 2022 г. Полимерная модификация минерального удобрения азофоска 16 : 16 : 16 проводилась в лабораторных условиях следующим образом: в стакане в объемном соотношении 1 : 1 растворяли минеральное удобрение в воде, температуру раствора поднимали до 50 °С, перемешивая раствор магнитной мешалкой. Параллельно во втором стакане растворяли поливиниловый спирт (биоразлагаемый синтетический полимер) 1 : 5 в воде, при температуре 70 °С и перемешивали магнитной мешалкой (600 об./сек.). Перемешивание продолжали до тех пор, пока полимер полностью не растворился и не образовалась желеобразная суспензия. Растворенное удобрение из первой емкости объединяли с растворенным полимером и к полученному раствору добавляли лимонную кислоту в соотношении 1 : 10 к массе полимера. После добавления лимонной кислоты увеличивали скорость магнитной мешалки до 900 об./сек. Температуру химического раствора поднимали до 80 °С и продолжали перемешивать с помощью магнитной мешалки до получения однородной суспензии, затем остужали продукт

до комнатной температуры в течение 24 часов и далее помещали в холодильную камеру на 24 часа. После этого охлажденный продукт подвергали вакуумному фильтрованию. Далее высушенный материал прессовали таблеточным прессом в таблеточную форму.

Норма расхода полимера составляла – 3, 5 и 7 кг на 1 тонну удобрения (табл. 1).

**Таблица 1.** Схема эксперимента

**Table 1.** Experiment scheme

<b>Варианты</b>
<b>Дата отбора образцов – 13.06.2022</b>
Вариант 1 – контроль
Вариант 2 – азофоска
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3кг/т
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т
<b>Дата отбора образцов – 16.07.2022</b>
Вариант 1 – контроль
Вариант 2 – азофоска
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3кг/т
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т

Отдельно отметим, что методика модификации удобрения в лабораторных условиях изложена в рамках данной работы для демонстрации технологической воспроизводимости при фундаментальных исследованиях почвенных свойств. Производственное внедрение вплоть до коммерческих объемов возможно на основе разработанного нами оригинального реактора (Патент RU 2 667 453 (13) С1) ([Баматов И.М., 2018](#)). На основе разработанного Программного обеспечения (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021666912 от 12 октября 2021 г.) ([Баматов, Баматов, 2021](#)), где микропроцессор может управлять режимами реактора для достижения программируемых режимов пролонгации модифицируемых форм минеральных

удобрений, подана новая заявка на патентную защиту (№ 2021128628/10(060678 от 30.09.2021. Заявитель: ФИЦ ФБГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева). Получаемые модификации конкурентноспособны по сравнению с зарубежными импортозамещаемыми аналогами ([Бамагов и др., 2022](#); [Bamatov et al., 2019](#); [Bamatov et al., 2020](#); [Перевертин и др., 2022b](#)). Однако еще раз заметим, что в рамках данной работы преследовалась фундаментальная цель изучения почвенных свойств при внесении удобрений пролонгированного действия – макроэлементов, во многом обеспечивающих качество урожайной продукции, – фосфора и калия.

Перед проведением подкормки (12.03.2022) отбирались почвенные образцы для сравнения влияния азофоски и полимера на агрохимические показатели почвы.

Программой исследования предусматривался отбор почвенных образцов в два календарных срока (13.06.2022 и 16.07.2022), которые соответствовали молочно-восковой и полной спелости зерна, в которую проводили уборку.

Исследованная почва, чернозем южный карбонатный, в среднем на всех делянках характеризовалась содержанием гумуса  $1.95 \pm 0.26\%$ , рН водной вытяжки  $8.4 \pm 0.1$ , содержанием NaCl  $53 \pm 5$  мг/л. Отобранные образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали на мельнице. Анализы проводились согласно принятым в агрохимической практике методикам: гумус почвы (по Тюрину в модификации ЦИНАО); подвижные формы фосфора ( $P_2O_5$ ) – ГОСТ 20205-91 (по Мачигину); подвижные формы калия ( $K_2O$ ) – ГОСТ 20205-91 (по Мачигину); обменные кальций (Ca) и магний (Mg) – трилометрический метод; обменный натрий (Na) – ГОСТ 26950-86; ионы натрия и хлора (NaCl) – кондуктометрический метод; рН водной вытяжки ( $pH_{H_2O}$ ) – ГОСТ 26423-85; удельная электропроводимость почвы ( $\sigma$ ) – ГОСТ 26423-85.

Для кластеризации почвенных свойств применяли метод главных компонент. Для оценки статистической значимости отличий результатов между вариантами полевых опытов с различной дозой полимера использовали два статистических теста: параметрический критерий Стьюдента для двух независимых выборок с



предположением о нормальности распределений измеряемых величин; и непараметрический критерий Уилкоксона (Манна–Уитни) для независимых выборок с предположением о том, что вид исходных распределений неизвестен. Значимыми считали отличия при выполнении обоих критериев на уровне доверительной вероятности 95%. Статистическую обработку и визуализацию данных проводили на специализированном языке программирования R.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики полученного урожая в разных вариантах опыта (табл. 2.) показывают, что на контрольном участке и в варианте с применением минерального удобрения без добавления полимера было собрано одинаковое минимальное количество урожая – 32.8 ц/га. На фоне повышенной по калию и высокой по фосфору обеспеченности почвы прироста урожая от внесения минерального удобрения (200 кг/га) не наблюдалось, т. е. внесение азофоски не было эффективным. В вариантах опыта с добавлением в азофоску полимера урожай был тем выше, чем выше доза полимера. Также значимо повышалось качество клейковины (индекс ИДК). Содержание белка и клетчатки имели тенденцию к снижению с ростом урожая.

Объяснением для роста урожая с увеличением дозы полимера в удобрении может быть увеличение эффективности использования питательных элементов растением за счет их замедленного высвобождения, согласно исходному предположению о действии полимера на растворимость удобрения в почве. Для проверки данной гипотезы был проведен анализ образцов почвы. Измеренные почвенные показатели представлены в таблице 3.

Оценка общего варьирования каждого почвенного свойства (между датами измерения и повторными измерениями) показала, что стандартное отклонение от среднего значения для обменного кальция, электропроводности и подвижного калия составляло менее 10%. Варьирование в содержании подвижного фосфора до 25% и наибольшие изменения наблюдались для обменного магния (до 75%) и обменного натрия (до 100%).

**Таблица 2.** Характеристики урожая озимой пшеницы в вариантах опыта (среднее значение и стандартное отклонение для 3 аналитических повторностей)

**Table 2.** Yield characteristics of winter wheat in experimental variants (mean value and standard deviation for 3 analytical replicates)

Вариант опыта	Белок, %	Клетчатка, %	ИДК	Урожай, кг/га
Контроль	14.4 ± 0.1	25.2 ± 0.5	59 ± 2	3 280
Азофоска	15.2 ± 0.3	28.4 ± 0.6	60 ± 2	3 280
Азофоска + ПЗ	15.2 ± 0.2	27.7 ± 0.8	53 ± 2	3 480
Азофоска + П5	14.3 ± 0.0	26.0 ± 0.2	57 ± 1	3 560
Азофоска + П7	14.4 ± 0.1	27.3 ± 0.1	49 ± 1	3 980

Изменения агрохимических показателей почвы под действием азофоски и полимера не имели прямой зависимости ни от времени, ни от дозы полимера. Например, в контрольном варианте опыта (без внесения удобрения) наблюдалось снижение подвижных форм  $K_2O$  и  $P_2O_5$  в почве в первом периоде наблюдения (март–июнь) и, наоборот, увеличение запаса этих питательных элементов во втором периоде наблюдения (июнь–июль).

Наблюдаемые разнонаправленные колебания в свойствах почвы и ее элементном составе могут объясняться сложными взаимосвязями процессов в почве. Так, усиливающиеся биосинтетические процессы роста и развития растений озимой пшеницы могут приводить к пополнению подвижных форм питательных элементов из запасов “валовых” форм этих элементов за счет действия экссудатов корней ([Мухина и др., 2021](#)). Использование азофоски может усиливать минерализацию гумусовых соединений чернозема, вызывая процесс кислотного разложения под действием присутствующих в составе азофоски сильных минеральных кислот – азотной, фосфорной и серной. В то же время полимер, покрывающий гранулы удобрения, растворяясь со временем, может нелинейно терять свой эффект на высвобождение в почвенный раствор минеральных кислот удобрения.

**Таблица 3.** Агрохимические показатели южного чернозема (средние арифметические значения и стандартные отклонения для 3 аналитических повторностей измерения)

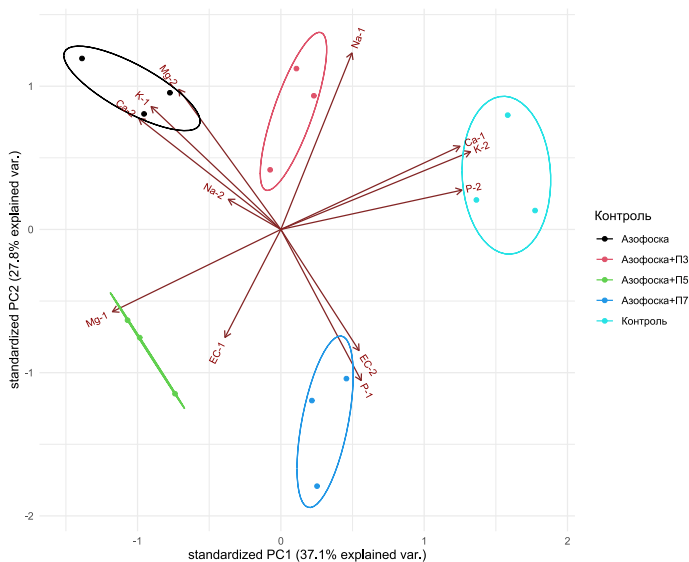
**Table 3.** Agrochemical indicators of the southern chernozem (arithmetic means and standard deviations for 3 analytical measurement repetitions)

Варианты	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	Na	σ
	мг/кг		мг-экв/100 г почвы		ммоль/100 г почвы	мСм/м
<b>Дата отбора образцов – 22.03.2022</b>						
До внесения азофоски и ПВС	18.5 ± 2.0	329 ± 4	6.7 ± 0.3	0.2 ± 0.1	0.08 ± 0.02	0.107 ± 0.003
<b>Дата отбора образцов – 13.06.2022</b>						
Вариант 1 – контроль	16.5 ± 1.7	273 ± 8	7.0 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.11 ± 0.02	0.082 ± 0.056
Вариант 2 – азофоска	12.8 ± 1.5	303 ± 6	6.3 ± 0.1	2.0 ± 0.2	0.11 ± 0.01	0.102 ± 0.005
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3 кг/т	12.8 ± 1.5	288 ± 13	6.7 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.09 ± 0.01	0.097 ± 0.006
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т	15.8 ± 1.5	295 ± 9	6.3 ± 0.1	3.0 ± 1.0	0.02 ± 0.02	0.107 ± 0.001
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т	16.5 ± 1.0	248 ± 6	6.4 ± 0.2	1.4 ± 0.2	0.04 ± 0.01	0.124 ± 0.006

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 continued**

Варианты	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	Na	σ
	мг/кг		мг-экв/100 г почвы		ммоль/100 г почвы	мСм/м
<b>Дата отбора образцов – 16.07.2022</b>						
Вариант 1 – контроль	27.0 ± 1.0	344 ± 11	6.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.16 ± 0.02	0.105 ± 0.008
Вариант 2 – азофоска	11.5 ± 1.0	282 ± 8	6.3 ± 0.2	3.8 ± 0.2	0.14 ± 0.02	0.100 ± 0.004
Вариант 3 – азофоска + ПВС 3 кг/т	15.5 ± 1.0	303 ± 6	6.0 ± 0.1	2.0 ± 0.2	0.62 ± 0.05	0.098 ± 0.007
Вариант 4 – азофоска + ПВС 5 кг/т	13.8 ± 1.2	251 ± 10	6.1 ± 0.1	0.8 ± 0.2	0.48 ± 0.04	0.102 ± 0.002
Вариант 5 – азофоска + ПВС 7 кг/т	13.5 ± 1.7	293 ± 6	5.9 ± 0.1	1.2 ± 0.2	0.12 ± 0.02	0.109 ± 0.001

Таким образом, изученные почвенные свойства по отдельности, в отличие от урожая и его характеристик, ввиду сложных взаимосвязей, очевидно, не коррелируют с дозой полимера в удобрении. Чтобы оценить общую картину изменения почвенных свойств, на рисунке 1 приведен результат анализа почвенных свойств методом главных компонент. Полученная кластеризация в координатах первых двух компонент (в сумме объясняют 65% варьирования данных) показывает значимые различия в свойствах почвы между разными вариантами опыта. Однако из этой группировки нельзя напрямую сделать выводы о причинах роста урожая с повышением дозы.



**Рис. 1.** Группировка вариантов опыта в координатах двух первых главных компонент. Индекс 1 – результаты первого периода исследования, 2 – второго периода.

**Fig. 1.** Grouping of experience options in the coordinates of the first two principal components. Index 1 – the results of the first period of the study, 2 – the second period.

Известно, что применение удобрений и особенно различных агроメリорантов и полимерных соединений может приводить к увеличению кислотности почв.

Как было показано выше, рост урожая положительно коррелирует с дозой полимера в удобрении. Предполагаемой причиной может быть увеличение эффективности использования питательных элементов в присутствии полимера. Баланс подвижных форм питательных элементов в почве к концу сезона вегетации связан как с их поглощением растениями, так и с переходом между подвижной и неподвижной формами, и с их выносом за пределы пахотного горизонта, из которого отбирали образцы почвы для анализа.

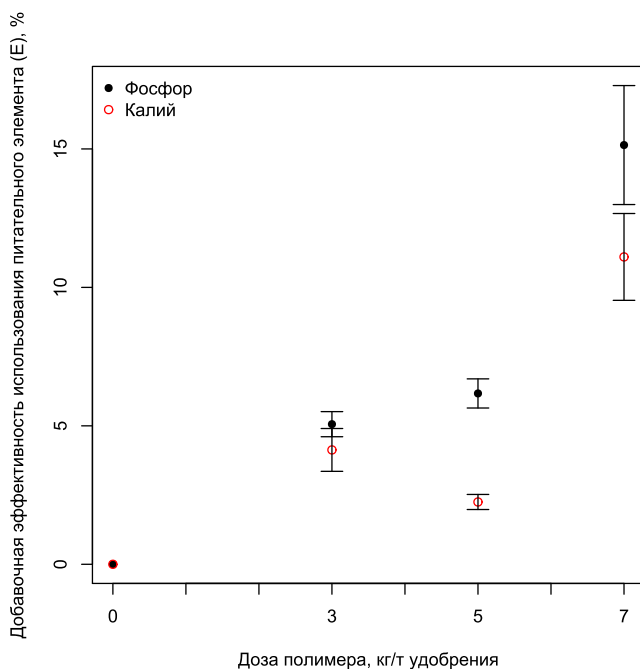
Оценить эти компоненты по отдельности не представляется возможным в данном опыте, тем не менее, чтобы проверить гипотезу об увеличении эффективности использования питательных элементов с дозой полимера, в данном опыте был рассчитан дифференциальный показатель – добавочная эффективность использования питательных элементов (**E**). Добавочная эффективность оценивалась по прибавке урожая относительно нулевой дозы полимера на единицу снижения концентрации данного элемента в почве согласно формуле (1):

$$E_i = \frac{k_1(Y_i - Y_0)}{k_2(C_i^0 - C_i^2) + a_i}, \quad (1)$$

где  $i \in \{0, 3, 5, 7\}$  – вариант опыта и соответствует дозе полимера в удобрении;  $Y_i$  – урожай в  $i$ -ом варианте опыта;  $C_i^0$  – начальная концентрация питательного элемента в  $i$ -ом варианте опыта,  $C_i^2$  – конечная концентрация питательного элемента. Внесение питательного элемента с удобрением учитывается коэффициентом  $a_i$ , в данном случае во всех вариантах с удобрением вносили по 32 кг/га азота, фосфора и калия. Коэффициент  $k_1$  – вынос элемента с урожаем, выраженный в кг элемента/кг урожая (при расчетах взяты значения 0.011 для фосфора и 0.027 для калия). Коэффициент  $k_2 = 3\,900$  т/га применяется для приведения величины **E** в безразмерную (кг выноса с урожаем/кг расхода питательного элемента), а также для возможности его представления в процентах,

предполагая, что плотность пахотного чернозема в слое 0.3 м равна 1.3 кг/м<sup>3</sup>.

Расчет добавочной эффективности использования удобрений от дозы полимера производили для двух питательных элементов – фосфора и калия, поскольку именно эти два элемента могут испытывать непосредственное влияние добавляемого полимера на их растворение (рис. 2).



**Рис. 2.** Добавочная эффективность использования питательных элементов (фосфора и калия), выраженная в процентах выноса питательного элемента с прибавкой урожая от его расхода в почве к концу вегетации. Расчет эффективности показан со стандартным отклонением для 3 аналитических повторностей исходных измерений.

**Fig. 2.** Additional efficiency of use of nutrients (phosphorus and potassium), expressed as a percentage of the removal of a nutrient with an increase in yield from its consumption in the soil by the end of the growing season. Efficiency calculation shown with standard deviation for 3 analytical replicates of the original measurements.

Показано, что фактор использования полимера в удобрении дает статистически значимое увеличение эффективности использования фосфора и калия озимой пшеницей (для фосфора по критериям Уилкоксона  $p = 0.009$ , Стьюдента  $p = 0.0006$ , для калия, соответственно,  $p = 0.009$  и  $p = 0.003$ ). При этом для обоих элементов показано, что доза 7 кг/т минерального удобрения имеет максимальный эффект, который статистически значимо по обоим критериям (для фосфора  $p = 0.027$  и  $p = 0.012$ , для калия  $p = 0.026$  и  $p = 0.004$ ) отличается от эффектов доз 3 и 5 кг/т.

## ВЫВОДЫ

В условиях беспрецедентных вызовов, обозначенных академиком РАН А.Л. Ивановым, актуализируются цели: не “выживание”, а “развитие” отечественных систем природопользования, в частности, внедрение прогрессивных систем применения удобрений пролонгированного действия.

Для производства препаративных форм, не уступающих зарубежным аналогам, имеется интеллектуальный и технологический задел, однако требуются фундаментальные исследования изменения почвенных свойств.

Внедрение органического компонента в состав минерального удобрения положительно коррелирует с продуктивностью озимой пшеницы. Почвенные свойства в поставленном опыте изменялись таким образом, что достоверно кластеризовались согласно вариантам опыта.

Добавление полимера в минеральное удобрение дает значимую добавочную эффективность (предложена оригинальная формула) использования макроэлементов (фосфора и калия), что согласуется с предполагаемым механизмом действия полимера на удобрение – замедление высвобождения питательных элементов в почве. Таким образом, включение полимерных соединений, в частности ПВС, в систему минерального питания растений, а также производство соответствующих смесей удобрений на высоком технологическом уровне отвечает требованиям современного сельскохозяйственного производства в условиях импортозамещения.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баматов И.М.* Реактор для непрерывного перемешивания жидких растворов: Описание изобретения к патенту RU 2 667 453 (13) С1, 19.09.2018 Бюл. № 26. 5 с.
2. *Баматов И.М., Баматов Д.М.* Программное обеспечение системы управления температурными режимами многостадийного реактора для непрерывного смешивания жидкостей: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021666912 от 12 октября 2021 г.
3. *Баматов И.М., Перевертин К.А.* Использование оригинальной технологии получения НРК-удобрений пролонгированного действия (с биополимерным покрытием гранул вносимого вещества) и его сравнение с зарубежным аналогом // Материалы конф. “Современные агротехнологии в садоводстве и питомниководстве”. М.: ФГБНУ ФНЦ Садоводства, 2022 г.
4. *Ефимов В.Н., Донских И.Н., Царенко В.П.* Система удобрения: учебник для вузов. М.: Изд-во КолосС, 2002. 320 с.
5. *Занилов А.Х., Шилова Е.П.* Инновационные приемы повышения эффективности минерального питания растений. М.: ФГБНУ Росинформагротех, 2017. 132 с.
6. *Иванов А.Л.* (ред.) Актуальные научные задачи стратегии адаптации потенциала землепользования России в современных условиях беспрецедентных вызовов (экономический кризис, изменения климата, кризис глобальных тенденций природопользования) / Научный отчет по проекту. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2022. 415 с.
7. *Косолапова А. И., Возжаев В.И., Лейних П.А.* Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от применения минеральных удобрений // Агрономия. Пермский аграрный вестник. 2017. № 3 (19). С. 76–80.
8. *Мухина М.Т., Боровик Р.А., Коршунов А.А.* Удобрения пролонгированного действия: основные этапы и направления развития // Плодородие. 2021. № 4. С. 77–82. DOI: [10.25680/S19948603.2021.121.23](https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.23).
9. *Налиухин А.Н., Завалин А.А., Силуянова О.В., Белозеров Д.А.* Влияние биоудобрений и известкования на продуктивность вико-овсяной смеси и изменение микробоценоза дерново-подзолистой почвы // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 6. С. 21–26.
10. *Перевертин К.А., Баматов И.М.* Адаптация землепользования России в современных условиях беспрецедентных вызовов (пример удобрений пролонгированного действия) // Доклад на Международной научно-практической конференции посвященной 110-летию

Длительного полевого опыта РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, М., 2022а.

11. *Перевертин К.А., Баматов И.М.* Актуальность использования минеральных удобрений пролонгированного действия (экологические аспекты) // Сборник трудов V Международной научно-практической конференции ICER – 2022 “Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания”. Брест, 2022б. С. 210–216.

12. *Уткин А.А.* Химия минеральных удобрений. Иваново: ФГБОУ ВО ИГСХА им. акад. Д.К. Беляева, 2021. 91 с.

13. *Bamatov I.M., Sapayev Kh.Kh., Rumyantsev E.V.* Coating of npk fertiliser with astratch-based biodegradable polymer by using a v-star reactor // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 816. P. 318–322.

14. *Bamatov I.M., Rumyantsev E.V., Arsanov M.M.* The influence of biopolymer coated fertilizer on the agrochemical parameters of the soil // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 869. P. 315–320.

15. *Kareem S.A., Dere I., Gungula D.T., Andrew F.P., Saddiq A.M., Adebayo E.F., Tame V.T., Kefas H.M., Joseph J., Patrick D.O.* Synthesis and Characterization of Slow-Release Fertilizer Hydrogel Based on Hydroxy Propyl Methyl Cellulose, Polyvinyl Alcohol, Glycerol and Blended Paper // Gels. 2021. Vol. 7. No. 262. P. 1–16. DOI: [10.3390/gels7040262](https://doi.org/10.3390/gels7040262).

16. *Lawrencia D., Wong S.K., Low D.Y.S., Goh B.H., Goh J.K., Ruktanonchai U.R., Soottitantawat A., Lee L.H., Tang S.Y.* Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release // Plants. 2021. Vol. 10. No. 238. P. 1–25. DOI: [10.3390/plants10020238](https://doi.org/10.3390/plants10020238).

## REFERENCES

1. *Bamatov I.M., Reaktor dlya nepreryvnogo peremeshivaniya zhidkikh rastvorov* (Reactor for continuous mixing of liquid solutions): description of the invention to the patent RU 2 667 453 (13) S1, 19.09.2018 Byul. No. 26, 5 p.

2. *Bamatov I.M., Bamatov D.M., Programmnoe obespechenie sistemy upravleniya temperaturnymi rezhimami mnogostadijnogo reaktora dlja nepreryvnogo smeshivaniya zhidkostej: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM* (Software application for the temperature control system of a multi-stage reactor for continuous mixing of liquids: Certificate of state registration of computer programs), No. 2021666912, 12.10. 2021.

3. *Bamatov I.M., Perevertin K.A., Ispol'zovanie original'noi tekhnologii polucheniya NPK-udobrenii prolongirovannogo deistviya (s biopolimernym*

*pokrytiem granul vnosimogo veshchestva) i ego sravnenie s zarubezhnym analogom* (The use of the original technology for obtaining NPK-fertilizers of prolonged action (with a biopolymer coating of the granules of the applied substance) and its comparison with a foreign analogue), Proc. Conference “Sovremennye agrotekhnologii v sadovodstve i pitomnikovodstve” (“Modern agrotechnologies in horticulture and nursery production”), Moscow: FGBNU FNTs Sadovodstva, 2022.

4. Efimov V.N., Donskikh I.N., Tsarenko V.P., *Sistema udobreniya* (Fertilizer system). Moscow: Izd-vo KolosS, 2002, 320 p.

5. Zanirov A.Kh., Shilova E.P., *Innovatsionnye priemy povysheniya effektivnosti mineral'nogo pitaniya rastenii* (Innovative methods for increasing the efficiency of plant mineral nutrition), Moscow: FGBNU Rosinformagrotekh, 2017, 132 p.

6. Ivanov A.L. (Ed.), *Aktual'nye nauchnye zadachi strategii adaptatsii potentsiala zemlepol'zovaniya Rossii v sovremennykh usloviyakh bespretsedentnykh vyzovov (ekonomicheskii krizis, izmeneniya klimata, krizis global'nykh tendentsii prirodopol'zovaniya)* (Actual scientific tasks of the strategy for adapting the land use potential of Russia in the current conditions of unprecedented challenges (economic crisis, climate change, crisis of global trends in nature management)), Scientific report, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2022, 415 p.

7. Kosolapova A.I., Vozzhaev V.I., Leinikh P.A., *Urozhainost' i kachestvo zerna yarovoi pshenitsy v zavisimosti ot primeneniya mineral'nykh udobrenii* (Yield and grain quality of spring wheat depending on the use of mineral fertilizers), *Agronomiya. Permskii agrarnyi vestnik*, 2017, No. 3 (19), pp. 76–80.

8. Mukhina M.T., Borovik R.A., Korshunov A.A., *Udobreniya prolongirovannogo deistviya: osnovnye etapy i napravleniya razvitiya* (Slow-release fertilizers: main stages and directions of development), *Plodorodie*, 2021, No. 4, pp. 77–82, DOI: [10.25680/S19948603.2021.121.23](https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.23).

9. Naliukhin A.N., Zavalin A.A., Siluyanova O.V., Belozarov D.A., *Vliyanie bioudobrenii i izvestkovaniya na produktivnost' viko-ovsyanoi smesi i izmenenie mikrobotsenoza dernovo-podzolistoi pochvy* (The effect of biofertilizers and liming on the productivity of vetch-oat mixture and changes in the microbial community of soddy-podzolic soil), *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*, 2017, No. 6, pp. 21–26.

10. Perevertin K.A., Bamatov I.M., *Adaptatsiya zemlepol'zovaniya Rossii v sovremennykh usloviyakh bespretsedentnykh vyzovov (primer udobrenii prolongirovannogo deistviya)* (Adaptation of land use in Russia in the current conditions of unprecedented challenges (example of slow-release fertilizers), Proc. Intern. Scien. and Pract. Conf. to the 110<sup>th</sup> anniversary of the Long-term

field experience of the RSAU-MTAA named after K.A. Timiryazev), Moscow, 2022.

11. Perevertin K.A., Bamatov I.M., *Aktual'nost' ispol'zovaniya mineral'nyh udobrenij prolongirovannogo dejstviya (jekologicheskie aspekty)* (The relevance of the use of mineral fertilizers of prolonged action (environmental aspects)), Proc. Intern. Scien. and Pract. Conf. ICEP – 2022 “Actual scientific, technical and environmental problems of habitat conservation”, Brest, 2022, pp. 210–216.

12. Utkin A.A., *Khimiya mineral'nykh udobrenii* (Chemistry of mineral fertilizers), Ivanovo: Ivanovo State Agricultural Academy named after D.K. Belyaev, 2021, 91 p.

13. Bamatov I.M., Sapaev Kh.Kh., Rummyantsev E.V., Coating of NPK fertiliser with a starch-based biodegradable polymer by using a v-star reactor, *Key Engineering Materials*, 2019, Vol. 816, pp. 318–322.

14. Bamatov I.M., Rummyantsev E.V., Arsanov M.M., The influence of biopolymer coated fertilizer on the agrochemical parameters of the soil, *Key Engineering Materials*, 2020, Vol. 869, pp. 315–320.

15. Kareem S.A., Dere I., Gungula D.T., Andrew F.P., Saddiq A.M., Adebayo E.F., Tame V.T., Kefas H.M., Joseph J., Patrick D.O., Synthesis and Characterization of Slow-Release Fertilizer Hydrogel Based on Hydroxy Propyl Methyl Cellulose, Polyvinyl Alcohol, Glycerol and Blended Paper, *Gels*, 2021, Vol. 7, No. 262, pp. 1–16, DOI: [10.3390/gels7040262](https://doi.org/10.3390/gels7040262).

16. Lawrencina D., Wong S.K., Low D.Y.S., Goh B.H., Goh J.K., Ruktanonchai U.R., Soottitantawat A., Lee L.H., Tang S.Y., Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release, *Plants*, 2021, Vol. 10, No. 238, pp. 1–25. DOI: [10.3390/plants10020238](https://doi.org/10.3390/plants10020238).