

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 10, 2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Органическое вещество водоустойчивых макро- и микроагрегатов
чернозема типичного в контрастных вариантах землепользования
З. С. Артемьева, Е. Б. Варламов, Е. С. Засухина, Е. В. Цомаева, Б. М. Когут 3
- Калийное состояние каштановой почвы при длительном применении удобрений
в сухой степи Забайкалья
А. С. Билтуев, Л. В. Будажапов, А. К. Уланов, Н. Н. Дармаева 14
- Известкование чернозема выщелоченного фильтрационным осадком сахарного завода
А. Х. Куликова, Е. А. Черкасов, Д. А. Лобачев, К. Ч. Хисамова 19
- Изменение содержания общего и легкоразлагаемого органического вещества
в дерново-подзолистой почве при длительном применении соломы
И. В. Русакова 28

Удобрения

- Влияние различных уровней удобренности почв на особенности потребления NPK
и урожайность гибридов сахарной свеклы отечественной и иностранной селекции
в Центральном Черноземном регионе
О. А. Минакова, Л. В. Александрова, В. М. Вилков 38

Пестициды

- Фунгицидная активность химических и биологических препаратов
в отношении возбудителей альтернариоза картофеля
А. С. Орина, А. В. Хютти, А. М. Шпанев 47

Агроэкология

- Вынос макроэлементов ультраскороспелым сортом сои, созданным
для условий Восточно-Сибирского региона
*Л. Г. Соколова, С. Ю. Зорина, Е. Н. Белоусова, Н. Б. Катышева,
А. В. Поморцев, Н. В. Дорофеев* 55

Экотоксикология

- Влияние ростстимулирующих ризосферных бактерий на урожай яровой пшеницы
при загрязнении никелем агросерой почвы
В. П. Шабаев, В. Е. Остроумов, М. П. Волокитин 64

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Особенности использования регрессионного анализа в агрохимических исследованиях
А. В. Пасынков, Е. Н. Пасынкова 71

ОБЗОРЫ

- Повышение эффективности использования азота: проблемы и пути решения.
Сообщение 2. Биологические подходы
В. Н. Башкин, Р. А. Галиulina 84
-

Contents

No. 10, 2022

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Organic Matter of Water-Stable Macro- and Microaggregates of Haplic Chernozem in the Contrasting Land Use Variants (Steppe and Fallow)
Z. S. Artemyeva, E. B. Varlamov, E. S. Zasukhina, E. V. Tsomaeva, B. M. Kogut 3
- Potash State of Chestnut Soil with Prolonged Use of Fertilizers in the Dry Steppe of Transbaikalia
A. S. Biltuev, L. V. Budazhapov, A. K. Ulanov, N. N. Darmaeva 14
- Liming of Leached Chernozem Filtration Sludge of a Sugar Factory
A. H. Kulikova, E. A. Cherkasov, D. A. Lobachev, K. H. Hisamova 19
- Change in the Content of Total and Easily Degradable Organic Matter in Sod-Podzolic Soil with Continuous Application of Straw
I. V. Rusakova 28

Fertilizers

- Influence of Different Levels of Soil Fertilization on the Characteristics of NPK Consumption and the Yield of Sugar Beet Hybrids of Domestic and Foreign Breeding in the Central Chernozem Region
O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, V. M. Vilkov 38

Pesticides

- Activity of Chemical and Biological Fungicides against *Alternaria* Pathogens Caused Early Blight of Potato
A. S. Orina, A. V. Khiutti, A. M. Shpanev 47

Agroecology

- Macronutrients Removal with Ultra-Early Soybean Variety Created for the East Siberia Conditions
L. G. Sokolova, S. Yu. Zorina, E. N. Belousova, N. B. Katysheva, A. V. Pomortsev, N. V. Dorofeev 55

Ecotoxicology

- Influence of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Spring Wheat Yield under Agrogray Soil Contamination with Ni
V. P. Shabayev, V. E. Ostroumov, M. P. Volokitin 64

RESEARCH METHODS

- Features of the Use of Regression Analysis in Agrochemical Researches
A. V. Pasyukov, E. N. Pasyukova 71

REVIEWS

- Improving the Efficiency of Nitrogen Use: Problems and Solutions. Part 2. Biological Approaches
V. N. Bashkin, R. A. Galiulina 84
-

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ВОДОУСТОЙЧИВЫХ МАКРО- И МИКРОАГРЕГАТОВ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО В КОНТРАСТНЫХ ВАРИАНТАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2022 г. З. С. Артемьева^{1,*}, Е. Б. Варламов¹, Е. С. Засухина²,
Е. В. Цомаева¹, Б. М. Когут¹

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева
Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва 119017 Россия

²Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН
ул. Вавилова, 44, кор. 2, Москва 119333 Россия

*E-mail: artemyevazs@mail.ru

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 20.05.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

С помощью гранулоденсиметрического метода фракционирования изучено органическое вещество водоустойчивых макро- (2–1 мм) и микроагрегатов (<0.25 мм), выделенных из воздушно-сухих макроагрегатов (2–1 мм) типичного чернозема в контрастных вариантах землепользования. Выявлено, что свободные микроагрегаты — это лишь части дезинтегрированных макроагрегатов. Подробно изучен компонентный состав неустойчивых в ультразвуковом поле микроагрегатов внутри агрегатов (мВСА) разного размера (макро- и свободных микроагрегатов). Показано, что состав их идентичен, они различаются лишь размерами и количеством. Их размер внутри свободных микроагрегатов в 1.7 раза, а количество — более чем в 1130 раз меньше по сравнению с таковыми в макроагрегатах. Плотность упаковки такого рода микроагрегатов внутри макроагрегатов в 1.7 раза меньше по сравнению с таковой внутри свободных микроагрегатов.

Ключевые слова: водоустойчивые структурные отдельности, микроагрегаты внутри структурных отдельностей, легкие фракции, илстые фракции, средний диаметр илстых частиц.

DOI: 10.31857/S0002188122100039

ВВЕДЕНИЕ

Динамика органического вещества (**ОВ**) почвы непосредственно связана с ее структурой [1]. Компоненты **ОВ** играют важную роль на самых разных уровнях иерархии агрегатов почвы, начиная с первоначального образования основных органо-минеральных комплексов, вплоть до стабилизации крупных агрегатов [2, 3]. В свою очередь стабильные макро- и микроагрегаты обеспечивают физическую защиту **ОВ**, ассоциированного с почвенными частицами разного размера [3].

Несмотря на общепринятое мнение об увеличении степени “физической” защиты **ОВ** по мере уменьшения размера структурных отдельностей [1, 4–7], некоторые исследования демонстрируют, что оборот **ОВ** микроагрегатов может быть более динамичным, чем это принято считать [1, 8–11].

В пределах определенной размерной фракции структурных отдельностей может присутствовать смесь отдельных частиц, минеральных зерен, организмов и даже полных макро- и микроагрегатов

[12]. При этом в современных моделях агрегатобразования особую важность придают образованию так называемых “стабильных” микроагрегатов, формирующихся внутри макроагрегатов [5, 10, 13–19]. В настоящее время считают, что включение **ОВ** в микроагрегаты происходит только после его предварительного включения в макроагрегат [12], а стабилизацию углерода в микроагрегатах внутри макроагрегатов рассматривают в качестве главного механизма секвестрации углерода в долгосрочной перспективе [7, 20–23]. То есть **ОВ** микроагрегатов внутри макроагрегатов считают важным функционально-значимым пулом [24–26]. Следует отметить, что “стабильные” микроагрегаты, локализующиеся внутри макроагрегатов, как правило, обладают водоустойчивостью [27, 28], однако они легко разрушаются при обработке ультразвуком (**УЗ**), поэтому определяли их как неустойчивые в **УЗ**-поле микроагрегаты внутри структурных отдельностей (**мВСА**).

Состав компонентов *ОВ* и факторы устойчивости микроагрегатов с различной механической прочностью изучали в нескольких исследовательских проектах [7, 18, 23, 28–36]. Однако данных о количественном распределении микроагрегатов устойчивых и неустойчивых в ультразвуковом поле в водоустойчивых агрегатах разного размера, наряду с особенностями количественного и качественного состава *ОВ* в них, а также их динамике при разных видах землепользования пока недостаточно.

Цель работы – исследовать органическое вещество водоустойчивых макро- и свободных микроагрегатов чернозема типичного в контрастных вариантах землепользования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – чернозем типичный в условиях контрастных видов использования: степь (Центрально-Черноземный государственный биосферный заповедник “Стрелецкая степь”, Курская обл.) и длительный (52 года) чистый бессменный пар без удобрений (Курский НИИ агропромышленного производства). Территория исследованных участков типична для Центрально-Черноземного региона, климат умеренный. Среднегодовая температура составляет 4.8–5.3°C. Среднегодовое количество осадков равно 540 мм. Почва – чернозем типичный среднесуглинистый [37], согласно международной классификации – *Horlic Chernozem* [38] на лессовых отложениях с содержанием ила 19.4–23.4%, $C_{\text{орг}}$ – 2.6–4.9%, pH_{H_2O} 6.8–6.9.

Для каждого варианта опыта отбирали по 3 ненарушенных монолитных образца почвы (размером 25 × 25 × 15 см) из слоя 5–25 см. Образцы подвергали сухому просеиванию. В воздушно-сухих агрегатах размером 2–1 мм выделяли водоустойчивые структурные отдельности: агрегаты (2–1, 1–0.5 и 0.5–0.25 мм) и свободные микроагрегаты (<0.25 мм). Термин “свободные микроагрегаты” ($BCA_{\text{ми}}$) был предложен более 20 лет назад для разделения микроагрегатов, локализуемых в матрице почвы и микроагрегатов внутри агрегатов ($mBCA$), которые локализируются в матрице агрегатов [7, 10, 17, 39]. Выбор воздушно-сухих агрегатов диаметром 2–1 мм был обусловлен их наибольшим вкладом в общее *ОВ* почвы [40, 41].

Далее в водоустойчивых макро- (2–1 мм) и свободных микроагрегатах (<0.25 мм) ($BCA_{\text{ма}}$ и $BCA_{\text{ми}}$ соответственно) выделяли пулы *ОВ* разной локализации в их матрице. Для этого применяли модифицированный вариант гранулоденсиметрического фракционирования, полная схема представлена ранее [42]. Выбор именно таких

размерностей структурных отдельностей обусловлен их наибольшей разницей в размере.

Прежде всего, с помощью бромформ-этанольной смеси (**БЭС**) выделяли свободное *ОВ* (неагрегированное *ОВ* ($ЛФ_{\text{св}}$)), локализуемое в межагрегатном пространстве водоустойчивых структурных отдельностей – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³). Далее, для физического разрушения структурных отдельностей был использован ультразвуковой диспергатор зондового типа ЛУЗД-0.5К-02-00000 ПС (Криамид, Россия). Озвучивание (71 Дж/мл) образца (10 г + 50 мл деионизированной воды) осуществляли в течение 1 мин с последующим центрифугированием в соответствии с законом Стокса и повторяли 15 раз. Водную суспензию илистых частиц (<1 мкм) собирали и высушивали. После удаления илистых частиц из образца с помощью тяжелой жидкости БЭС выделяли агрегированное *ОВ* (локализованное внутри неустойчивых в ультразвуковом поле микроагрегатов внутри структурных отдельностей ($ЛФ_{\text{агр}}$)) – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³). Примененная схема позволила выделить 4 пула *ОВ*: неагрегированное (свободное) ($ЛФ_{\text{св}}$), агрегированное ($ЛФ_{\text{агр}}$), илистой фракции (**Ил**) и остатка (**Ост**). Фракционирование выполняли в трехкратной повторности.

С помощью гранулоденсиметрического фракционирования почву можно разделить на 2 группы микроагрегатов, которые различаются по степени устойчивости к диспергирующему действию ультразвука.

Микроагрегаты, неустойчивые в ультразвуковом поле, локализируются внутри водоустойчивых агрегатов ($mBCA$), состоят из органических остатков разной степени минерализации–гумификации (ядро – $ЛФ_{\text{агр}}$) и глинистых частиц (**Ил**), его инкрустирующих. Связь между компонентами слабая, поэтому они легко высвобождаются под влиянием кавитации.

Микроагрегаты, устойчивые в ультразвуковом поле, представлены во фракции остаток.

Содержание С и N в гранулоденсиметрических фракциях определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Япония). Все измерения выполняли в трехкратной повторности.

Средний диаметр илистых частиц определяли методом динамического светорассеивания в их водных суспензиях (разведение 1 : 20) на анализаторе NanoBrook Omni (Brookhaven Instruments Corporation, США). Для каждого образца илистых частиц выполняли 3 серии по 5 последовательных измерений и рассчитывали величину среднего диаметра.

Рентгендифрактометрический анализ илистых фракций проводили на анализаторе HZG-4A X-ray (Carl Zeiss Jena, Германия). Сметиты диагностировали по серии рефлексов: 001–14.1, 002–7.0, 003–4.7, 004–3.5 Å. Сметиты диагностировали по широким отражениям с пиками 1.45 нм на дифрактограммах воздушно-сухих образцов и 1.7–1.8 нм на дифрактограммах сольватированных этиленгликолем. Диффузное заполнение малоугловой области до 0.71 нм в сольватированном состоянии образцов диагностировано как хаотично-смешанослойное иллит-сметитовое образование с единичными пакетами хлорита. При прокаливании фиксировали слабый рефлекс 1.38 нм, 0.71 нм – исчезал, а 1.0 нм – значительно усиливался.

Иллит (гидрослюдистый компонент) был диагностирован по наличию рефлексов в области 1.0 нм, 0.5 нм и 0.334 нм образцов, снятых в 3-х состояниях. Соотношение интенсивностей рефлексов d_{001} и d_{002} ($I_{1.0 \text{ нм}}/I_{0.5 \text{ нм}}$) ~ 2 свидетельствовало о преобладании диоктаэдрического типа.

Каолинит диагностировали по наличию рефлексов в области 0.715 нм и 0.357 нм, не изменявших свои параметры при сольватации образцов этиленгликолем и исчезающих при прокаливании при 550°C в течение 2 ч. В образцах каолинит представлен совершенной формой.

Хлорит диагностирован по наличию рефлексов в области 1.4 нм, 0.474 нм и 0.354 нм. Сольватация образцов этиленгликолем не приводила к изменению положения рефлекса хлорита. Прокаливание приводило к сжиманию рефлекса 1.38 нм и снижению интенсивности всех последующих рефлексов.

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием статистического пакета Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, США) и Origin Pro 8 (Origin Lab Corporation, США). Выбранный уровень значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Допускали, что водоустойчивые макро- и свободные микроагрегаты могут количественно и качественно различаться по составу в силу того, что физические размеры, в пределах которых должна поддерживаться физическая целостность структурных отдельностей, различаются минимум в 4–8 раз. Однако аналитические данные выявили практически полную однотипность компонентного состава водоустойчивых структурных отдельностей разного размера: макро- ($ВСА_{ма}$) и свободных микроагрегатов ($ВСА_{ми}$), выделенных из воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм. И в $ВСА_{ма}$, и в $ВСА_{ми}$ выделялись неустойчивые (мВСА) и устойчивые (остаток) в УЗ-поле микро-

агрегаты. Наибольший интерес представляют неустойчивые в УЗ-поле микроагрегаты (мВСА) в силу того, что в современных моделях агрегатообразования им придают особую важность [5, 10, 13, 16–19, 21, 34].

Доля компонентов мВСА ($ЛФ_{агр}$ и Ил) в структурных отдельностях оказалась одинаковой: $\sim 1/5$ массы структурной отдельности в целом, что сопровождалось чуть пониженной долей мВСА в свободных микроагрегатах по сравнению с таковой в макроагрегатах (рис. 1). Это согласуется с данными Пуже с соавторами, которые не обнаружили различий в составе водоустойчивых макро- и микроагрегатов [18].

Однако есть одно очень важное отличие – разное содержание свободного $ОВ$ ($ЛФ_{св}$), которое является легкодоступным (за исключением углистых веществ) энергетическим материалом для микробиологического разложения и первоисточником агрегированного $ОВ$ ($ЛФ_{агр}$) [26, 39, 43]. Выявлено, что свободное $ОВ$ присутствовало лишь в $ВСА_{ма}$ (1.1% от массы $ВСА_{ма}$), в то время как в $ВСА_{ми}$ практически отсутствовало (едва достигало 0.2% на массу $ВСА_{ми}$), что согласовалось с литературными данными [32, 39]. Поэтому практически полное отсутствие $ЛФ_{св}$ в $ВСА_{ми}$ предполагало преимущественно лишь дальнейшее микробиологическое разложение $ЛФ_{агр}$ внутри $мВСА_{ми}$ без возможности пополнения этого пула $ОВ$ за счет $ЛФ_{св}$. Наряду с практически идентичным составом структурных отдельностей, вне зависимости от их размера, это позволило предполагать, что $ВСА_{ми}$ являются частями/осколками $ВСА_{ма}$, которые высвобождаются при их разрушении [3, 10, 13, 15, 16, 18, 21, 44]. Дополнительным аргументом в пользу этой гипотезы являлся выявленный практически одинаковый размер илистых частиц в мВСА, локализованных в $ВСА_{ма}$ и $ВСА_{ми}$ (степь): ~ 400 нм. При этом величина соотношения количества органической и минеральной компонент ($ЛФ_{агр} : Ил$) в мВСА внутри макро- и свободных микроагрегатов была разной: в $ВСА_{ма}$ она более чем в 1.2 раза больше по сравнению с таковой в $ВСА_{ми}$ (0.28 ± 0.05 против 0.23 ± 0.04 соответственно), что могло свидетельствовать о большем размере мВСА внутри $ВСА_{ма}$.

Количество межагрегатной массы в $ВСА_{ми}$ было чуть больше по сравнению с таковой $ВСА_{ма}$: 77.8 ± 1.1 против 76.6 ± 0.85 . Следует отметить, что в $ВСА_{ма}$ межагрегатная масса включала помимо фракции остаток и свободное $ОВ$ ($ЛФ_{св}$).

Учитывая разницу в размерах $ВСА_{ма}$ и $ВСА_{ми}$ (минимум в 4–8 раз), и одинаковый размер минеральной составляющей (~ 400 нм), можно предпо-

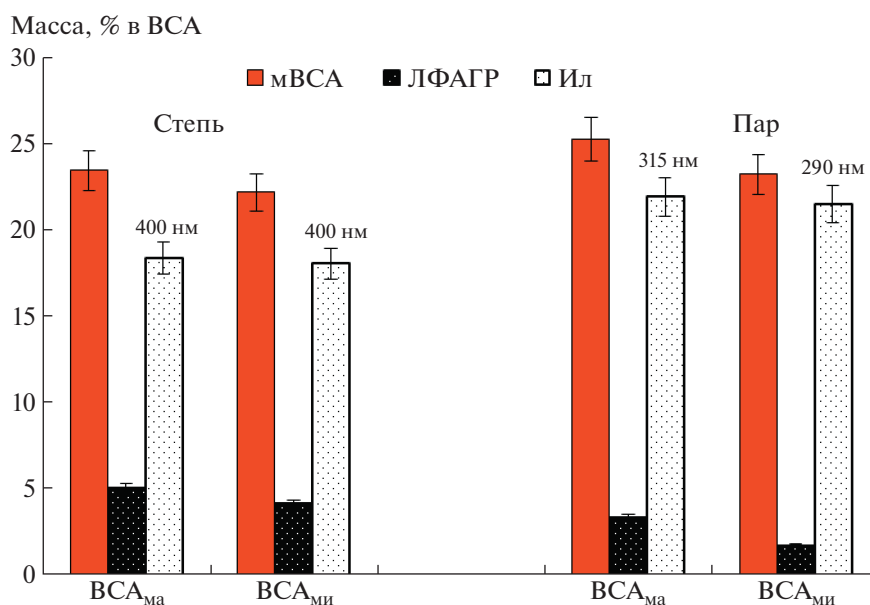


Рис. 1. Распределение органического и минерального компонентов в микроагрегатах (мВСА) внутри водоустойчивых структурных отделностей разного размера (макро- (VCA_{ма}) и микроагрегаты (VCA_{ми})).

лагать, что количество мВСА внутри VCA_{ма} может быть, по крайней мере, во столько же раз больше по сравнению с таковым внутри VCA_{ми}.

Рассчитали размер и количество мВСА внутри VCA_{ма} и VCA_{ми}, зная долю мВСА в макроагрегате (23.4%) и принимая средние размеры макроагрегата (~1.5 мм) и свободного микроагрегата (~0.125 мм). При расчете размера мВСА исходили из предположения, что форма твердого растительного остатка (ядра мВСА) близка к параллелепипеду [45], при его монослойном покрытии илистыми частицами. Соответственно, примерные размеры для мВСА внутри VCA_{ма}: высота ~70 мкм, стороны основания параллелепипеда ~35 мкм; в VCA_{ми}: высота ~59 мкм, стороны основания параллелепипеда ~30 мкм. Оказалось, что средний размер мВСА внутри VCA_{ма} в 1.7 раза больше, а количество мВСА внутри макроагрегатов превышает таковое в свободных микроагрегатах более чем в 1130 раз. Столь большая разница в количестве мВСА внутри VCA_{ма} и VCA_{ми} обусловлена разницей в размере VCA_{ма} и VCA_{ми} (в 12 раз) при примерно одинаковом объеме ($\leq 1/5$ объема VCA), который занимают мВСА в них, с незначительной тенденцией к уменьшению его в VCA_{ми} по сравнению с таковым в VCA_{ма}. Поскольку размер мВСА в макро- и свободных микроагрегатах различается лишь в 1.7 раза, соответственно количество мВСА, которое может вместить VCA_{ми}, намного меньше такового в VCA_{ма}.

Это сопровождалось более плотной (в 1.7 раза) упаковкой микроагрегатов (мВСА) внутри объе-

ма VCA_{ми} по сравнению с таковой VCA_{ма}. При этом больший размер макроагрегатов может сопровождаться их большей степенью стабильности по сравнению с таковыми свободными микроагрегатами, что согласуется с данными, приведенными Пенгом с соавт., которые показали, что более крупные агрегаты обладают и большей водоотталкивающей способностью, которая, по их мнению, обусловлена меньшим отношением площади поверхности к объему [46].

В варианте пар, аналогично варианту степь, состав структурных отделностей вне зависимости от размера был также достаточно близок: доля компонентов мВСА (ЛФ_{агр} и ил), аналогично варианту степь, составляла ~1/5 массы структурной отдельности в целом, что сопровождалось статистически достоверным снижением (более чем на 2%; $t = 7.1$) доли мВСА в VCA_{ми} по сравнению с таковой в VCA_{ма}. Свободное *ОВ*, аналогично варианту степь, обнаружено лишь в макроагрегатах (табл. 1). Однако в варианте пара по сравнению с вариантом степь наблюдали значительно более резкое снижение количества ЛФ_{агр} в VCA_{ма} и VCA_{ми} (в 2.0 раза против 1.2 раза) на фоне, аналогично варианту степь, очень близкого количества минеральной компоненты (21.9 и 21.5% соответственно). Все различия были статистически значимыми. В варианте пара величина соотношения ЛФ_{агр}: ил в мВСА внутри VCA_{ма} была в 1.9 раза больше по сравнению с таковой внутри VCA_{ми} (статистически достоверно, $t = 3.5$). При этом органические ядра мВСА (ЛФ_{агр}), локализованные

Таблица 1. Распределение органических и органо-минеральных фракций ($M + S$) и t -критерий Стьюдента, определяющий степень различия между средними величинами параметров в типичном черноземе контрастных вариантов землепользования

Ценоз	Вариант	ЛФ _{св}		ЛФ _{агр}		mWSA		Ил		Остаток	
		$M + S$	t	$M + S$	t	$M + S$	t	$M + S$	t	$M + S$	t
Степь	ВСА _{ма}	1.14 ± 0.22		5.07 ± 0.75		23.4 ± 0.6		18.4 ± 0.6		75.4 ± 0.9	
Пар		4.15 ± 1.92	3.7	3.36 ± 0.80	3.8	25.3 ± 0.6	5.2	21.9 ± 1.4	5.6	70.6 ± 1.4	7.3
Степь	ВСА _{ми}	Не обнаружено		4.13 ± 0.66		22.2 ± 1.0		18.1 ± 0.7		77.6 ± 1.1	
Пар				1.71 ± 0.43	7.4	23.2 ± 0.4	2.3	21.5 ± 0.2	12	76.7 ± 0.3	1.9

Примечание. M – среднее, S – стандартное отклонение, t -критерий Стьюдента приведен для $P = 0.95$.

внутри ВСА_{ма} и ВСА_{ми}, в варианте пара были статистически достоверно меньше таковых в варианте степь: в 1.5 и 2.4 раза соответственно. Это свидетельствовало о меньших размерах мВСА внутри ВСА_{ма} и ВСА_{ми} в варианте пара по сравнению с таковыми варианта степь, что косвенно подтверждалось и размерами илстых частиц: 315.29 против 397.33 нм соответственно (ВСА_{ма}) и 396.14 против 293.03 нм соответственно (ВСА_{ми}). Таким образом, в варианте пара илстые частицы, локализованные в ВСА разного размера, демонстрировали статистически значимые различия по величине среднего диаметра, причем с уменьшением размера структурных отдельностей эта разница приобретала все более выраженный характер: ВСА_{ма} (в 1.3 раза) < ВСА_{ми} (в 1.4 раза).

Меньший размер илстых частиц косвенно подтвердил и минералогический анализ глинистых минералов. Выявлена тенденция к уменьшению величины среднего диаметра илстых частиц по мере увеличения доли минералов с расширяющимся типом кристаллической решетки (сметиты) в составе глинистых минералов (рис. 2). Это особенно было выражено для ВСА_{ми}: доля сметитов в варианте пара увеличилась на 9%. И это хорошо согласовалось со схемой организации илстых агрегатов, предложенной в работе [31]. Позднее было подтверждено, что размеры квазикристаллов сметита меньше по сравнению с таковыми доменов иллита и блоков каолинита [47–49].

Все вышеизложенное могло бы свидетельствовать о меньшей плотности заполнения мВСА внутреннего объема ВСА разного размера в варианте пар по сравнению с такой вариант степь. Однако в варианте пар наблюдали уменьшение количества межмикроагрегатной массы (Остаток) по сравнению с таковой варианта степь: 70.6 ± 1.3 против $75.4 \pm 0.8\%$ (ВСА_{ма}) (статистически достоверно) и 76.8 ± 0.3 против $77.8\% \pm 1.1\%$ (ВСА_{ми}) соответственно, что противоречило первоначальному предположению. По-видимому, за счет интенсивной минерализации *ОВ* в варианте

пара происходило, по крайней мере, частичное разрушение мВСА внутри ВСА разного размера, часть их становилась значительно меньше по размеру по сравнению с таковыми варианта степь, однако, плотность заполнения их внутреннего объема оставалась на прежнем уровне, по-видимому за счет уменьшения размера самих ВСА.

Таким образом, состав неустойчивых микроагрегатов внутри структурных отдельностей совершенно идентичен, и они различались лишь размерами, количеством и плотностью упаковки.

Уровень накопления C и N. На рис. 3 представлены величины концентрации C (% от массы фракции) и N (% от массы фракции), а также величина отношения C : N в разных пулах *ОВ* в составе ВСА разного размера.

Аналитические данные свидетельствовали, что в ВСА_{ма} величина концентрации C в ЛФ_{агр} практически не зависела от варианта землепользования; в ВСА_{ми}, напротив, в варианте пар она была почти в 1.2 раза больше таковой варианта степь. Величина концентрации N в ЛФ_{агр} в ВСА_{ма} варианта пар была в 1.3 раза больше, а в ВСА_{ми} – в 1.2 раза меньше таковых варианта степь.

Величины концентрации C и N илстой фракции, вне зависимости от варианта землепользования, различались между ВСА_{ма} и ВСА_{ми} в 1.0–1.1 раза (рис. 3). Это согласовалось с данными Пуже с соавторами, которые выявили уменьшение концентрации C в илстой фракции по мере уменьшения размера ВСА [18]. При этом, вне зависимости от размера ВСА величина концентрации C в илстой фракции в варианте степь всегда была в 1.6 раза больше по сравнению с таковой варианта пар, что косвенно подтверждало меньший размер мВСА внутри них. Величина концентрации N илстой фракции в ВСА_{ма} в варианте пар уменьшалась более заметно по сравнению с таковой в ВСА_{ми} (в 1.9 раза против 1.6 раза соответственно).

В целом величина концентрации C в мВСА внутри ВСА_{ма} была всегда больше по сравнению с

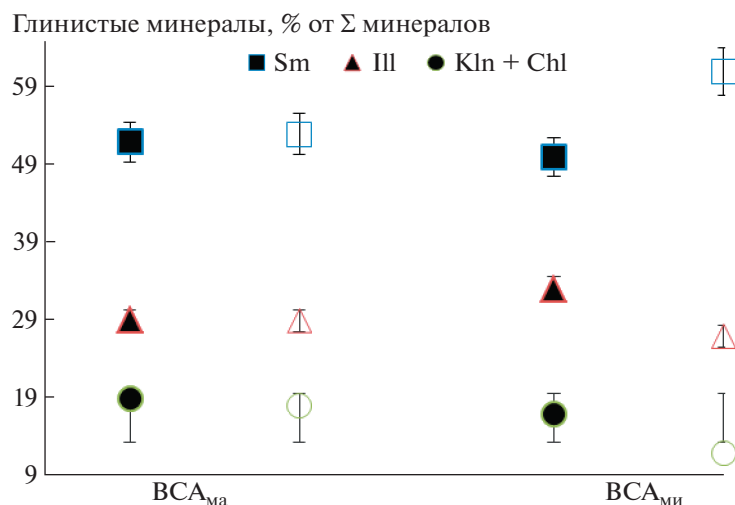


Рис. 2. Распределение глинистых минералов в ВСА разного размера в контрастных вариантах землепользования: Sm — смектиты; Ill — иллиты; Kln + Chl — каолинит + хлорит; пустые символы — пар, заливные символы — степь; ВСА_{ма} — водоустойчивые макроагрегаты (2–1 мм), ВСА_{ми} — водоустойчивые свободные микроагрегаты (<0.25 мм). То же на рис. 3–5.

таковой внутри ВСА_{ми}: в 1.2 раза (степь) и в 1.3 раза (пар); для величины концентрации N отличия были более выражены: в 1.2 (степь) и 1.4 раза (пар).

Наиболее низкие величины концентрации C и N отмечены для фракции остаток. Вне зависимости от варианта землепользования, величины концентрации C и N во фракции остаток были всегда больше в ВСА_{ма} по сравнению с таковыми в ВСА_{ми}: в 1.7 (степь) и 1.2 раза (пар), и в 1.9 раза (степь) и 1.3 раза (пар) соответственно. Величина концентрации C в варианте пар снижалась в 1.5 раза (ВСА_{ма}) и в 1.1 раза (ВСА_{ми}) относительно таковых в варианте степь. Содержание N в варианте пар снижалось в 1.9 (ВСА_{ма}) и 1.3 (ВСА_{ми}) раза относительно таковых варианта степь.

Величина отношения C : N была всегда больше в ВСА_{ми} по сравнению с таковой в ВСА_{ма}, что обусловлено меньшими величинами снижения концентрации C (в 1.05–1.2 раза) по сравнению с таковыми N (в 1.1–1.3 раза) в ВСА_{ми} относительно таковых в ВСА_{ма}. Это сопровождалось практически повсеместным увеличением соотношения C : N в варианте пар.

На рис. 4 представлены величины накопления C (% от массы ВСА) и N (% от массы ВСА) в разных пулах ОВ в составе ВСА разного размера. Вне зависимости от варианта землепользования уровень накопления C и N в ЛФ_{агр} в ВСА_{ма} всегда был больше такового в ВСА_{ми}, однако величины снижения уровня накопления C и N для ВСА_{ми} намного больше по сравнению с таковыми для ВСА_{ма}: в 1.8 раза против 1.3 раза (C) и в 3.0 раза

против 1.1 раза соответственно (N). Вне зависимости от размера ВСА уровень накопления C и N в ЛФ_{агр} в варианте степь всегда был больше такового в варианте пар. При этом в варианте пар для ВСА_{ми} по сравнению с ВСА_{ма} отмечено более значительное снижение уровня накопления C: в 2.1 раза против 1.5 раза; для N эта тенденция была еще более выражена: в 3.0 раза против 1.1 раза.

Уровень накопления C и N в илстой фракции вне зависимости от варианта землепользования в ВСА_{ма} был в 1.2 раза больше такового в ВСА_{ми}. Исключение отмечено лишь для N илстой фракции в варианте пара, где уровень накопления N практически не зависел от размера ВСА. Вне зависимости от размера ВСА, уровень накопления C и N в илстой фракции варианта степь был всегда в 1.3 раза больше таковых в варианте пар, за исключением ВСА_{ма}, где величина снижения содержания N, оказалась больше — в 1.5 раза.

Уровень накопления C в мВСА внутри ВСА_{ма} всегда был больше по сравнению с таковым внутри ВСА_{ми}: в 1.2 раза (степь) и 1.4 раза (пар); для уровня накопления N отличия были более выражены: в 1.3 раза (степь) и 1.5 раза (пар). Отмеченное ранее более резкое снижение уровня накопления C и N в органическом ядре мВСА (ЛФ_{агр}) внутри ВСА разного размера свидетельствовало о разрушении/уменьшении размера мВСА в варианте пара преимущественно за счет минерализации их органических ядер.

Уровень накопления C и N во фракции остаток вне зависимости от варианта землепользования всегда был больше в ВСА_{ма} по сравнению с ВСА_{ми}: в 1.6 раза (степь) и 1.1 раза (пар) и в 1.7 раза

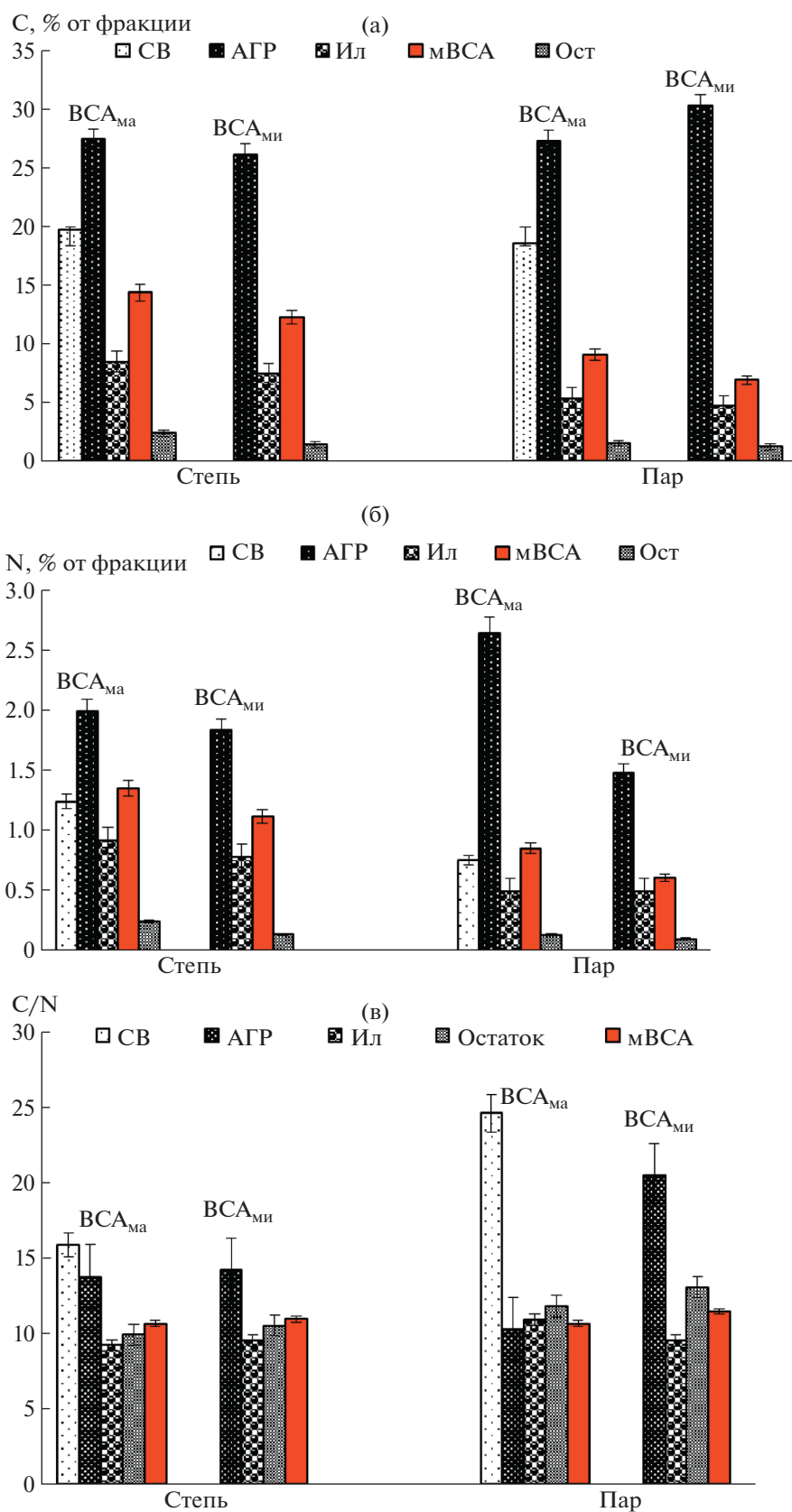


Рис. 3. Концентрация С (а) и N (б), величина отношения С : N (в) в разных пулах *ОВ* в составе водоустойчивых структурных отделностей разного размера (макро- (ВСА_{ма}) и микроагрегаты (ВСА_{ми})).

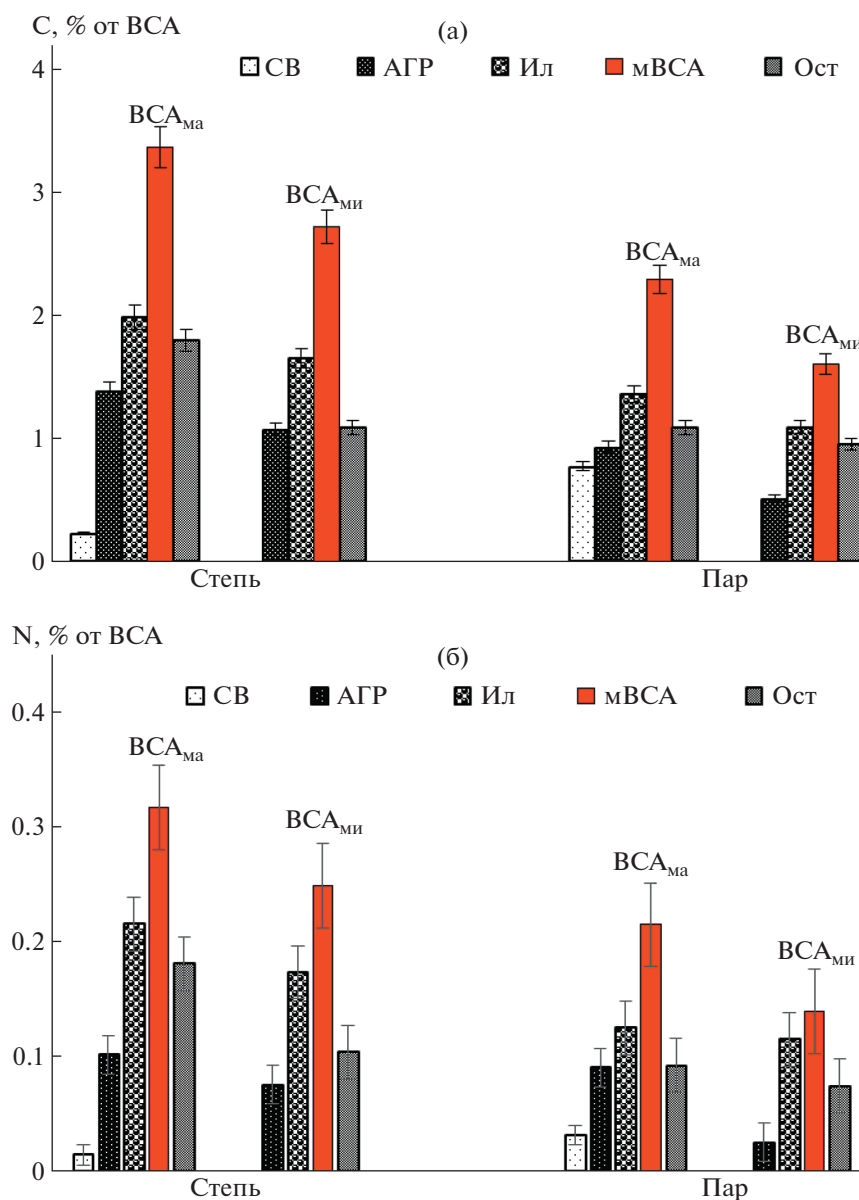


Рис. 4. Уровень накопления С (а) и N (б) в разных пулах *ОВ* в составе водоустойчивых структурных отделностей разного размера (макро- ($BCA_{ма}$) и микроагрегаты ($BCA_{ми}$)).

(степь) и 1.2 раза (пар) соответственно. Это сопровождалось более резким уменьшением уровня накопления С в $BCA_{ма}$ по сравнению с $BCA_{ми}$ в варианте пара по сравнению с таковым в варианте степь: в 1.7 раза против 1.1 раза. Уровень накопления N во фракции остаток в $BCA_{ма}$ варианта пара снижался в 2 раза против 1.4 раза в $BCA_{ми}$.

Аналитические данные показали, что $BCA_{ма}$ стабилизировали больше содержание С и N по сравнению с $BCA_{ми}$: в 1.4 раза (степь) и 1.6 раза (пар) (рис. 5). При этом в варианте степь уровень накопления С и N всегда был больше таковых в варианте пар: в 1.3 и 1.5 раза ($BCA_{ма}$) и в 1.5 и

1.6 раза ($BCA_{ми}$). Таким образом, потери С и N были более выражены в свободных микроагрегатах относительно макроагрегатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, водоустойчивые свободные микроагрегаты ($BCA_{ми}$), выделенные из воздушно-сухих макроагрегатов 1–2 мм – это осколки дезинтегрированных водоустойчивых макроагрегатов ($BCA_{ма}$). Основными доводами в пользу этого являются: 1 – практически полное отсутствие ЛФ_{св} в $BCA_{ми}$, 2 – практически одинако-

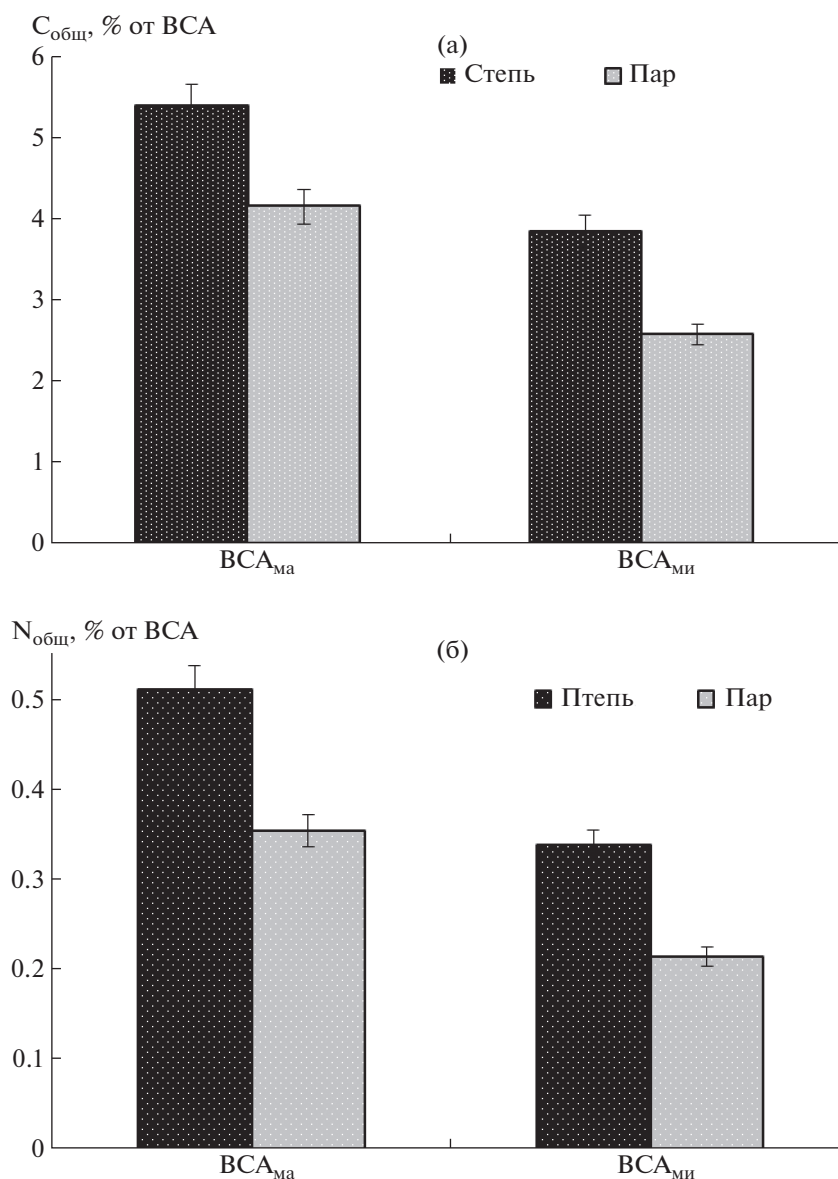


Рис. 5. Концентрация С (а) и N (б) в структурных отдельностях разного размера (макро- (BCA_{ма}) и микроагрегаты (BCA_{ми})).

вый, исключая ЛФ_{св}, их компонентный состав, 3 – близкий количественный и качественный состав *ОВ*, 4 – одинаковый размер илестых частиц, инкрустирующих органическое ядро мВСА (~400 нм), 5 – большие потери С и N в BCA_{ми} в варианте пар, обусловленные высвобождением *ОВ*, ранее защищенного в составе BCA_{ма} при их разрушении, и соответственно увеличения его доступности для микробиоты.

Микроагрегаты внутри структурных отдельностей разного размера (мВСА) играют важнейшую роль в структурообразовании и стабилизации С в среднесрочной перспективе. По-видимому, они “армируют” водоустойчивые структурные от-

дельности. Состав мВСА внутри ВСА совершенно идентичен, они различаются лишь размерами, количеством и плотностью упаковки. Их размер и количество внутри BCA_{ми} меньше по сравнению с таковыми в BCA_{ма}: в 1.7 и более чем в 1130 раз соответственно. При этом упаковка таких микроагрегатов внутри BCA_{ми} в 1.7 раза плотнее по сравнению с таковой в BCA_{ма}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tisdall J., Oades J. Organic matter and water-stable aggregates in soils // J. Soil Sci. 1982. V. 33. P. 141–163.

2. Oades J., Waters A. Aggregate Hierarchy in Soils // Aust. J. Soil Res. 1991. V. 29. P. 815–828.
3. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil Till. Res. 2004. V. 79. P. 7–31.
4. Beare M., Cabrera M., Hendrix P., Coleman D. Aggregate-protected and unprotected pools of organic matter in conventional and no-tillage ultisols // Soil Sci. Soc. Am. J. 1994. V. 58. P. 787–795.
5. Elliott E., Coleman D. Let the soil work for us // Ecolog. Bulletins. 1988. V. 39. P. 23–32.
6. Gupta V., Germida J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation // Soil Biol. Biochem. 1988. V. 20. P. 777–786.
7. Six J., Paustian K., Elliott E., Combrink C. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. P. 681–689.
8. Seech A., Beauchamp E. Denitrification in soil aggregates of different sizes // Soil Sci. Soc. Am. J. 1988. V. 52. P. 1616–1621.
9. Golchin A., Oades J., Skjemstad J., Clarke P. Soil structure and carbon cycling // Austral. J. Soil Res. 1994. V. 32. P. 1043–1068.
10. Jastrow J. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter // Soil Biol. Biochem. 1996. V. 28. P. 656–676.
11. Bossuyt H., Six J., Hendrix P. Aggregate-protected carbon in no-tillage and conventional tillage agroecosystems using carbon-14 labeled plant residue // Soil Sci. Soc. Am. J. 2002. V. 66. P. 1965–1973.
12. Totsche K., Amelung W., Gerzabek M., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C. et al. Microaggregates in soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2018. V. 181. P. 104–136.
13. Oades J.M. Soil organic matter and structural stability mechanisms and implications for management // Plant Soil. 1984. V. 76. P. 319–337.
14. Angers D., Giroux M. Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates // Soil Sci. Soc. Am. J. 1996. V. 60. P. 1547–1551.
15. Golchin A., Baldock J., Clarke P., Higashi T., Oades J. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter of a volcanic ash soil as shown by C-13 NMR spectroscopy. 2. Density fractions // Geoderma. 1997. V. 76. P. 175–192.
16. Six J., Elliot E., Paustian K., Doran J. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1998. V. 62. P. 1367–1377.
17. Six J., Elliott E., Paustian K. Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems // Soil Sci. Soc. Am. J. 1999. V. 63. P. 1350–1358.
18. Puget P., Chenu C., Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates // Eur. J. Soil Sci. 2000. V. 51. P. 595–605.
19. Crow S., Swanston C., Lajtha K., Brooks J., Keirstead H. Density fractionation of forest soils: methodological questions and interpretation of incubation results and turnover time in an ecosystem context // Biogeochemistry. 2007. V. 85. P. 69–90.
20. Besnard E., Chenu C., Balesdent J., Puget P., Arrouays D. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation // Eur. J. Soil Sci. 1996. V. 47. P. 495–503.
21. Angers D., Recous S., Aita C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ¹³C:¹⁵N-labelled wheat straw *in situ* // Eur. J. Soil Sci. 1997. V. 48. P. 295–300.
22. Gale W., Cambardella C., Bailey T. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. P. 201–207.
23. Denef K., Zotarelli L., Boddey R., Six J. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols // Soil Biol. Biochem. 2007. V. 39. P. 1165–1172.
24. Elliott E., Paustian K., Frey S. Modeling the measurable or measuring the modelable: A hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractionations / Eds. D.S. Powlson, P. Smith, and J.O. Smith // Evaluation of Soil Organic Matter Models. Berlin: Springer-Verlag, 1996. V. 138. P. 161–179.
25. Smith J., Smith P., Monaghan R., MacDonald A. When is measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool? // Eur. J. Soil Sci. 2002. V. 53. P. 405–416.
26. Артемьева З.С., Кириллова Н.П. Пулы органического вещества почвы: состав, роль в процессах почвообразования и структурообразования, экологические функции // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 74–96.
27. Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J.O., Clarke P. Soil structure and carbon cycling // Austr. J. Soil Res. 1994. V. 32. P. 1043–1068.
28. Golchin A., Oades J., Skjemstad J., Clarke P. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ¹³C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ¹³C NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture // Aust. J. Soil Res. 1995. V. 33. P. 59–76.
29. Edwards A., Bremner J. Microaggregates in soils // J. Soil Sci. 1967. V. 18 (1). P. 64–73.
30. Шаймухаметов М.Ш. Опыт использования ультразвука при изучении механизма закрепления органического вещества в почве // Почвоведение. 1974. № 5. С. 154–161.
31. Oades J.M. The retention of organic matter in soils // Biogeochemistry. 1988. V. 5. P. 35–70.
32. Gregorich E., Kachanoski R., Voroney R. Carbon mineralization in soil size fractions after amounts of aggregate disruption // J. Soil Sci. 1989. V. 40. P. 649–659.
33. Amato M., Ladd J. Decomposition of ¹⁴C-labelled glucose and legume material in soils: properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C // Soil Biol. Biochem. 1992. V. 24. P. 455–464.
34. Golchin A., Baldock J., Oades J. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics / Eds. Lal R., Kimble J., Follett R.,

- Stewart B. // Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton: CRC Press, 1998. P. 245–266.
35. Schmidt M., Rumpel C., Kögel-Knabner I. Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organo-mineral complexes from soils // Eur. J. Soil Sci. 1999. V. 50. P. 87–94.
 36. Post W., Kwon K. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential // Glob. Change Biol. 2000. V. 6. P. 317–327.
 37. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
 38. IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports No. 106. Food and Agriculture Organization. Rome, 2014.
 39. Six J., Conant R., Paul E. Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for c-saturation of soils // Plant Soil. 2002. V. 241. P. 155–176.
 40. Сысуюев С.А. Содержание и состав органического вещества агрегатов черноземов: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2005. 24 с.
 41. Когут Б.М., Сысуюев С.А., Холодов В.А. Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.
 42. Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B. Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants // Catena. 2021. V. 204. P. 105403.
 43. Balesdent J., Chenu C., Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage // Soil Till. Res. 2000. V. 53 (3–4). P. 215–230.
 44. Jastrow J., Miller R. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations / Eds. Lal R., Kimble J., Follett R., Stewart B. Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton: CRC Press, 1997. P. 207–223.
 45. Артемьева З.С., Федотов Г.Н. Состав функциональных пулов легкоразлагаемого органического вещества автоморфных зонального ряда почв Центра Русской равнины // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2013. № 4. С. 3–10.
 46. Peng X., Zhang B., Zhao Q., Horn R., Hallett P. Influence of types of restorative vegetation on the wetting properties of aggregates in a severely degraded clayey Ultisol in subtropical China // Geoderma. 2003. V. 115 (12). P. 313–324.
 47. Robert M., Hardy M., Elsass F. Crystallochemistry, properties and organization of soil clays derived from major sedimentary rocks in France // Clay Miner. 1991. V. 26. P. 409–420.
 48. Laird D., Nater E. Nature of the illitic phase associated with randomly interstratified smectite/illite in soils // Clays Clay Miner. 1993. V. 41. P. 280–287.
 49. Hubert F., Caner L., Meunier A., Lanson B. Advances in characterization of soil clay mineralogy using X-ray diffraction: from decomposition to profile fitting // Eur. J. Soil Sci. 2009. V. 60. P. 1093–1105.

Organic Matter of Water-Stable Macro- and Microaggregates of Haplic Chernozem in Contrasting Land Use Variants (Steppe and Fallow)

Z. S. Artemyeva^{a, #}, E. B. Varlamov^a, E. S. Zasukhina^b,
E. V. Tsomaeva^a, and B. M. Kogut^a

^aFederal Research Center V.V. Dokuchaev Soil Science Institute
per. Pyzhyovskii 7, Moscow 119017, Russia

^bFederal Research Center “Computer Science and Control” of RAS
ul. Vavilova 44, bld. 2, Moscow 119333, Russia

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

Organic matter of water-stable macro- (2–1 mm) and free microaggregates (<0.25 mm) isolated from the 2–1 mm air-dry macroaggregates of Haplic Chernozem in contrasting land use variants was studied by granulo-densimetric fractionation. Water-stable free microaggregates are localized in the soil matrix in contrast to microaggregates within macroaggregates localizing in the matrix of aggregates of different size. It was revealed that water-stable free microaggregates are only parts of disintegrated macroaggregates. The component composition of microaggregates unstable under the sonication (mWSA) within structural units of different sizes has been studied in detail. mWSA consists of organic core (occluded OM – LF_{oc}) and clay particles incrusting it. It is shown that composition of mWSA within macro- (WSA_{ma}) and free microaggregates (WSA_{mi}) is identical; they differ only in size, quantity and packing density. The size of mWSA in virgin conditions (steppe) is solely determined by its organic core (LF_{oc}) because the size of clay particles in macro- and free microaggregates is the same (~400 nm). The size of mWSA within free microaggregates is 1.7-fold, and their quantity is more than 1130-fold less than those within macroaggregates. The packing of such microaggregates (mWSA) within free microaggregates is denser (1.7-fold) in comparison with the packing within macroaggregates.

Key words: soil organic matter, structural units, granulo-densimetric fractionation, light fractions, clay, average diameter of clay particles.

УДК 631.416.4:631.82:631.862(571.54)

КАЛИЙНОЕ СОСТОЯНИЕ КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ В СУХОЙ СТЕПИ ЗАБАЙКАЛЬЯ

© 2022 г. А. С. Билтуев^{1,*}, Л. В. Будажапов¹, А. К. Уланов¹, Н. Н. Дармаева¹¹Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
ул. Третьякова, 25з, Улан-Удэ 670045, Россия

*E-mail: burniish@inbox.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 04.06.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

В условиях сухой степи Забайкалья в длительном стационарном полевом опыте изучено влияние удобрений на калийное состояние почв. Выявлены закономерности изменения содержания валового, обменного и обменного калия от вида удобрений и баланса калия в полевом севообороте. Существенное увеличение валового калия отмечено при внесении органических удобрений в дозах 20–40 т навоза/га, применение K40 на фоне P40K40 позволило сохранить его исходное содержание. Запасы обменного калия снижались в пахотном слое и возрастали в подпахотном. Содержание обменного калия зависело от баланса элемента в севообороте и содержания обменного калия. Увеличение среднегодового баланса калия на 1 кг/га пашни севооборота приводило к повышению содержания обменной формы на 0.09 мг/кг в пахотном слое почвы, в подпахотном – на 0.44 мг/кг. Выявлена сильная зависимость содержания обменной и обменной форм калия. Наибольшее количество обменного калия в пахотном горизонте отмечено при внесении 40 т навоза/га.

Ключевые слова: каштановая почва, длительный полевой опыт, система удобрений, калийное состояние.

DOI: 10.31857/S0002188122100040

ВВЕДЕНИЕ

Калийное состояние почв определяется минералогическим и гранулометрическим составом почвообразующих пород, а также степенью деградации калийсодержащих минералов в различных ее горизонтах. Антропогенное воздействие на калийный статус выражается в изменении содержания различных форм калия под воздействием обработки почв, возделывания культур и применения удобрений. При этом фактор удобрений обладает наиболее значимым влиянием [1, 2].

Пахотные каштановые почвы Бурятии в любой части профиля характеризуются большим количеством валового калия ($K_{\text{вал}}$), превышающим в абсолютном большинстве случаев 3%. Столь высокое содержание калия, не свойственное аналогичным почвам в европейской части страны, объясняется минералогическим составом пород и гранулометрическим составом почв. В питании растений участвуют обменный ($K_{\text{обм}}$) и обменный ($K_{\text{необм}}$) формы калия, формирующие актуальные и потенциальные его запасы. Содержание $K_{\text{необм}}$ составляет от 2.0 до 8.9% от $K_{\text{вал}}$, постепен-

но снижаясь с глубиной [3, 4]. Содержание $K_{\text{обм}}$ значительно уступает содержанию обменных форм, при этом зачастую с глубиной эта разница увеличивается. Обменный калий варьируют в пределах от 6 до 22 мг/100 г почвы, достигая максимального содержания в слое почвы 0–30 см. В старопашотных каштановых почвах Бурятии содержание обменной формы оценивают по методу Чирикова как повышенное [5]. Данный метод определения был принят в начале 1970-х гг. Агрохимслужбой “Бурятская” как стандартный метод определения обменного калия в каштановых почвах региона.

Калийное состояние почв обусловлено своеобразием почвообразующих факторов. Антропогенные воздействия как обработка почвы, выращивание культурных растений, внесение удобрений, севообороты создает новые условия функционирования почв [6–8].

Цель работы – в длительном стационарном полевом опыте в сухостепной зоне Бурятии определить закономерности изменения валового содержания, обменных и обменных форм калия при различных вариантах применения удобрений.

Таблица 1. Изменение содержания валового K_2O в слое 0–20 см каштановой почвы при длительном применении удобрений (1968–2018 гг.)

Вариант	Среднегодовое внесение на 1 га пашни севооборота	Баланс K_2O в севообороте, $\pm$ кг/га/год	$K_{вал}$, мг/кг	$\pm\Delta K_{вал}$	
				мг/кг	мг/кг/год
Исходная почва	—	—	35 200		
Контроль	—	–31	34 240	–960	–19.2
N40P40K40	K28	–34	34 880	–320	–6.4
Навоз 20 т/га	навоз 8 т	–10	35 680	480	9.6
Навоз 40 т/га	навоз 15 т	19	36 760	1560	31.2
Навоз 10 т/га + N50P25K60	навоз 4 т + K26	–15	34 960	–240	–4.8
HCP_{05}				300	

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Калийное состояние почв в агроценозе изучали в стационарном полевом опыте, заложенном в 1967 г. на типичной каштановой мучнисто-карбонатной среднemosной супесчаной сезонно-мерзлотной почве, обладающей низким потенциальным плодородием.

Опыт размещен на опытном поле Бурятского НИИСХ в южной сухостепной зоне Республики Бурятия. Для изучения калийного состояния почв из общей схемы опыта были выделены варианты: контроль (без удобрений), N40P40K40, навоз 20 т/га, навоз 40 т/га, навоз 10 т/га + N50P25K60. Минеральные удобрения (N_{aa} , P_{cd} , K_x) вносили ежегодно под весеннюю вспашку, органические (полуперепревший навоз КРС) и органо-минеральные — один раз в ротацию под перепашку пара. В качестве исходной почвы принят почвенный образец длительной залежи (1968–2019 гг.) на территории размещения длительного агрохимического опыта. Учетная площадь делянок 100 м², повторность в опыте четырехкратная. Агротехника возделывания культур — общепринятая для сухостепной зоны Республики Бурятия [8].

Почвенные образцы на анализ отбирали весной в паровом поле. Содержание калия в почве определяли: валового — разложением почвы фтористоводородной кислотой [9], обменный — по Пчёлкину [9], обменный — по Чирикову [9]. Статистическая обработка данных проведена стандартными методами, эмпирическое моделирование проводили на основе корреляционного анализа и построения парных моделей на основе метода наименьших квадратов [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание калия в каштановых почвах является наиболее стабильным показателем калийного состояния почв. Подобное связано с тем, что >90% калия находится в минеральном скелете почв, наиболее консервативном пуле почвенного калия. Длительное экстенсивное использование почв, возделывание сельскохозяйственных культур при отрицательном балансе калия приводит к уменьшению содержания более подвижных форм калия — обменной и необменной [1, 7, 11]. В целом за весь период исследования валовое содержание калия изменялось в соответствии с его балансом в севообороте (табл. 1), связь между этими показателями была очень сильной ($r = 0.93$).

Описательная модель влияния баланса калия в севообороте (B_K , кг/га) на содержание валового калия в различных вариантах опыта наиболее адекватно определялась линейным трендом (1):

$$K_{2O_{вал}} = 35909 + 42.6B_K, \quad R^2 = 0.88. \quad (1)$$

Достоверное снижение содержания валового калия от исходного отмечено в неудобренном варианте, а превышение — при применении органических удобрений — навоз в дозах 20 и 40 т/га в паровом поле.

Длительное внесение K40 в составе полного минерального удобрения и органо-минеральной системы, с внесением навоза 10 т/га + N50P25K60 позволило сохранить исходное содержание $K_{вал}$.

Систематическое применение удобрений влияло на содержание обменного и необменного калия в зависимости от систем удобрения (табл. 2). Возделывание полевых культур без удобрений привело к существенному снижению, а их применение — к сохранению или увеличению исходного количества обменного калия в пахотном слое

Таблица 2. Содержание обменной и необменной форм калия в различных слоях почвы при длительном применении различных систем удобрения в зернопаровом севообороте (среднее за 2017–2019 гг.)

Вариант	K_2O , мг/кг			
	0–20 см		20–40 см	
	обменный	необменный	обменный	необменный
Исходная почва	112	2100	104	1260
Контроль	79	1270	59	1450
N40P40K40	130	1460	67	1500
20 т/га навоза	127	1560	75	1640
40 т/га навоза	168	1870	96	1950
10 т/га + N50P25K60	108	1570	74	1460
НСП ₀₅	17	90	16	110

почвы. Наибольшее содержание $K_{обм}$ отмечено при внесении навоза 40 т/га, превышение над контролем составило 112, а над исходной почвой – 50%. Относительно меньший прирост показало внесение калия в составе минеральных трехкомпонентных удобрений, а также органических удобрений в дозе навоз 20 т/га. Обеспеченность растений калием в этих вариантах находилась на уровне высокого (по Чирикову). Наименьшие показатели содержания обменного калия на уровне средней обеспеченности отмечены в контроле. Другие варианты достоверно превышали контрольный и находились в градации повышенной обеспеченности обменным калием. При ранжировании по возрастанию содержания $K_{обм}$ в слое 0–20 см почвы варианты опыта размещались в ряду: контроль → навоз 10 т/га + N50P25K60 → навоз 20 т/га → N40P40K40 → навоз 40 т/га.

Подпахотный горизонт также активно участвовал в калийном питании растений. Этот горизонт более уплотнен и в меньшей степени обеспечен влагой, вносимые удобрения попадают в этот слой вследствие миграции солей калия по профилю [12]. Обеспеченность обменным калием в слое 20–40 см была на уровне средних показателей, лишь в варианте навоз 40 т/га – повышенной. В отличие от пахотного горизонта применение удобрений не позволило достичь порога исходного содержания обменного калия. В целом ранжирование вариантов по обеспеченности обменным калием в слое 20–40 см повторяло аналогичное ранжирование в слое 0–20 см.

Ближний резерв калийного питания ($K_{необм}$) участвует в питании растений в результате перехода в обменное и водорастворимое состояние, поэтому тенденция к его распределению в вариантах опыта также зависела от баланса калия в севообороте. При отрицательных его показателях

расходовался калий удобрений и обменный калий почвы, происходила интенсивная его мобилизация из необменной формы [13].

Снижение исходного содержания $K_{необм}$ в почве пашни было столь интенсивным, что его запасы в слое 0–20 см не могли восполнить ни минеральные, ни органические удобрения. Даже при положительном балансе калий удобрений повышал содержание обменной формы и лишь снижал потери необменной. Максимальное количество $K_{необм}$ отмечено в варианте применения навоза 40 т/га, минимальное – в контроле. При ранжировании по возрастанию содержания $K_{необм}$ в слое 0–20 см варианты опыта размещались в ряду: контроль → N40P40K40 → навоз 20 т/га → навоз 10 т/га + N50P25K60 → навоз 40 т/га.

В подпахотном горизонте в отличие от пахотного наблюдали увеличение содержания $K_{необм}$ относительно исходного состояния. Соотношение $K_{необм} : K_{обм}$ в исходной почве составляло 19 в слое 0–20 см и 12 – в 20–40 см. Длительное возделывание почв снизило его до 11–16 в пахотном горизонте, но увеличило до 20–25 в подпахотном. В этой связи отметили тенденцию к накоплению калия удобрений в необменном состоянии в слое 20–40 см и интенсивное его извлечение из слоя 0–20 см. Размеры использования запасов $K_{необм}$ из пахотного горизонта были больше, чем из подпахотного.

При сравнении равных по действующему веществу и срокам внесения (в паровое поле) систем удобрения (органической, навоз 20 т/га и органо-минеральной, навоз 10 т/га + N50P25K60) выявлено, что органический вариант удобрения накапливал больше обменного и необменного калия в различных слоях почвы.

Таблица 3. Корреляционные связи ($r \pm s_r$) содержания $K_{обм}$ в различных слоях почвы с другими показателями калийного режима ($n = 9$)

Фактор	Баланс K_2O , $\pm$ кг/га	$K_{необм}$ (0–20 см)	$K_{обм}$ (20–40 см)	$K_{необм}$ (20–40 см)
$K_{обм}$ (0–20 см)	0.86 ± 0.19	0.91 ± 0.22	0.88 ± 0.18	0.90 ± 0.17
$K_{обм}$ (20–40 см)	0.90 ± 0.16	0.77 ± 0.24	—	0.89 ± 0.29

Примечание. Связь существенна при $r \geq 0.67$ ($t_{факт} \geq 2.4$).

В опыте выявлено, что внесенные удобрения повышали в большей степени содержание обменной формы калия, чем необменной. При увеличении баланса доля необменного калия в общей сумме $K_{обм} + K_{необм}$ снижалась, а обменного — увеличивалась, т.е. темпы приращения обменной формы были больше, чем необменной.

Корреляционный анализ позволил установить сильное и достоверное влияние баланса калия в севообороте и запасов $K_{необм}$ на содержание $K_{обм}$ в пахотном и подпахотном горизонтах почвы (табл. 3).

Большая выборка позволила создать эмпирические модели определения основных форм калия каштановых почв в зернопаровом севообороте под воздействием удобрений. Эмпирическая модель совместного воздействия значимых факторов на содержание обменного калия имело вид множественной регрессии (2, 3):

$$\begin{aligned} K_{обм} (0-20 \text{ см}) = \\ = 0.09B_K + 0.14K_{необм} (0-20 \text{ см}) - 96.73, \quad (2) \\ R^2 = 0.84, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{обм} (20-40 \text{ см}) = \\ = 0.44B_K + 0.02K_{необм} (20-40 \text{ см}) - 45.56, \quad (3) \\ R^2 = 0.83. \end{aligned}$$

Общие тренды зависимости содержания калия в почве были довольно стабильными и зависели от баланса поступления/выноса калия в почве. Между тем амплитуды краткосрочных изменений в определенные периоды были приурочены к вариациям гидротермических условий, которые изменяли не только размеры калийного питания, но и кинетику обменной и необменной адсорбции и десорбции, влияя на скорость трансформации элемента между различными формами [14, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, содержание различных форм калия в каштановых почвах Бурятии при длительном применении удобрений изменялось в соответствии с балансом этого элемента в севообороте. Снижение валового количества калия отмече-

но в варианте без удобрений, сохранение исходного содержания — при применении $K40$ в составе полного минерального удобрения и органико-минерального удобрения навоз 10 т/га + $N50P25K60$, увеличение — при внесении органических удобрений в дозах 20–40 т навоза/га.

Обменный калий интенсивно расходовался из пахотного и подпахотного горизонтов, его содержание при применении удобрений зависело от баланса элемента в севообороте и содержания необменного калия. Изменение баланса на 1 кг/га и содержания необменного калия на 1 мг/кг сопровождалось изменением содержания обменной формы соответственно на 0.09 и 0.14 мг/кг в слое 0–20 см почвы. В слое 20–40 см эти показатели составляли 0.44 и 0.02 мг/кг. Максимальное количество обменного калия в пахотном горизонте каштановых почв отмечено при внесении дозы навоза 40 т/га.

Необменный калий интенсивно расходовался из пахотного слоя почвы. Систематическое применение удобрений не позволило восстановить исходного уровня его содержания. Наименьшие его потери относительно исходного содержания отмечены в варианте с внесением 40 т навоза/га (–224 мг/кг), наибольшее — в контроле (–825 мг/кг). В подпахотном горизонте, напротив, отмечено увеличение содержания $K_{необм}$ относительно исходного состояния при применении удобрений. Максимальное приращение содержания этой формы происходило в варианте применения навоза 40 т/га, минимальное — в контроле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамзиков Г.П., Маслова И.Я., Жуков Г.А., Дзикович К.М. Калий в земледелии Сибири // Проблемы агрохимического сырья Западной Сибири. Новосибирск: Наука, СО, 1985. С. 73–79.
2. Минеев В.Г. Агрохимия и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
3. Загузина Н.А., Рузавин Ю.Н. Минералогический состав почв Бурятской АССР и содержание в них различных форм соединений калия // Почвенные ресурсы Забайкалья. Новосибирск: Наука, СО, 1989. С. 59–66.

4. *Абидуева Т.Е., Соколова Т.А.* Глинистые минералы и калийное состояние степных почв Западного Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 101 с.
5. *Лапухин Т.П.* Система применения удобрений в полевых севооборотах на каштановых почвах сухой степи Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Барнаул, 2000. 40 с.
6. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы. М.: Высш. шк., 1964. 398 с.
7. *Гамзиков Г.П.* Эффективное использование удобрений под полевые культуры на почвах Западной Сибири // *Агрохимические исследования в Сибири*. Научные основы использования и охраны земельных ресурсов Сибири. Новосибирск, 1984. С. 4–24.
8. Система земледелия Республики Бурятия. Улан-Удэ: БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2018. 349 с.
9. *Важенин И.Г.* Методы определения калия в почве // *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука, 1975. С. 128–164.
10. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Либроком, 2009. 328 с.
11. *Якименко В.Н.* Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 16–24.
12. *Билтуев А.С., Лапухин Т.П., Будажапов Л.В.* Климат, плодородие почв и продуктивность зерновых культур в аридных условиях Забайкалья: состояние и прогноз. Улан-Удэ: Бурят. ГСХА, 2015. 141 с.
13. *Давлятишин И.Д., Лукманов А.А., Бадиков А.* Калий в пахотных почвах лесостепи // *Плодородие*. 2013. № 2 (71). С. 27–29.
14. *Sparks D.L.* Potassium dynamics in soils // *Adv. Soil Sci.* 1987. V. 6. P. 1–63.
15. *Барбер С.А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.

Potash State of Chestnut Soil with Prolonged Use of Fertilizers in the Dry Steppe of Transbaikalia

A. S. Biltuev^{a, #}, L. V. Budazhapov^a, A. K. Ulanov^a, and N. N. Darmaeva^a

^a*Buryat Scientific Research Institute of Agriculture
ul. Tretyakova 25z, Ulan-Ude 670045, Russia*

[#]*E-mail: burniish@inbox.ru*

In the conditions of the dry steppe of Transbaikalia, the effect of fertilizers on the potash state of soils was studied in a long-term stationary field experiment. The regularities of changes in the content of gross, non-exchangeable and exchangeable potassium from the type of fertilizers and the potassium balance in the field crop rotation are revealed. A significant increase in gross potassium was noted when organic fertilizers were applied in doses of 20–40 t/ha of manure, and the use of K40 against the background of P40K40 allowed to maintain its initial content. The reserves of non-exchangeable potassium decreased in the arable layer and increased in the sub-arable layer. The content of exchangeable potassium depended on the balance of the element in the crop rotation and the content of non-exchangeable potassium. An increase in the balance by 1 kg/ha of arable land led to an increase in the content of the exchange form by 0.09 mg/kg in the arable layer of the soil, and in the sub-arable layer – by 0.44 mg/kg. A strong dependence of the content of exchangeable and non-exchangeable forms of potassium was revealed. The greatest amount of exchangeable potassium in the arable horizon was observed when applying 40 t/ha of manure.

Key words: chestnut soil, long-term field experience, fertilizer system, potash state.

УДК 631.821:631.445.41:631.879

ИЗВЕСТКОВАНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ФИЛЬТРАЦИОННЫМ ОСАДКОМ САХАРНОГО ЗАВОДА

© 2022 г. А. Х. Куликова¹, Е. А. Черкасов², Д. А. Лобачев², К. Ч. Хисамова^{2,*}

¹Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина
432017 Ульяновск, бул. Новый Венец, 1, Россия

²Станция агрохимической службы “Ульяновская”
432025, Ульяновск, ул. Маяковского, 35, Россия

*E-mail: agrohimi_73@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

После доработки 02.06.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

В полевом опыте (2017–2021 гг.) изучили действие фильтрационного осадка АО “Ульяновский сахарный завод” в качестве известкового материала для нейтрализации кислотности чернозема выщелоченного на территории землепользования ООО “Хлебороб” Ульяновского р-на Ульяновской обл., характеризующегося высокой культурой земледелия. Дозы CaCO_3 рассчитывали по величинам гидролитической и обменной кислотности. Фильтрационный осадок вносили по схеме, варианты: 1 – контроль без внесения, 2 – CaCO_3 6.1 т/га, 3 – CaCO_3 4.5 т/га. Установили, что применение фильтрационного осадка позволило снизить кислотность почвы в зависимости от дозы внесения CaCO_3 в первый год на 1.1 ед. pH_{KCl} , гидролитическую кислотность – на 2.94 ммоль/100 г, в последующие годы – на 0.4–0.6 ед. pH_{KCl} и 2.27–2.88 ммоль/100 г почвы соответственно. Известкование почвы фильтрационным осадком значительно улучшало питательный режим чернозема выщелоченного. Содержание доступных форм фосфора и калия на 3-й год исследования увеличилось по сравнению с исходным уровнем на 30–50 и 11–32 мг/кг почвы соответственно. В первый год внесения фильтрационного осадка более высокая урожайность ячменя (6.40 т/га) сформировалась в варианте с внесением мелиоранта в дозе 4.5 т CaCO_3 /га, во 2-й и 3-й годы наблюдали одинаковую прибавку урожайности озимой и яровой пшеницы на 0.34, 0.48 и 0.47 т/га соответственно в зависимости от варианта опыта. В 2020 г. наиболее высокую в данном опыте прибавку урожайности зерна яровой пшеницы наблюдали при внесении в почву 6.1 т CaCO_3 /га (0.75 т/га). В 2021 г. более высокую прибавку урожайности семян подсолнечника (0.28 т/га) отметили при применении мелиоранта в дозе 4.5 т/га.

Ключевые слова: фильтрационный осадок, ячмень, озимая и яровая пшеница, подсолнечник, урожайность, экономическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188122100052

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения урожайности сельскохозяйственных культур и получения экологически безопасной и качественной продукции была и остается главной в обеспечении продовольственной безопасности страны. Одним из основных факторов, ограничивающих повышение их продуктивности, является наличие в регионах активного земледелия больших площадей кислых почв. В частности, на 01.01.2022 г. кислые почвы в Ульяновской обл. составили 728.6 тыс. га от обследованной площади сельскохозяйственных угодий в 1491.2 тыс. га, или 48.8% пашни. Более того, в связи с практическим прекращением объемов известкования в конце прошлого века и по настоящее время процесс подкисления почв

пашни продолжается, площади с нейтральной и близко к нейтральной реакцией среды сокращаются, соответственно увеличиваются площади среднекислых почв.

Нет необходимости доказывать, что кислые почвы губительны для возделываемых культур и полезной микрофлоры. В них усложняется поступление кальция в растения, сосуды корневых волосков закупориваются, угнетается деятельность нитрификаторов, азотфиксаторов, увеличивается подвижность тяжелых металлов, повышается содержание в почве подвижных алюминия и марганца до токсичных количеств [1]. Известно также, что эффективным, радикальным средством устранения кислотности является из-

весткование почв, т.е. внесение материалов, содержащих CaCO_3 и MgCO_3 [2–5].

Ульяновская область богата месторождениями известковых материалов. Например, мел Шиловского месторождения содержит до 98.5% CaCO_3 и MgCO_3 . Однако добыча мела в целях известкования кислых почв приостановлена. В сложившейся обстановке и крайней необходимости устранения кислотности почв хорошей альтернативой известки могут стать отходы сахарного производства. Сахарная промышленность относится к материалоемким видам производства, в которых объем сырья и основных вспомогательных производственных материалов в несколько раз превышает выход готовой продукции. Соответственно велик объем побочных продуктов и отходов и следовательно появляется проблема их утилизации. Таким отходом является фильтрационный осадок (дефекат), содержащий в своем составе значительное количество углекислого кальция и углекислого магния. Наличие на территории области крупного сахарного завода с ежегодным объемом фильтрационного осадка >20 тыс. т предполагает возможность эффективного использования его в качестве известкового материала.

В связи с вышеизложенным цель работы — изучение эффективности известкования чернозема выщелоченного с pH_{KCl} 5.52 фильтрационным осадком Ульяновского сахарного завода, в том числе влияния его на агрохимические показатели и урожайность сельскохозяйственных культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на территории землепользования ООО “Хлебороб” Ульяновской обл. Почва опытного поля — чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый с содержанием гумуса по Тюрину (в модификации ЦИНАО) — 6.9%, подвижного фосфора (P_2O_5 по Чирикову) — 95 мг/кг, обменного калия (K_2O по Чирикову) — 128 мг/кг, серы — 5.6 мг/кг; pH_{KCl} — 5.22, H_f — 6.65 ммоль/100 г, Ca — 22.0 ммоль/100 г, Mg — 4.87 ммоль/100 г, Cu — 5.2 мг/кг, Mn — 20.8 мг/кг, Zn — 0.42 мг/кг почвы, сумма поглощенных оснований — 46.1 ммоль/100 г. Содержание солей тяжелых металлов в валовой и подвижной формах не превышало ПДК ни одного элемента.

Полевой опыт заложен в 3-х вариантах и в четырехкратной повторности осенью 2016 г. по следующей схеме, варианты: 1 — контроль — без удобрений и мелиоранта, 2 — внесение фильтра-

ционного осадка (CaCO_3) в дозе, рассчитанной по гидролитической кислотности (H_f) — 6.1 т/га, 3 — внесение фильтрационного осадка (CaCO_3) в дозе, рассчитанной по обменной кислотности (pH) — 4.5 т/га. Общая площадь делянки составляла 88 м² (11 × 8 м), учетная — 54 м² (9 × 6 м), соответственно, общая площадь одной повторности — 264 м², всего опытного участка — 1056 м². В качестве известкового материала использовали фильтрационный осадок АО “Ульяновский сахарный завод”, расстояние перевозки мелиоранта — 50 км.

Фильтрационный осадок образуется при очистке свекловичного сока путем добавления к нему известкового раствора. Его выход от веса переработанной массы составляет 10–12%. Фильтрационный осадок, полученный на заводе в качестве отхода свеклосахарного производства не раздельного способа приготовления, имел высокую влажность до 40–60%. Однако при хранении на специальных картах-отстойниках его влажность значительно уменьшалась (до 17–20%). По мере снижения в указанном материале влажности в нем возрастало относительное содержание органических и минеральных веществ. В пересчете на сухое вещество в нем могло содержаться до 70–80% углекислого кальция и углекислого магния, 0.2–0.4% — азота, 0.15–0.5% — P_2O_5 , 0.3–0.5% — K_2O , а также другие макро- и микроэлементы и до 10–20% органических веществ. В фильтрационном осадке АО “Ульяновский сахарный завод”, использованном при проведении опыта, содержание $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ составляло 43.8%, органического вещества — 12.6%, серы — 74 мг/кг, азота — 0.17%, фосфора (P_2O_5) — 0.41%, калия (K_2O) — 0.43%, микроэлементов: Zn — 6.6, Cu — 1.1, Mn — 43.3 мг/кг. Фильтрационный осадок находился на хранении более 3-х лет. Фильтрационный осадок вносили осенью 2016 г. вручную, равномерно распределяя по поверхности почвы, заделку осуществляли дисковыми боронами (БДМ 4 × 4) на глубину 14–16 см.

Определение дозы мелиоранта проводили двумя способами: по величине гидролитической кислотности и по ожидаемому сдвигу pH_{KCl} от внесения 1 т CaCO_3 [6]. По величине гидролитической кислотности дозу CaCO_3 определяли по формуле: доза $\text{CaCO}_3 = 0.05 \times H_f \times d \times h$, где H_f — гидролитическая кислотность, ммоль/100 г = 5.11, d — плотность почвы, г/см³ = 1.09, h — глубина пахотного слоя почвы, см = 22. Доза $\text{CaCO}_3 = 0.05 \times 5.1 \times 1.09 \times 22 = 6.11$ т/га. Доза фильтрационного осадка при этом составила 20.1 т/га. Доза CaCO_3 , определенная по нормативам ожидаемого

повышения pH_{KCl} от внесения 1 т $CaCO_3$, учитывающих содержание гумуса и гранулометрический состав (для данной почвы равна 0.09 ед. pH) составила: 4.5 т/га (0.4 : 0.09). При этом величину pH_{KCl} планировали довести до 5.6 ед., т.е. близкой к нейтральной, планируемая величина сдвига pH при этом составила: $pH = 5.6 - 5.2 = 0.4$ ед. Доза фильтрационного осадка при данном расчете равна 14.8 т/га. Таким образом, доза $CaCO_3$, определенная по величине H_T , составила 6.1, по величине pH_{KCl} — 4.5 т/га.

За годы исследования на опытном участке возделывали следующие культуры: яровой ячмень сорта Камашевский (2017 г.), озимую пшеницу сорта Марафон (2018 г.), яровую пшеницу сорта Бурлак (2019 и 2020 г.), гибрид подсолнечника Саванна (2021 г.).

Метеорологические условия вегетационных периодов по годам исследования имели следующие особенности: весной 2017 г. сложились не характерные для области прохладные погодные условия и наблюдали превышение нормы выпавших осадков на 13.5 мм. Сумма эффективных температур $>10^\circ C$ за вегетационный период составила $1617^\circ C$ (при норме $1773^\circ C$). В 2018 г. средняя температура мая составила $15.6^\circ C$ (на $2.1^\circ C$ больше нормы). Осадков выпало в 2 раза меньше среднегодовых показателей. В июне и июле температура воздуха была незначительно выше нормы, что отразилось на урожайности культур. 2019 г. отличался переменными погодными условиями: недостаток влаги в начале вегетации культур и избыток — во второй половине (превышение нормы в 2.6 раза). Среднесуточные температуры соответствовали норме. В 2020 г. в начале вегетации культур отмечали небольшое превышение среднемесячных температур. В июне выпала двойная норма осадков. Вегетационный период 2021 г. характеризовался превышением температурных норм особенно в июле и неравномерным выпадением осадков. Тем не менее, в среднем условия вегетации соответствующих культур были относительно благоприятными.

Отбор образцов почвы для определения агрохимических показателей проводили во время уборки возделываемых культур. Организацию полевого опыта, проведение лабораторных анализов и наблюдений осуществляли по общепринятым методикам и ГОСТам. Все анализы почвенных и растительных образцов проводили в аккредитованной агрохимической лаборатории САС “Ульяновская”, имеющей аттестат аккредитации (№ RA.RU. 510251). Обменную кислотность определяли по ГОСТ 26483-85, гидролити-

ческую кислотность — по ГОСТ 26212-91, содержание органического вещества (гумуса) — по (ГОСТ 26213-91), азота нитратного — по ГОСТ 26951-86, азота обменного аммония — по ГОСТ 26489-85, подвижных формы фосфора и калия — по методу Чирикова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26204-91). Обработку данных проводили в соответствии с методическими указаниями и инструкциями научных учреждений и организаций МСХ РФ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика кислотности почвы. Поглотительная способность почвы является одним из главных ее свойств. Среди поглощенных катионов преобладает кальций. Последнее связано с его высокой способностью к внедрению и слабой способностью к вытеснению из почвенного поглощающего комплекса (ППК). Ион водорода, несмотря на малые концентрации его в почвенном растворе, также способен накапливаться в почвах в больших количествах. Присутствие его в ППК обуславливает кислую реакцию среды почвенного раствора. При внесении в кислую почву $CaCO_3$ происходит реакция обмена и нейтрализация ее кислотности [7, 8].

Результаты исследования показали, что за весь период наблюдений (2016–2021 гг.) прослежено устойчивое снижение избыточной кислотности почвы. Уже в первый год (2017 г.) в варианте с внесением $CaCO_3$ в дозе 6.1 т/га снижение обменной кислотности составило 1.1 ед. pH_{KCl} . В последующие годы оно составляло 1.1, 0.6, 0.5, 0.5 ед. pH соответственно (табл. 1). В варианте внесения $CaCO_3$ в дозе 4.5 т/га также наблюдали устойчивое раскисление почвы, которое составило в 2017 г. 1.1 ед. pH_{KCl} , в последующие годы — 0.4, 0.5, 0.4 ед. pH соответственно.

Гидролитическая кислотность определяется количеством ионов водорода, переходящими в раствор при взаимодействии с почвой гидролитически щелочных солей, и включает менее подвижные ионы водорода, не вытесняемые нейтральными солями [8–10]. Показано, что в варианте внесения $CaCO_3$ в дозе 6.1 т/га сдвиг H_T составил в 2017 г. 2.94 ммоль/100 г, в последующие годы — 2.71, 2.88, 2.27 и 2.53 ммоль/100 г соответственно. В варианте, где вносили $CaCO_3$ в дозе 4.5 т/га, сдвиг гидролитической кислотности в 2017 г. произошел на 3.54 ммоль/100 г, в последующие годы — на 1.63, 2.25, 2.19 и 1.9 ммоль/100 г. Произошедшие изменения, по-видимому, были обусловлены тем, что карбонат кальция в чистом

Таблица 1. Динамика обменной и гидролитической кислотности пахотного слоя чернозема выщелоченного при внесении фильтрационного осадка

Вариант		Исходный показатель	ммоль/100 г почвы				
			2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Контроль без внесения	pH _{KCl}	5.2	5.2	5.0	5.0	5.3	5.2
	H _T	5.0	3.5	5.5	3.9	3.8	5.1
CaCO ₃ 6.1 т/га	pH _{KCl}	5.2	6.3	6.3	5.8	5.7	5.7
	H _T	4.9	2.0	2.2	2.0	2.6	2.4
CaCO ₃ 4.5 т/га	pH _{KCl}	5.1	6.2	5.5	5.6	5.5	5.5
	H _T	5.3	1.8	3.7	3.1	3.1	3.4
HCP ₀₅			0.6	0.5	0.4	0.5	0.5
			1.2	1.2	1.5	1.5	1.6

виде нерастворим, но при внесении в почву, где в почвенном растворе постоянно присутствует диоксид углерода (CO₂), постепенно растворяется вследствие образования растворимого гидрокарбоната кальция: CaCO₃ + H₂O + CO₂ = Ca(HCO₃)₂, т.е. происходит процесс раскисления. Кроме того, необходимо отметить, что в присутствии воды, содержащейся в фильтрационном осадке (подсушенном до 20%), происходило значительное растворение CaCO₃.

Питательный режим. Формирование питательного режима почвы зависит в основном от активности микроорганизмов. В результате их деятельности происходит трансформация питательных веществ и высвобождение элементов питания в почвенный раствор [11, 12].

Азот, фосфор и калий являются необходимыми элементами питания сельскохозяйственных культур, соответственно в товарной продукции они содержатся в определенном соотношении. Растения выше перечисленные макроэлементы извлекают из почвы, величина содержания их доступных форм определяет продуктивность агро- и биоценозов [13, 14].

Внесение фильтрационного осадка оказало положительное влияние на питательный режим почвы. Показано (рис. 1), что на протяжении всех лет исследования сохранялось преимущество варианта внесения CaCO₃ в дозе 6.1 т/га. Несмотря на потребление макроэлементов на формирование урожая, в варианте с внесением фильтрационного осадка агрохимические показатели были более оптимальными для культур по сравнению с контролем. Последнее было обусловлено тем, что при внесении дефеката активизировалась биологическая активность почвы и жизнедеятельность полезных микроорганизмов [15–19].

За 2016–2021 гг. количество подвижных форм азота, фосфора и калия в почве было различным и менялось в зависимости от года. При этом на следующий год после внесения мелиоранта отмечали снижение содержания доступных форм фосфора при внесении CaCO₃ в дозе 6.1 т/га на 14%, 4.5 т/га – на 6.3%. При поступлении кальция в почву происходило связывание подвижного фосфора с образованием фосфатов кальция, что приводило к временному снижению доступности данного элемента питания для растений. В последующие годы доступность подвижного фосфора возрастала соответственно в экспериментальных вариантах на 11.9–39.6 и 6.3–53.7% (рис. 1а).

Обращает на себя внимание значительное улучшение азотного питания озимой пшеницы при внесении в почву фильтрационного осадка в 2017 г., особенно дозы 6.1 т/га. Преимущество данного варианта сохранялось в течение всей вегетации культуры. Несмотря на усиленное питание растений элементом, содержание минерального азота в пахотном слое почвы к концу вегетации составляло 20.3 мг/кг, что было на 14% больше, чем в контроле (рис. 1б). В последующие годы исследования наблюдали изменения содержания минерального азота в почве, однако выявленная закономерность сохранялась.

Обращает на себя внимание содержание обменного калия (рис. 1в) на третий и последующие годы действия мелиоранта по сравнению с 2017 г. При этом отметили повышение его содержания в вариантах от 13.3 до 456%. Следовательно, можно утверждать наличие пролонгированного действия фильтрационного осадка на свойства почвы.

Среди наиболее необходимых элементов, играющих жизненно важную роль в питании сельскохозяйственных культур, сера (S) занимает особое место. Хотя количество потребления ее расте-

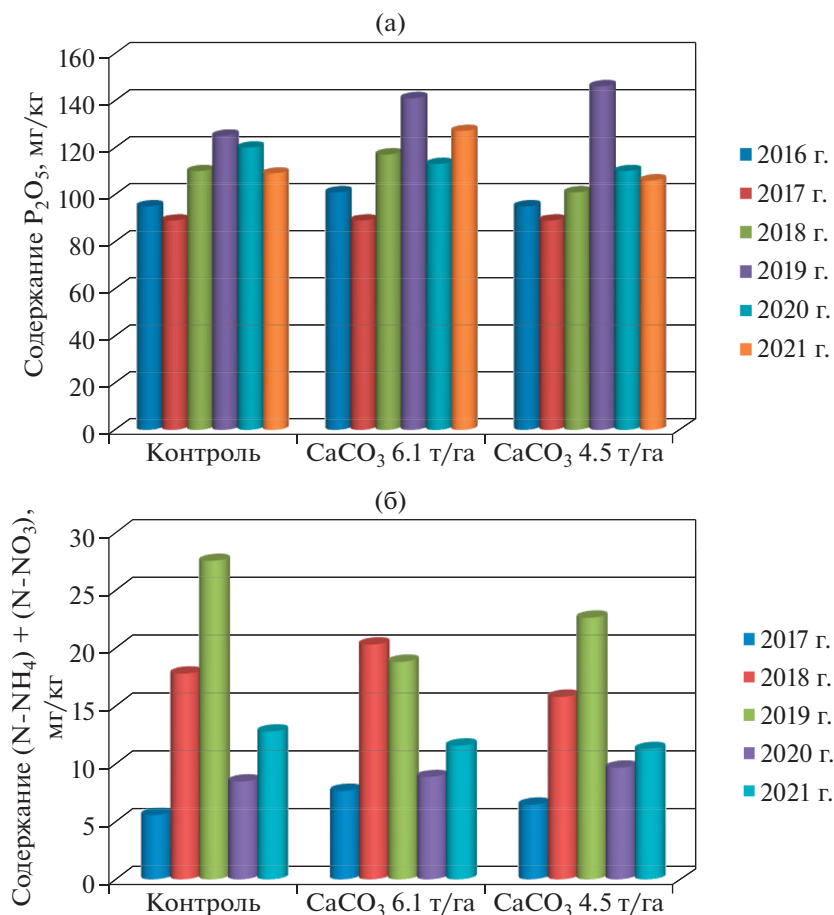


Рис. 1. Влияние фильтрационного осадка на содержание доступного фосфора (а), минерального азота (N-NH₄) + (N-NO₃) (б) и обменного калия (в) и серы (г) в пахотном слое чернозема выщелоченного, мг/кг.

ниями не столь велико по сравнению с азотом, фосфором и калием, для полноценного роста и развития растений она имеет важное значение. Заменить ее другими элементами питания невозможно [20]. За годы исследования прослежена тенденция к увеличению содержания доступной серы при внесении в почву CaCO₃ по сравнению с контрольным вариантом (рис. 1г). Более высокое содержание серы отмечали в 2018 г., содержание ее в вариантах 2 и 3 было больше на 3.4 и 4.3 мг/кг относительно исходного (2016 г.). Последнее, по-видимому, было обусловлено улучшением микробиологической активности почвы. Известно, что органические и неорганические формы серы под влиянием деятельности микроорганизмов подвергаются в почве различным превращениям. Направление трансформаций соединений серы регулируется в основном факторами внешней среды. Органические соединения серы могут быть разрушены и минерализованы. В определенных условиях восстановленные неорганические соединения серы подвергаются окислению

микроорганизмами, а окисленные (сульфаты, сульфиты и др.), наоборот, могут быть восстановлены в H₂S [15, 16].

Содержание гумуса. Содержание и запасы гумуса традиционно служат критерием оценки почвенного плодородия. Гумус является непосредственным продуктом почвообразования, что придает почве новое свойство — плодородие, которое играет основную роль в процессе жизнедеятельности растений и создания ими органического вещества из компонентов минеральных веществ [21, 22]. Поддержание бездефицитного баланса органического вещества в пахотных почвах — одна из приоритетных задач в земледелии. Динамика содержания гумуса по годам в зависимости от внесения фильтрационного осадка представлена в табл. 2. В первый год после внесения дефеката ожидаемо не произошло изменений в содержании гумуса. Однако в последующие годы наметилась устойчивая тенденция к стабилизации его содержания в пахотном слое при внесении фильтрационного осадка.

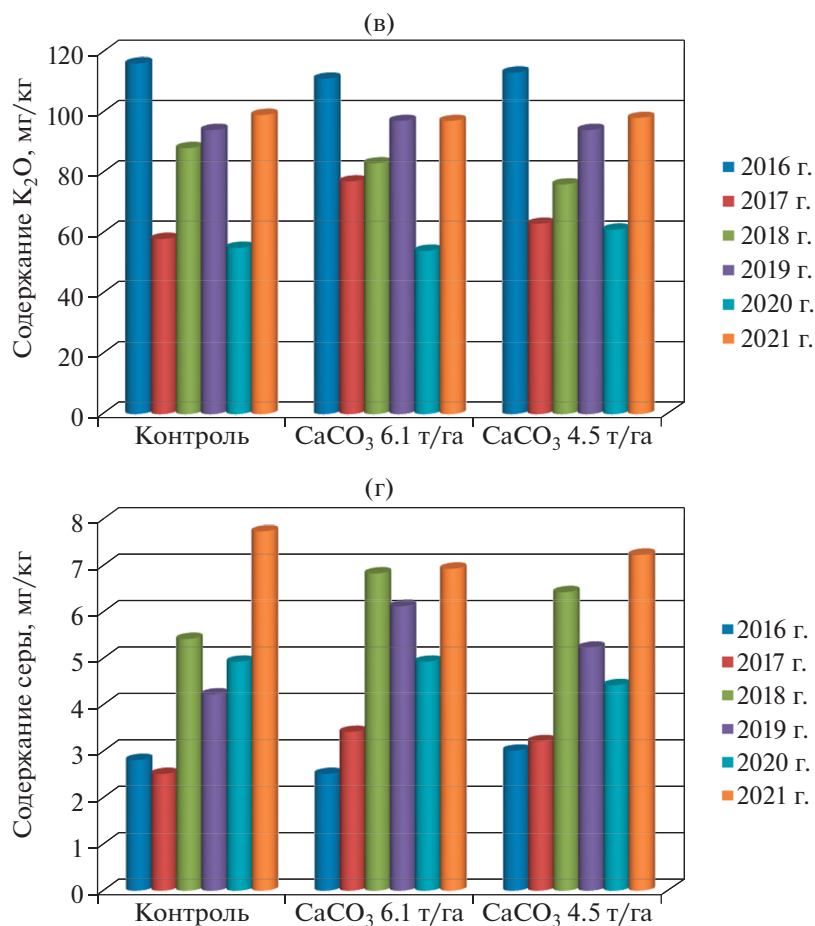


Рис. 1. Окончание

По мнению ряда авторов [23–25], внесение фильтрационного осадка оказывает положительное влияние на количество бактерий, использующих органический и минеральный азот, и уменьшает численность грибной микрофлоры в 2 раза. Показано, что коэффициент минерализации во всех вариантах проведенного опыта был равен ≈ 1 , что свидетельствовало о сбалансированности процессов минерализации, синтеза и ресинтеза органического вещества при известковании кислых почв.

Урожайность культур. Несомненно, интегральным показателем реакции растений на условия возделывания служит продуктивность культуры [21]. За период наблюдений урожайность зерна возделываемых культур в вариантах с применением фильтрационного осадка была больше, чем в контрольном варианте, за исключением 2017 г. (табл. 3). Последнее вполне объяснимо слабым взаимодействием мелиоранта с почвой в первый год внесения, тем более ячмень – культура короткого вегетационного периода. В 2018 г.

Таблица 2. Влияние фильтрационного осадка на содержание гумуса в пахотном слое чернозема выщелоченного, %

Вариант	2016 г. (до закладки опыта)	Годы исследования				
		2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Контроль без внесения	7.05	6.53	7.05	7.42	7.44	7.13
$CaCO_3$ 6.1 т/га	7.15	6.84	6.72	7.13	6.81	7.05
$CaCO_3$ 4.5 т/га	7.13	6.55	7.08	7.54	7.16	7.23
HCP_{05}	0.31	0.32	0.26	0.56	0.42	0.34

Таблица 3. Урожайность культур в зависимости от применения фильтрационного осадка (2017–2021 гг.)

Вариант	Ячмень, 2017 г.		Озимая пшеница, 2018 г.		Яровая пшеница, 2019 г.		Яровая пшеница, 2020 г.		Подсолнечник, 2021	
	т/га	± к контролю	т/га	± к контролю	т/га	± к контролю	т/га	± к контролю	т/га	± к контролю
Контроль без внесения	5.91		1.76		4.40		3.92		4.17	
CaCO ₃ 6.1 т/га	5.59	–0.32	2.10	+0.34	4.88	+0.48	4.67	+0.75	4.33	+0.16
CaCO ₃ 4.5 т/га	6.40	+0.49	2.10	+0.34	4.87	+0.47	4.25	+0.33	4.45	+0.28
HCP ₀₅	0.46		0.29		0.41		0.55		0.30	

Таблица 4. Экономическая эффективность применения фильтрационного осадка при возделывании зерновых культур (2017–2020 гг.)

Вариант	Ячмень (2017 г.)		Озимая пшеница (2018 г.)		Яровая пшеница (2019 г.)		Яровая пшеница (2020 г.)	
	условный чистый доход, тыс. руб./га	рентабельность, %	условный чистый доход, тыс. руб./га	рентабельность, %	условный чистый доход, тыс. руб./га	рентабельность, %	условный чистый доход, тыс. руб./га	рентабельность, %
Контроль без внесения	49.0	225	6.3	37	48.4	200	42.4	151
CaCO ₃ 6.1 т/га	43.5	183	10.2	60	56.6	234	56.0	200
CaCO ₃ 4.5 т/га	53.6	231	10.2	60	56.6	234	48.5	173

урожайность зерна озимой пшеницы в контроле составила 1.76 т/га, в вариантах с внесением фильтрационного осадка – по 2.10 т/га, прибавка урожайности зерна составила 0.34 т/га. В 2019 г. прибавка урожайности зерна яровой пшеницы в вариантах 2 и 3 от внесения фильтрационного осадка составила по 0.48 и 0.47 т/га соответственно относительно контрольного варианта (4.40 т/га). В 2020 г. на опытном участке была посеяна яровая пшеница сорта Бурлак. Наиболее высокую урожайность отметили в варианте внесения CaCO₃ в дозе 6.1 т/га (4.67 т/га), что было на 0.75 т/га больше контроля. В варианте внесения CaCO₃ в дозе 4.5 т/га прибавка урожайности зерна яровой пшеницы была на уровне 0.33 т/га. Урожайность гибрида подсолнечника Саванна в 2021 г. была более высокой в варианте внесения CaCO₃ в дозе 4.5 т/га и составила 4.45 т/га, что было на 0.28 т/га больше контроля. Повышение урожайности культур, возделываемых при внесении фильтрационного осадка, свидетельствовало о том, что данный мелиорант способствовал созданию благоприятных почвенных условий (снижению избыточной кислотности, повышению доступности элементов

питания) для роста, развития и формирования урожая [17, 19].

Экономическая эффективность. Оценка экономической эффективности применения агротехнических приемов является важнейшим критерием, определяющим рентабельность применения новых форм мелиорантов. Расчет экономической эффективности использования фильтрационного осадка в качестве мелиоранта для зерновых культур представлен в табл. 4. При расчете экономической эффективности технологий возделывания сельскохозяйственных культур учитывали все производственные затраты и стоимость продукции. Исходя из этих данных рассчитывали остальные показатели. Из представленных данных следует, что применение фильтрационного осадка (дефеката) Ульяновского сахарного завода для известкования кислых почв было рентабельным: во все годы исследования условно чистый доход и уровень рентабельности возделывания сельскохозяйственных культур превышали контрольный вариант на 3.9–13.6 тыс. руб./га или на 6–49%.

ВЫВОДЫ

1. Использование фильтрационного осадка Ульяновского сахарного завода в качестве известкового материала сопровождалось устойчивым пролонгированным снижением избыточной кислотности почвы: за 2016–2021 гг. при внесении дозы CaCO_3 6.1 т/га снижение обменной кислотности составило соответственно по годам 1.1, 1.1, 0.6, 0.5, 0.5 ед. pH_{KCl} , при применении дозы CaCO_3 4.5 т/га — 1.1, 0.4, 0.5, 0.4, 0.4 ед. pH_{KCl} . Гидролитическая кислотность в варианте 2 (доза 6.1 т CaCO_3 /га) уменьшилась на 2.94, 2.71, 2.88, 2.27, 2.53 ммоль/100 г. почвы, в варианте 3 (доза 4.5 т CaCO_3 /га) — на 3.54, 1.63, 2.25, 2.19, 1.9 ммоль/100 г почвы соответственно годам взаимодействия мелиоранта с почвой.

2. Известкование фильтрационным осадком благоприятно влияло на питательный режим почвы: содержание минеральных соединений азота, доступных форм фосфора и обменного калия, а также серы в пахотном слое чернозема выщелоченного поддерживалось на более высоком уровне в течение всех 5-ти лет эксперимента, несмотря на усиленное питание ими возделываемых культур. В варианте 2 при внесении фильтрационного осадка в дозе 6.1 т CaCO_3 /га содержание доступного фосфора находилось в пределах 87–141 мг/кг, обменного калия — 77–143 мг/кг, в варианте 3 (внесение фильтрационного осадка в дозе 4.5 т CaCO_3 /га) количество доступного фосфора изменялось от 89 до 146, обменного калия — от 63 до 128 мг/кг, минерального азота — от 1.2 до 21.9, серы — от 0.2 до 4.9 мг/кг почвы.

3. Известкование почвы фильтрационным осадком позволило стабилизировать содержание гумуса в пахотном слое чернозема выщелоченного относительно исходных показателей.

4. Прибавка урожайности зерновых культур (ячменя, яровой и озимой пшеницы) за годы исследования составила от 0.34 до 0.75 т/га и семян подсолнечника (2021 г.) — от 0.16 до 0.28 т/га. Наиболее высокая прибавка урожайности зерна яровой пшеницы сформировалась в 2020 г. в варианте внесения CaCO_3 в дозе 6.1 т/га и составила 0.75 т/га.

5. Использование фильтрационного осадка в качестве мелиоранта в технологии возделывания сельскохозяйственных культур позволило получить продукцию с более высоким уровнем рентабельности. Уровень рентабельности производства зерновых культур с применением фильтрационного осадка был на 6–49% больше контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шильников И.А., Аканова Н.А., Зеленов Н.А. Известкование — главный фактор сохранения плодородия почв и повышения продуктивности сельскохозяйственных культур // Достиж. науки и техн. АПК. 2008. № 1. С. 21–23.
2. Ивойлов А.В. Эффективность удобрения и известкования выщелоченных черноземов // Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 264 с.
3. Liming acid soils in central. B.C. Minisry of agriculture Angus Campbell Road Abbotsford, B.C. Revised December, 2015. 5 p.
4. Jaskulskal D., Koberski M. Effect of limiting on the change of some agrochemical soil properties in a long-term fertilization experiment // Plant Soil Environ. 2014. V. 60. №. 4. P. 146–150.
5. An Y.H., Dickinson R.B., Doyle R.J. Mechanisms of bacterial adhesion and pathogenesis of implant and tissue infections // Handbook of bacterial adhesion: principles, methods, and applications. 2000. № 2. P. 1–27.
6. Рекомендации по известкованию кислых почв. МСХ СССР ВПНО “Союзсельхозхимия” // М.: Колос, 1982. 37 с.
7. Гасанова Е.С., Кожокина А.Н., Мязин Н.Г., Стекольников К.Е. Изменение показателей ППК и гумусного состояния чернозема выщелоченного при многолетнем внесении удобрений и известковании // Вестн. Воронеж. ГАУ. 2018. № 4 (59). С. 13–21.
8. Осипов А.И. История и практические аспекты известкования кислых почв в России // Агрохим. вестн. 2019. № 3. С. 28–36.
9. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79–94.
10. Прокопова Л.В., Коноплина Е.А. Воздействие фильтрационных осадков на почвенно-биотический комплекс чернозема выщелоченного // Вестн. Воронеж. ГАУ. 2011. № 1 (28). С. 31–35.
11. Козлов А.В., Куликова А.Х., Селицкая О.В., Уромова И.П. Устойчивость микробиологической активности дерново-подзолистой почвы в условиях применения диатомита и цеолита // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2019. № 46. С. 26–47.
12. Кирпичников Н.А. Последствие фосфорных удобрений на фосфатное состояние дерново-подзолистой почвы и урожайность озимой пшеницы при известковании // Плодородие. 2021. № 3 (120). С. 49–51.
13. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Эффективность комплекса агрохимических средств в зернотравяно-пропашных севооборотах // Агрохимия. 2016. № 7. С. 44–51.
14. Mokolobate M.S., Haynes R.J. Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil // Biol. Fertil. Soils. 2002. T. 35. № 2. С. 79–85.
15. Свирина В.А., Артюхова О.А. Азотный режим и биологическая активность почвы под влиянием известкования и удобрений // Плодородие. 2019. № 5 (110). С. 3–6.

16. Павлова О.Ю., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М. Влияние известкования различными мелиорантами на величину pH_{KCl} в свежепроизвесткованных дерново-подзолистых почвах (по данным лабораторных опытов) // *Агрохимия*. 2020. № 10. С. 58–64.
17. Балабко П.Н., Славянский А.А., Хуснетдинова Т.И., Головков А.М., Черкашина Н.Ф., Карпова Д.В., Выборова О.Н. Использование фильтрационного осадка (дефеката) в растениеводстве // *АгроЭко-Инфо*. 2013. № 1 (12). С. 6.
18. Житин Ю.И., Стекольников Н.В. Влияние отходов сахарного производства на состояние чернозема выщелоченного и продуктивность культур // *Земледелие*. 2013. № 6. С. 23–25.
19. Черкасов Е.А., Куликова А.Х., Лобачев Д.А. Эффективность фильтрационного осадка Ульяновского сахарного завода в качестве мелиоранта кислых почв // *Вестн. Ульянов. ГСХА*. 2019. № 4 (48). С. 61–65.
20. Черкасов Е.А., Лобачев Д.А., Захарова Д.А. Содержание подвижной серы в почвах сельскохозяйственных угодий Ульяновской области // *Вестн. Ульянов. ГСХА*. 2018. № 1 (41). С. 54–59.
21. Захаров Н.Г., Хайртдинова Н.А. Формирование урожайности и качества зерна озимой пшеницы в условиях среднего Поволжья // *Вестн. Ульянов. ГСХА*. 2020. № 3 (51). С. 41–46.
22. Донских И.Н., Аишрам М.Д., Мязин Н.Г. Влияние длительного применения разных систем удобрения на групповой состав фосфатов выщелоченного чернозема (в условиях Центрально-Черноземного района) // *Агрохимия*. 2008. № 5. С. 5–10.
23. Налиухин А.Н., Власова О.А., Ерегин А.В., Белозеров Д.А., Рыжакова А.А., Рябков А.В. Продуктивность полевого севооборота при различных системах удобрения и известковании // *Плодородие*. 2020. № 4 (115). С. 30–34.
24. Лукманов А.А., Хузина Г.К. Эффективность известкования черноземов Республики Татарстан // *Агротех. вестн.* 2020. № 1. С. 3–7.
25. Нурлыгаянов Р.Б., Гиниятова Ф.Ф., Зайнагабдинов А.Ф., Хаернасов И.И. Известкование кислых почв: прошлое и настоящее // *Вестн. Башкир. ГАУ*. 2021. № 1 (57). С. 34–41.

Liming of Leached Chernozem Filtration Sludge of a Sugar Factory

A. H. Kulikova^a, E. A. Cherkasov^b, D. A. Lobachev^b, and K. H. Hisamova^{b, #}

^a*Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
bul. Novy Venets 1, Ulyanovsk 432017, Russia*

^b*Agrochemical Service Station "Ulyanovsk"
ul. Mayakovskogo 35, Ulyanovsk 432025, Russia*

[#]*E-mail: agrohim_73@mail.ru*

In the field experiment (2017–2021), the effect of the filtration sediment of Ulyanovsk Sugar Plant JSC as a lime material for neutralizing the acidity of the leached chernozem on the territory of the land use of LLC "Khleborob" of the Ulyanovsk district of the Ulyanovsk region, characterized by a high culture of agriculture, was studied. Doses of CaCO_3 were calculated by the values of hydrolytic and metabolic acidity. Filtration was carried out according to the scheme, options: 1 – control without application, 2 – CaCO_3 6.1 t/ha, 3 – CaCO_3 4.5 t/ha. It was found that the use of filtration sludge reduced the acidity of the soil depending on the dose of CaCO_3 in the first year by 1.1 units of pH_{KCl} , hydrolytic acidity – by 2.94 mmol/100 g, in subsequent years – by 0.4–0.6 units of pH_{KCl} and 2.27–2.88 mmol/100 g of soil, respectively. Liming the soil with filtration sediment significantly improved the nutrient regime of leached chernozem. The content of additional forms of phosphorus and potassium in the 3rd year of the study increased by 30–50 and 11–32 mg/kg of soil, respectively, compared with the baseline level. In the first year of application of the filtration sediment, a higher yield of barley (6.40 t/ha) was formed in the variant with the introduction of meliorant at a dose of 4.5 t CaCO_3 /ha, in the 2nd and 3rd years, the same increase in the yield of winter and spring wheat by 0.34, 0.48 and 0.47 t/ha, respectively, was observed in depending on the experience option. In 2020, the highest increase in the yield of spring wheat grain in this experiment was observed when 6.1 t CaCO_3 /ha (0.75 t/ha) was introduced into the soil. In 2021, a higher increase in the yield of sunflower seeds (0.28 t/ha) was noted when using meliorant at a dose of 4.5 t/ha.

Key words: filtration sediment, barley, winter and spring wheat, sunflower, yield, economic efficiency.

УДК 631.417.2:631.872

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕГО И ЛЕГКОРАЗЛАГАЕМОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ СОЛОМЫ

© 2022 г. И. В. Русакова

Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа –
филиал Верхневолжского федерального аграрного научного центра
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, д. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия

E-mail: rusakova.iv@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.04.2022 г.

После доработки 27.05.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Растительные остатки, побочная продукция зерновых и зернобобовых культур являются важнейшим ресурсом сохранения и воспроизводства почвенного органического вещества (ПОВ). Для оценки состояния ПОВ и его агроэкологического значения важно иметь информацию не только о содержании валового органического углерода ($C_{\text{орг}}$), но и о содержании и соотношении лабильных, легкоминерализуемых и биологически доступных компонентов, наиболее значимых для формирования питательного режима почв, поддержания микробной активности и эффективного плодородия в целом. В научной литературе данные об изменениях в содержании и динамике различных пулов и фракций ПОВ под влиянием многолетнего внесения соломы практически отсутствуют. Влияние длительного многократного внесения соломы зерновых и зернобобовых культур на содержание $C_{\text{орг}}$ и легкоразлагаемых фракций ПОВ: водорастворимого (экстрагируемого холодной и горячей водой) углерода, мортмассы, а также их взаимосвязь с урожайностью культур севооборота изучали в длительном полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве в условиях Мещерской низменности по окончании 4-й ротации 5-польного зернопропашного севооборота (озимая пшеница–люпин на зерно–картофель–ячмень–однолетние травы). Установлено, что многократная заделка соломы озимой пшеницы, люпина и ячменя по 3 т/га, (суммарно 36 т/га за 4 ротации севооборота) на фоне ежегодного внесения минеральных удобрений (в среднем N54P51K57 в год) обеспечила в пахотном слое дерново-подзолистой почвы увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ на 13% по сравнению с исходным, углерода, экстрагируемого холодной водой ($C_{\text{в}}$) – на 11%, экстрагируемого горячей водой ($C_{\text{гв}}$) – на 31%, запасов мортмассы – в 2.42, содержания углерода мортмассы ($C_{\text{мм}}$) – в 2.36 раза относительно варианта без удобрений. Отмечено увеличение доли фракций $C_{\text{гв}}$, $C_{\text{мм}}$ в составе ПОВ в вариантах с соломой, что свидетельствовало об увеличении обеспеченности почвы лабильным, легкоразлагаемым углеродом. Выявлена положительная корреляционная зависимость различной степени тесноты между урожайностью возделываемых культур и содержанием изученных компонентов ПОВ. Сделан вывод, что регулярная заделка соломы в почву является эффективным методом сохранения и воспроизводства ПОВ и повышения обеспеченности почвы лабильным углеродом.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, водорастворимый углерод, мортмасса, солома, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S000218812210009X

ВВЕДЕНИЕ

Почвенное органическое вещество рассматривается как незаменимый биосферный и агропроизводственный ресурс, центральный индикатор качества и здоровья почвы, в значительной степени зависящий от характера и интенсивности сельскохозяйственной деятельности [1, 2].

Согласно современным представлениям, почвенное органическое вещество (ПОВ) представ-

ляет собой многокомпонентный, гетерогенный и полифункциональный континуум биомолекул частично или полностью трансформировавшихся остатков биоты, различающихся по размеру, массе, химической структуре [1–4] или, по определению Б.М. Когута и В.М. Семенова, “подсистема почвы, сформировавшаяся из органических веществ и соединений растительного, микробного и животного происхождения, прошедших гуми-

фикационные и негумификационные стадии стабилизации” [5]. По степени доступности почвенным микроорганизмам и устойчивости к биодеградации ПОВ условно подразделяется на 2 пула: трудно разлагаемое (устойчивое, консервативное, пассивное) и легко разлагаемое (легкоминерализуемое, лабильное, активное) [6–9].

Большая часть органического углерода в минеральных почвах стабильна, поскольку находится в химически или физически защищенном состоянии, либо в составе гумусовых образований, мало доступных микроорганизмам-редуцентам [7]. Легко трансформируемый углерод почвы представлен компонентами, характеризующимися высокой химической и биологической активностью (свежие растительные остатки, мортмасса, детрит, водорастворимое органическое вещество и др.), что определяет их основополагающую роль в осуществлении агрономических, экологических функций, формировании основных почвенных режимов и свойств. Именно эта часть общего запаса органического вещества в первую очередь изменяется под действием природных и антропогенных факторов [6]. Быстро оборачиваемые, с коротким временем существования компоненты ПОВ наиболее значимы для формирования питательного режима почвы и поддержания микробной активности и являются чувствительными индикаторами ранних изменений количества и качества органического вещества под воздействием природных и антропогенных факторов, в т.ч. под влиянием сельскохозяйственного использования [10, 11]. По мнению Кузнецова [12], в агрономическом отношении наиболее важным является то органическое вещество, которого либо “не видно”, либо “его уже нет”, т.е. постоянно оборачиваемое, легко минерализуемое и поэтому трудно улавливаемое химическими способами. Согласно выводам, изложенным в работах [7, 13], общими запасами ПОВ определяется потенциальное плодородие, а долей легкоразлагаемого (лабильного, подвижного, активного) – эффективное. Поэтому для оценки состояния ПОВ с точки зрения его агроэкологического значения и роли в плодородии почв важно знать не столько валовое содержание $C_{орг}$, но и обеспеченность лабильными органическими соединениями.

Фракция легкоминерализуемого ПОВ, определяемая как мортмасса и представленная свежими и полуразложившимися, негумифицированными растительными остатками, как правило, свободная, не стабилизированная и поэтому наиболее доступна микроорганизмам как источник углерода и энергии [14]. Она состоит из остатков растений, почвенной фауны, микробиомассы на

разных уровнях трансформации, в биохимическом отношении – из легко разлагаемых (негумусовых) компонентов: углеводов, полисахаридов, белков, органических кислот, аминокислот и других неспецифических соединений, являющихся потенциальными источниками образования гумусовых веществ [9].

В состав водорастворимого органического вещества с размером частиц <0.45 мкм входят в основном простые (аминокислоты, моносахара) и более сложные (аминосахара, фенолы, гуминовые и фульвокислоты) соединения, представляющие наиболее активную часть гумуса и являющиеся важнейшим источником минерализуемых N, P и S и энергии для почвенной биоты [15–17]. Признавая важность и значимость водорастворимого ПОВ в осуществлении агрономических и экологических функций, формировании почвенных режимов и свойств, Д.С. Орлов [18] предложил включить показатель C_v в систему показателей гумусного состояния почв. По данным исследований [19, 20], достоверным параметром оценки разлагаемой части ПОВ является также содержание углерода во фракции, экстрагируемой горячей водой ($C_{эгв}$). По данным экспериментальных исследований в длительных опытах [11, 21], установлено, что показатель $C_{эгв}$ является одним из наиболее чувствительных для обнаружения изменений в ПОВ под влиянием различных сельскохозяйственных практик и наиболее пригоден для характеристики разлагаемой части ПОВ в пахотных почвах. Химический состав фракции $C_{эгв}$ изучен еще недостаточно, но известно, что она содержит в основном углеводы (40–50%), значительную часть углерода микробной биомассы, биохимически несложные азотсодержащие соединения, представляющие очень легко разлагаемую часть активного органического вещества почв [11, 19, 22]. Высокое соотношение $C : N = 5–10$ [19] позволяет предположить ее немаловажную роль в обеспечении растений и микрофлоры доступным азотом. В работе [11] рекомендовано использовать $C_{эгв}$ как интегральный показатель качества ПОВ. По мнению [23], содержание $C_{эгв}$ может быть индикатором общего плодородия почв.

В сельскохозяйственных почвах при недостатке органических удобрений (навоза) основным средством поддержания уровня ПОВ являются послеуборочные растительные остатки, обеспечивающие оптимизацию содержания и качества органического вещества в почве, регулярное удаление их с поля приводит к отрицательному балансу гумуса [3, 24]. В научной литературе данные

об изменениях в содержании и составе ПОВ под влиянием длительного внесения соломы ограничены. Результаты научных исследований и информация об изменениях в содержании и составе органического вещества под влиянием длительного использования соломы в качестве удобрения может быть полезна для прогнозирования динамики содержания ПОВ в агротехнологиях, предусматривающих использование агроприемов, направленных на обогащение почвы растительной биомассой в виде побочной продукции возделываемых культур.

Цель работы — выявить изменения в содержании общего углерода и легкоразлагаемых его фракций в дерново-подзолистой почве (C_b , $C_{эв}$, $C_{мм}$), обусловленные длительным внесением соломы зерновых и зернобобовых культур и минеральных удобрений в зернопропашном севообороте, и выявить их связь с урожайностью культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном полевом опыте (заложен в 1996–1997 гг. на опытном поле ВНИИОУ) в 5-польном зернопропашном севообороте: озимая пшеница—люпин (на зерно)—картофель—ячмень—однолетние травы (люпин + овес) на дерново-подзолистой супесчаной почве с содержанием в пахотном слое физической глины (<0.01 мм) — 16–17%. Почва до закладки опыта характеризовалась следующими агрохимическими показателями пахотного слоя (0–20 см): pH_{KCl} 4.6–4.9 ед., подвижный фосфор — 65–79 (по Кирсанову), обменный калий — 83–99 мг/кг почвы (по Кирсанову), $C_{орг}$ — 0.48–0.51%. Схема опыта включала варианты с внесением минеральных удобрений под каждую культуру (среднегодовая доза N54P51K57, перед посевом), измельченной соломы зерновых и зернобобовых культур (осенью, после уборки зерна) в дозе 3 т/га, а также варианты с сочетанием соломы и минеральных удобрений. Для проведения данного исследования были выбраны следующие варианты: 1 — без удобрений (контроль), 2 — N54P51K57, 3 — N54P51K57 + солома озимой пшеницы, люпина, ячменя — по 3 т/га, 4 — солома озимой пшеницы, люпина, ячменя — по 3 т/га. В вариантах 1 и 2 солому с поля удаляли, оставляли только стерню. Суммарно за 4 ротации севооборота в пахотный слой почвы в вариантах 3 и 4 было внесено соломы 36 т/га. Повторность в опыте во времени двукратная, в пространстве — трехкратная, площадь делянок 42–47 м².

Образцы почвы для проведения анализов отбирали со всех повторений опыта по окончании 4-й

ротации севооборота тростевым буром (0–20 см) через 2 нед после уборки зеленой массы однолетних трав, готовили смешанные образцы из 20–30 индивидуальных проб с каждой делянки. Также в качестве эталонов сравнения в эти же сроки были отобраны почвенные образцы с участков многолетней залежи и длительно парующей почвы (0–20 см), расположенных вблизи от пахотной почвы севооборота и являвшихся ее генетическими аналогами. Общее содержание органического углерода ($C_{орг}$) определяли методом мокрого “сжигания” с фотометрическим окончанием ($\lambda = 590$ нм), углерода, растворимого в холодной воде (C_b) — по Панникову (при соотношении почва : вода = 1 : 5), углерода, экстрагируемого горячей водой ($C_{эв}$) — при 1-часовом кипячении почвенной суспензии (почва : вода = 1 : 5) на водяной бане с обратным холодильником, с последующим определением углерода в отфильтрованных вытяжках (аналогично $C_{орг}$, после выпаривания аликвот по методике [25]). Содержание мортмассы определяли по методике, изложенной в работе [26]: выделяли эту фракцию из почвы методом декантации водой, переносили на сито ($d = 0.5$ мм), промывали дистиллированной водой, высушивали при 60°C и определяли содержание углерода ($C_{мм}$) методом “мокрого окисления” с бихроматом калия.

Статистическую обработку данных проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа ($p = 0.05$) с вычислением средних, HCP_{05} и использованием критерия Фишера для оценки существенности разности между средними. Построение графиков и расчет коэффициентов корреляции провели с помощью программы Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание углерода в сухом веществе соломы зерновых и зернобобовых культур, примененной в опыте, составляло в среднем 40–41%, с каждой ее 1 т в почву поступало 400–410 кг С. За время проведения опыта при заделке соломы суммарно 36 т/га вход углерода составил в среднем 14.6 т/га или 97% от исходных запасов, которые составляли в начале опыта ≈ 15 т/га в пахотном слое. Установлено, что по окончании 4-й ротации севооборота многократное внесение соломы на фоне применения минеральных удобрений обеспечило положительный баланс углерода, рассчитанный по его прибыли по сравнению с исходным содержанием: +0.067%, в то время как в варианте без удобрений произошло снижение содержания $C_{орг}$ на 0.048%. Согласно расчетам, накопление органического углерода в

Таблица 1. Содержание $C_{\text{орг}}$ и его легкоразлагаемых фракций в дерново-подзолистой супесчаной почве опыта (слой 0–20 см) по окончании 4-й ротации севооборота (среднее за 2016–2017 гг.)

Вариант	$C_{\text{орг}}$		$C_{\text{в}}$		$C_{\text{эгв}}$		$C_{\text{мм}}$	
	% в почве	$\pm$ к исходному	мг/кг	% от $C_{\text{орг}}$	мг/кг	% от $C_{\text{орг}}$	мг/кг	% от $C_{\text{орг}}$
1. Без удобрений	0.463	–0.048	47.1	1.02	157	3.39	211	4.56
2. N54P51K57	0.501	–0.011	49.7	0.99	171	3.41	276	5.51
3. N54P51K57 + солома	0.567	+0.067	52.3	0.92	206	3.63	499	8.80
4. Солома	0.524	+0.039	54.9	1.05	182	3.47	404	7.71
5. Залежь	0.778	–	122	1.57	363	4.67	1520	19.6
6. Пар	0.400	–	47.2	1.18	116	2.90	88	2.20
HCP_{05}	0.038	–	9.2	–	16	–	84	–

Примечания. 1. N54P51K57 – среднегодовая доза минеральных удобрений. 2. Солома – солома озимой пшеницы, люпина, ячменя по 3 т/га, суммарно за 4 ротации – 36 т/га.

пахотном слое дерново-подзолистой почвы за счет использования соломы в опыте составило 54 кг/т. При ежегодном внесении минеральных удобрений баланс гумуса был почти бездефицитным. В залежной почве с доминированием многолетней лугово-злаковой растительности, оставляющей в почве значительное количество корневых остатков, содержание $C_{\text{орг}}$ было самым высоким в этом исследовании – 0.778%, что в 1.37 раза превышало вариант НРК + солома, почва пара характеризовалась минимальным содержанием $C_{\text{орг}}$ – 0.400% (табл. 1).

По данным некоторых исследований, применение минеральных удобрений может повысить содержание $C_{\text{орг}}$ в почве, но только в долгосрочной перспективе и при условии систематического и полного поступления растительных остатков в почву [27, 28]. На супесчаных почвах (опытная станция Askov, Дания) почва, получавшая солому 4, 8 и 12 т/га ежегодно в течение 18 лет, содержала углерода на 12, 21 и 30% больше соответственно, чем при удалении соломы [29].

По данным исследований [27], в пахотной почве накопить значительное количество углерода за счет растительных остатков невозможно. Максимальное накопление углерода в почве при ежегодном внесении соломы в дозах 3.0–9.0 т/га не превышало 0.1–0.3% от массы почвы. По данным [30], применение минеральных удобрений в сочетании с растительными остатками зерновых культур позволяло не только повысить урожайность, но и регулировать баланс углерода в почве. Образование из растительных остатков гумифицированных веществ от 190 до 340 кг/га создавало основу для расширенного воспроизводства гумуса в почве.

Известно, что валовое содержание $C_{\text{орг}}$ в почве является устойчивым, консервативным показателем и изменяется очень медленно, в течение нескольких лет и даже десятилетий, поэтому измерения только общего углерода не всегда могут адекватно отразить изменения качества и соотношения различных фракций ПОВ, происходящие при внесении растительных остатков, особенно если их применяют в невысоких дозах.

Изучение различных пулов и фракций, выделенных физическими и химическими методами, дает более разностороннее представление о составе, структуре и качестве ПОВ, изменяющихся под действием природных и антропогенных факторов, в т.ч. агротехнических приемов и методов, его биологической доступности и степени участия в формировании продуктивности. Органическое вещество, извлекаемое водной вытяжкой ($C_{\text{в}}$) является одним из основных показателей ближайшей доступности ПОВ для микроорганизмов. Имеется ряд публикаций, свидетельствующих, что содержание водорастворимого органического вещества служит надежным показателем эффективного плодородия ряда типов почв, хорошо отзывается на вносимые минеральные и органические удобрения, коррелирует с урожайностью и биологической активностью почв [15, 16]. Научные публикации об изменениях содержания $C_{\text{в}}$ в пахотных почвах под влиянием внесения соломы очень малочисленны.

Показано, что содержание $C_{\text{в}}$ в варианте без удобрений и при внесении только минеральных удобрений было очень низким: 47.1 и 49.7 мг/кг почвы соответственно (на одном уровне с почвой пара). Наиболее высокой обеспеченностью $C_{\text{в}}$ характеризовался пахотный слой почвы в вариантах

с многократной заделкой соломы — 52.3 (на фоне минеральных удобрений) и 54.9 мг/кг (без минеральных удобрений), однако достоверных различий в вариантах опыта не обнаружено. Незначительные изменения содержания C_b после длительного внесения соломы в дерново-подзолистую почву можно объяснить с тем, что внесение соломы в почву при увеличении биологической активности одновременно стимулировало и “производство”, и “потребление” водорастворимых органических соединений, наиболее биологически доступных и быстро утилизируемых почвенной микрофлорой, поэтому чистый эффект в полевых условиях мог быть трудно предсказуемым. В работе [31] показано, что содержание водорастворимого углерода в почве (камбисоли) было значительно увеличено на 34% после 10 лет внесения соломы (в дозе ≈ 4 т/га ежегодно).

Согласно исследованиям [11], под влиянием практик управления гораздо более заметными были изменения в содержании $C_{эгв}$, чем $C_{орг}$. Содержание $C_{эгв}$ в не удобренных почвах длительных опытов, как показано в работе [19], независимо от типа почв и содержания в них общего органического углерода было достаточно близким и не превышало 200 мг/кг почвы. Например, по данным [23], содержание $C_{эгв}$ в пахотных почвах Сербии (Haplic Chernozem) находилось в интервале от 125 до 226 мг/кг почвы.

Исследованная дерново-подзолистая супесчаная почва характеризовалась низким содержанием $C_{эгв}$ — 157 мг/кг в контроле без удобрений. При ежегодном внесении минеральных удобрений содержание $C_{эгв}$ было немного больше контроля — 171 мг/кг, но значимо от него не отличалось. При регулярном внесении соломы без минеральных удобрений было зафиксировано существенно более высокое по сравнению с неудобренным вариантом содержание экстрагируемого горячей водой углерода — 182 мг/кг. Максимальной обеспеченностью этой формой водорастворимого углерода характеризовалась почва при совместном внесении минеральных удобрений и соломы — 206 мг/кг, что в 1.31 и 1.20 раза превышало варианты без удобрений и NPK соответственно. Сопоставимые данные приведены в работе [32]: по результатам длительного полевого опыта, после 45-летнего внесения соломы в сочетании с минеральными удобрениями содержание $C_{эгв}$ в почве (Eutric Cambisol, sandy loam) повысилось на 17–30% по сравнению с неудобренным контролем. В залежи содержание C_b и $C_{эгв}$ составило 122 и 363 мг/кг, что было значимо больше (в 2.33 и 1.76 раза) даже в сравнении с вариантом NPK + солома.

Отношение содержания углерода лабильных фракций к валовому $C_{орг}$ является показателем доли этой фракции в общем содержании органического вещества. Доля экстрагируемого холодной водой углерода менялась в вариантах опыта в достаточно узком диапазоне: 0.92–1.05%, самая высокая величина соотношения $C_b : C_{орг} = 1.57\%$ отмечена в залежной почве (табл. 1).

Соотношение $C_{эгв} : C_{орг}$ чаще всего находилось в диапазоне от 1 до 6%, в зависимости от типа почвы, гранулометрического состава, системы удобрения и пр. По результатам исследования [33], в лювисолях (Luvisol) доля $C_{эгв}$ составляла от 3.5 до 4.8% от общего содержания углерода. В работе [32] сообщали, что отношение $C_{эгв} : C_{орг}$ в почвах Чехии составляло 2.58–3.01%. В нашем исследовании получены близкие сопоставимые данные: относительное содержание $C_{эгв}$ в $C_{орг}$ изменялось от 3.39 (вариант без удобрений) до 3.63% (вариант NPK + солома), что было показателем улучшения качества ПОВ в результате увеличения в его составе легкоминерализуемых компонентов, источников C, N, P и S для биоты.

Наблюдения за характером многолетней динамики C_b и $C_{эгв}$ в течение 4-й ротации показали, что систематическое внесение соломы в сочетании со средними дозами минеральных удобрений позволило поддерживать в дерново-подзолистой почве под всеми культурами стабильно более высокий уровень этих показателей по сравнению с контролем без удобрений и вариантом NPK (рис. 1).

По мнению [14], в пахотных почвах основным лабильным органическим веществом является внутрипочвенная мортмасса, предшественником которой бывают главным образом растительные остатки возделываемых культур: корне-поживные, прижизненный опад. В отличие от природных биоценозов, в агроценозах значительная часть фитомассы ежегодно отчуждается с урожаем, обедняя почву свежим органическим веществом, источником восполнения запасов мортмассы. Восполнить этот запас можно за счет оставления соломы в поле и заделки ее в почву после уборки зерновых и зернобобовых культур.

Установлено, что такие факторы, как длительное внесение минеральных удобрений и соломы, оказывали значительное влияние на запасы мортмассы в пахотном слое почвы. Например, ежегодное внесение минеральных удобрений за счет увеличения урожайности возделываемых культур и фитомассы корне-поживных остатков обеспечило увеличение запасов мортмассы в пахотном слое с 2.17 (без удобрений) до 3.08 т/га (на 42%), систематическая запашка соломы зерновых и

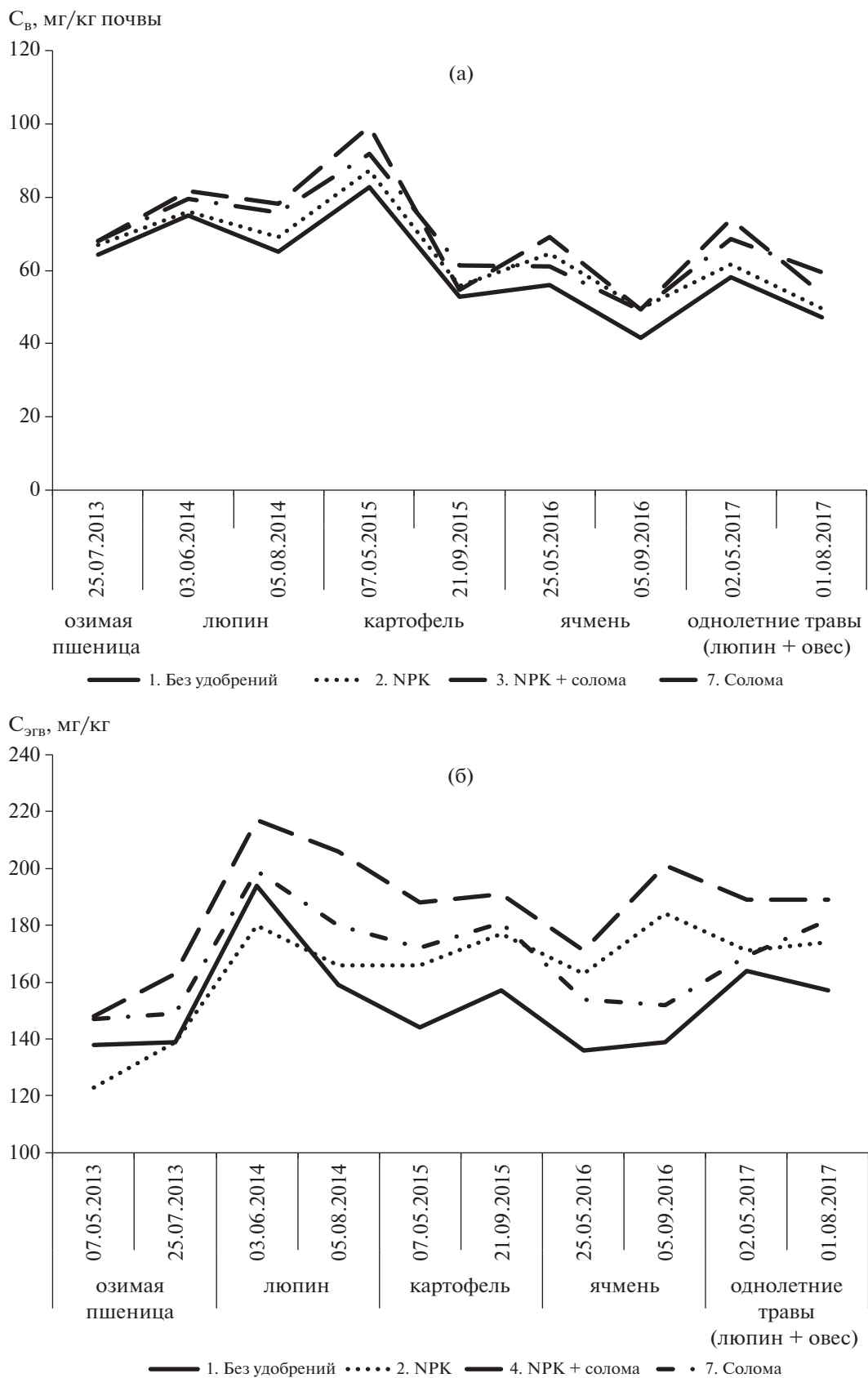


Рис. 1. Динамика содержания С_в (а) и С_{эГВ} (б) в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы в 4-й ротации севооборота.

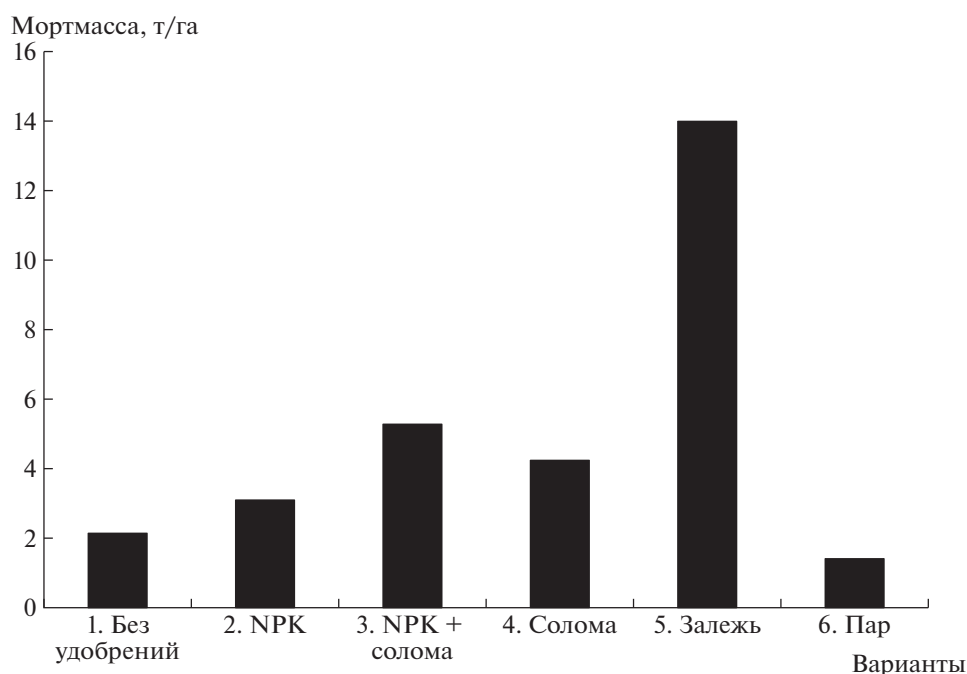


Рис. 2. Запасы мортмассы в дерново-подзолистой почве севооборота, залежи и пара (слой 0–20 см).

зернобобовых культур севооборота — до 4.22 т/га (на 94%). Максимальные запасы мортмассы в опыте (5.25 т/га) сформировались при регулярной заправке соломы в сочетании с минеральными удобрениями (рис. 2).

Поскольку биогенные элементы мортмассы хорошо доступны растениям, можно полагать, что увеличение ее запасов значительно улучшает обеспеченность растений элементами питания. В целом в опыте в мортмассе было аккумулировано от 211 до 499 мг/кг углерода, или 4.56–8.80% от общего $C_{орг}$. Самая высокая доля этой фракции в составе ПОВ зафиксирована в варианте с комбинированным внесением соломы и минеральных удобрений, что свидетельствовало о самых высоких потенциальных возможностях сохранения запасов гумуса и его воспроизводства в почве (табл. 1). Роль соломы в увеличении обеспеченности легкоразлагаемым ПОВ подтверждена в работе [26], где сообщали, что в зерновом севообороте при оставлении сухого вещества растительных остатков с учетом соломы пшеницы в среднем в год 3.87 т/га после 9 лет с начала опыта содержание мортмассы было в 1.57 раза больше, чем в варианте с удалением соломы с поля.

В отсутствии механических обработок и ежегодного отчуждения растительной продукции в почве залежи отмечен значительно более высокий, чем в почве севооборота, уровень запасов мортмассы и содержания $C_{мм}$ — 14 т/га и 1524 мг/кг со-

ответственно. Длительно парующая почва без поступления свежего органического вещества характеризовалась запасами мортмассы и содержанием $C_{мм}$ в 1.55 и 2.39 раза более низкими, чем вариант без удобрений (табл. 1).

В работах [34–36] установлено, что количество и процессы разложения мортмассы во многом определяют эффективное плодородие почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Урожайность зеленой массы однолетних трав (люпино-овсяной смеси), завершающей культуры севооборота, в варианте без удобрений составила 68 ц/га (в среднем за 2016–2017 гг.). Многолетнее внесение соломы в комбинации с минеральными удобрениями обеспечило максимальную урожайность трав 141 ц/га, что было существенно больше по сравнению не только с не удобренным вариантом, но и фоном минеральных удобрений (табл. 2).

В настоящем исследовании была сделана попытка найти количественную связь урожайности с содержанием фракций ПОВ. Проведенный корреляционный анализ показал тесные положительные корреляции величины урожайности однолетних трав в опыте с содержанием общего $C_{орг}$ ($r = 0.78$) и легкоминерализуемых фракций: $C_{эгв}$ ($r = 0.79$), мортмассы ($r = 0.69$) и $C_{мм}$ ($r = 0.65$), что показало важное агрономическое значение этих компонентов ПОВ, фонд которых возрастал при длительном внесении соломы.

Таблица 2. Урожайность однолетних трав (среднее за 2016–2017 гг.)

Вариант	Зеленая масса		
	урожайность, ц/га	прибавка	
		ц/га	%
1. Без удобрений	68	—	—
2. N60P45K45	115	47	69
3. N60P45K45 + + солома ячменя 3 т/га	141	73	107
4. Солома ячменя 3 т/га	80	12	18
<i>HCP</i> ₀₅ , ц/га		18	

Примечание. Указаны дозы минеральных удобрений и соломы, внесенных под однолетние травы.

В работе [37] также найдена тесная корреляционная зависимость между урожайностью культур в севообороте и содержанием $C_{эгв}$ в дерново-подзолистой почве Предуралья ($r = 0.72–0.84$). В исследовании [19] обнаружены линейные зависимости между содержанием $C_{эгв}$ и урожайностью. Тесная корреляция между содержанием мортмассы и урожайностью яровой пшеницы ($r = 0.86–0.90$) отмечена в работе [38]. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что за счет увеличения уровня обеспеченности почвы легкоразлагаемым органическим веществом при длительном регулярном возврате пожнивных растительных остатков можно поддерживать уровень эффективного плодородия дерново-подзолистой почвы на более высоком уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что длительная систематическая (в течение 4-х ротаций 5-польного зернопропашного севооборота) заделка соломы зерновых и зернобобовых культур (суммарно 36 т/га) в комбинации со средними дозами минеральных удобрений (в среднем N54P51K57 в год), обеспечила увеличение содержания $C_{орг}$ в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы на 0.067% (на 13%) по отношению к исходному. Ежегодное внесение минеральных удобрений за счет увеличения урожайности культур и, соответственно, корне-пожнивных остатков позволило сохранить содержание $C_{орг}$ в пахотном слое на исходном уровне. Дополнительный вход свежего органического вещества, обеспечиваемый возвратом в почву всей незерновой части урожая культур севооборота, в комбинации с минеральными удобрениями способствовал накоплению в почве легкоразлагаемых компонентов

ПОВ: C_b — с 47.1 до 52.3 мг/кг, $C_{эгв}$ — с 157 до 206 мг/кг, $C_{мм}$ — с 211 до 499 мг/кг, что в пересчете соответствовало повышению величин этих фракций в 1.11, 1.31 и 2.36 раза относительно варианта без удобрений. Увеличение доли фракций $C_{эгв}$, $C_{мм}$ в составе ПОВ свидетельствовало об увеличении обеспеченности почвы активным углеродом, легко доступным для микробиоты. Полученные данные показали существенную роль побочной продукции растениеводства, растительных остатков в повышении обеспеченности пахотных почв легкоразлагаемым органическим веществом, во многом определяющим уровень их эффективного плодородия. Возврат всех послеуборочных остатков зерновых и зернобобовых культур (суммарно 9 т/га за каждую ротацию севооборота) не позволил достичь показателей содержания общего углерода и легкоминерализуемых его компонентов до уровней, характерных для почвы залежи. Содержание всех фракций положительно коррелировали между собой и урожайностью, что подтвердило их немаловажное значение в формировании эффективного плодородия и продуктивности культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53–63.
2. Liu E.X., Herbert S.J., Hashemi A.M., Zhang X., Ding G. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation — a review // Plant Soil Environ. 2006. V. 52 (12). P. 531–543.
3. Кудеяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
4. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // Nature. 2015. V. 528 (7580). P. 60–68.
5. Козут Б.М., Семенов В.М. Эволюция доминирующих парадигм в учении о гумусе и почвенном органическом веществе // Агрохимия. 2015. № 12. С. 3–19.
6. Шевцова Л.К. Современные направления в исследовании органического вещества почвы в длительных опытах // Пробл. агрохим. и экол. 2009. № 3. С. 39–47.
7. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС. 2015. 233 с.
8. Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Якутин М.В., Булавко Г.И., Миронычева-Токарева Н.П. Запасы лабильного углерода в экосистемах Западной Сибири // Почвоведение. 1999. № 3. С. 332–334.
9. Strosser E. Methods for determination of labile soil organic matter: An overview // J. Agrobiol. 2010. V. 27 (2). P. 49–60.

10. Haynes R.J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview // *Adv. Agron.* 2005. V. 85. P. 221–268.
11. Ghani A., Dexter M., Perrott K.W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation // *Soil Biol. Biochem.* 2003. V. 35 (9). P. 1231–1243.
12. Кузнецов А.М. Активный пул органического вещества почвы при разных способах землепользования и системах удобрения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 23 с.
13. Пуртова Л.Н., Шапова Л.Н., Костенков Н.М. Влияние современных агротехнологий на содержание лабильного гумусового вещества, микрофлору и оптические показатели лугово-бурых отбеленных почв Приморья // *Агрохимия.* 2013. № 10. С. 13–19.
14. Тумлянова А.А. Легкоразлагаемое органическое вещество пахотных почв // Математические модели и информационные технологии в сельскохозяйственной биологии: итоги и перспективы: Мат-лы Всерос. конф. с международ. участием (14–15 октября 2010 г., Санкт-Петербург). СПб.: АФИ, 2010. С. 149–153.
15. Embacher A., Zsol A., Gattinger A., Munch J.C. The dynamics of water extractable organic matter (WEOM) in common arable topsoils: I. Quantity, quality and function over a three year period // *Geoderma.* 2007. V. 139. P. 11–22.
16. Кауричев И.С., Яшин И.М., Карпунин А.И., Платонов И.Г. Особенности минерализации и трансформации водорастворимых органических веществ в подзолистых почвах Архангельской области // *Изв. ТСХА.* 1991. Вып. 3. С. 71–84.
17. Wang Q., Wang S. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions // *Appl. Soil Ecol.* 2011. V. 47. P. 210–216.
18. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // *Почвоведение.* 2004. № 8. С. 918–926.
19. Шульц Э., Кершенс М. Характеристика разлагаемой части органического вещества почв и ее трансформации при помощи экстракции горячей водой // *Почвоведение.* 1998. № 7. С. 890–894.
20. Nedvěd V., Balík J., Černý J., Kulháněk M., Balíková M. The changes of soil nitrogen and carbon contents in a long-term field experiment under different systems of nitrogen fertilization // *Plant Soil Environ.* 2008. V. 54 (11). P. 463–470.
21. Weigel A., Kubat J., Körschens M., Powlson D. Determination of the decomposable part of soil organic matter in arable soils // *Arch. Acker. Pfl. Boden.* 1998. V. 43. P. 123–143.
22. Leineweber P., Schulten H.R., Körschens M. Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment // *Biol. Fertil. Soils.* 1995. V. 20. P. 17–23.
23. Šeremešić S., Milošev D., Sekulić P., Nešić L., Ćirić V. Total and hot-water extractable carbon relationship in Chernozem soil under different cropping systems and land use // *J. Centr. Europ. Agricult.* 2013. V. 14 (4). P. 1496–1504.
24. Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation // *Sustainability.* 2015. V. 7 (5). P. 5875–5895.
25. Методы определения активных компонентов в составе гумуса. М.: ВНИИА, 2010. 34 с.
26. Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.В., Шепелев А.Г. Влияние пожнивных остатков на состав органического вещества чернозема выщелоченного в лесостепи Западной Сибири // *Почвоведение.* 2014. № 4. С. 473–479.
27. Шарков И.Н., Данилова А.А. Влияние агротехнических приемов на изменение содержания гумуса в пахотных почвах // *Агрохимия.* 2010. № 12. С. 72–81.
28. Alvarez R. A review of nitrogen fertilizer and conservative tillage effects on soil organic storage // *Soil Use Manag.* 2005. V. 21. P. 38–52.
29. Thomsen I.K., Christensen B.T. Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops // *Soil Use Manag.* 2004. V. 20. № 4. P. 432–438.
30. Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р. Продуктивность растений и баланс углерода в агроэкосистемах при использовании минеральных удобрений и растительных остатков // *Пробл. агрохим. и экол.* 2018. № 4. С. 9–14.
31. Xu M., Lou Y., Sun X., Wang W., Baniyamuddin B., Zhao K. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation // *Biol. Fertil. Soils.* 2011. V. 47. P. 745–752.
32. Šimon T. Long-term effect of straw and farmyard manure on soil organic matter in field experiment in the Czech Republic // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2012. V. 59 (9). P. 1–13.
33. Soon Y.K., Arshad M.A., Haq A., Lupway N. The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil // *Soil Till. Res.* 2007. V. 85. P. 38–46.
34. Сидоров М.И., Зезюков Н.И. Роль негумифицированных растительных остатков почвы в земледелии // *Вестн. сел.-хоз. науки.* 1981. № 11. С. 78–84.
35. Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А., Флоринский М.А. Легкоразлагаемое органическое вещество и эффективное плодородие почв // *Земледелие.* 1995. № 1. С. 10–12.
36. Балабанова Н.Ф., Воронкова Н.А., Дороненко В.Д., Волкова В.А., Цыганова Н.А. Содержание лабильного органического вещества в лугово-черноземной почве при длительном применении удобрений // *Земледелие.* 2020. № 2. С. 7–9.
37. Завьялова Н.Е., Косолапова А.И., Сторожева А.Н. Влияние возрастающих доз полного минерального удобрения на органическое вещество и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья // *Агрохимия.* 2014. № 6. С. 20–28.
38. Балабанова Н.Ф., Воронкова Н.А. Влияние длительного применения удобрений в зернотравяном севообороте на содержание лабильного органического вещества в лугово-черноземной почве // *Агрохимия.* 2015. № 1. С. 16–22.

Change in the Content of Total and Easily Degradable Organic Matter in Sod-Podzolic Soil with Continuous Application of Straw

I. V. Rusakova

*All-Russian Research Institute for Organic Fertilizers and Peat – branch of Upper Volga Federal Agrarian Research Center
ul. Pryanishnikova 2, Vyatkinskoye, Sudogda district, Vladimir region 601390, Russia*

E-mail: rusakova.iv@yandex.ru

Plant residues and by-products of cereal grains and grain legumes are the most important resource for the preservation and regeneration of soil organic matter (SOM). To assess the state of SOM and its role for agriculture and the environment, it is important to have information not only about total organic carbon (C_{org}), but also about the content and ratio of labile, easily mineralized and biologically accessible components that are vital for establishing soil nutrient status and maintaining microbial activity and effective fertility in general. In the scientific literature, there is almost no data about content changes and dynamics of various SOM pools and fractions affected by multi-year straw incorporation. The influence of prolonged and repeated incorporation of cereal grains and grain legumes straw on the content of C_{org} and easily degradable SOM fractions, i.e., water-soluble (cold and hot water extractable) carbon and mortmass, as well as their relation with crop yields have been studied in long-term field practices on sod-podzolic sandy loam soils in the Meshchera Lowlands at the end of the 4th rotation cycle of five-crop grain-row rotation (winter wheat, edible lupins, potatoes, barley and annual grasses). It was established that repeated incorporation of winter wheat, lupin and barley straw in the amount of 3 t/ha (a total of 36 t/ha during four crop rotations) together with annual application of mineral fertilizers (on average N54P51K57 per year) have improved the arable layer of sod-podzolic soil through increasing the content of C_{org} by 13% (compared to the initial content), mortmass reserves by 2.42 times, carbon stocks in mortmass (C_{mm}) by 2.36 times, cold water extractable carbon (C_w) by 11% and hot water extractable carbon (C_{wec}) by 31% relative to the option without fertilizers. The proportion of Chwe and Cmm fractions in SOM for the options with straw has proved to be higher, which indicates an increase in the availability of labile easily degradable carbon in soil. The correlation between yields of cultivated crops and the content of SOM components under study have showed to be positive with varying degree of coherence. The conclusion is that regular straw incorporation in soil is an effective method of preserving/regenerating SOM and increasing the availability of labile carbon.

Key words: soil organic matter, water-soluble carbon, mortmass, straw, sod-podzolic soil.

УДК 631.816:631.811:631.559:633.413(470.32)

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ УДОБРЕННОСТИ ПОЧВ НА ОСОБЕННОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ НРК И УРОЖАЙНОСТЬ ГИБРИДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ИНОСТРАННОЙ СЕЛЕКЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ЧЕРНОЗЕМНОМ РЕГИОНЕ

© 2022 г. О. А. Минакова^{1,*}, Л. В. Александрова¹, В. М. Вилков¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86, Россия

*E-mail: olalmin2@rambler.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Выявлено, что в условиях ЦЧР урожайность корнеплодов иностранного гибрида была на 5.1–6.8 т/га больше по сравнению с отечественным, но он в меньшей степени отзывался на применение удобрений, вследствие чего его возделывание в большинстве изученных вариантов было нерентабельным. Корреляционная зависимость величины урожайности основной продукции от уровня удобрения была в большей степени выражена при возделывании отечественного гибрида. Возделывание гибрида сахарной свеклы отечественной селекции на одних и тех же фонах основного удобрения по сравнению с иностранным гибридом отличалось на 2.75–10.6% большим содержанием в почве подвижных форм P_2O_5 , на 4.47–13.4% — K_2O , но на 0.02–0.28 меньше — величиной pH_{KCl} . Азот и калий удобрений лучше использовал отечественный гибрид, а фосфор — иностранный.

Ключевые слова: отечественная селекция, сахарная свекла, удобрения, почва, коэффициент использования, экономическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188122100064

ВВЕДЕНИЕ

Продовольственная независимость страны, определяемая как отношение объема отечественной сельхозпродукции к объему внутреннего потребления, согласно Доктрине продовольственной безопасности РФ от 2020 г. [1], должна составлять для сахара не менее 90%. Пороговыми величинами объемов внутреннего рынка сахара должны быть полное самообеспечение, а также высокий экспортный потенциал [2].

Повышение эффективности отечественного сельского хозяйства, в том числе растениеводства, возможно прежде всего с помощью современных технологий и достижений передовой науки, а также обеспечения сельскохозяйственных товаропроизводителей семенами отечественной селекции наиболее продуктивных, адаптированных к условиям произрастания и устойчивых к вредным организмам и стрессам сортов [1–3].

Несмотря на то, что в настоящее время Россия занимает первое место в мире по площади посевов сахарной свеклы, доля семян отечественных гибридов данной культуры, используемых сель-

хозтоваропроизводителями, составляет менее 3%. Наличие 97% семян импортных гибридов в значительной степени повышает риски свекловодства [2].

Одним из факторов повышения продуктивности свекловичных плантаций должно быть увеличение производства отечественных гибридов [4]. В государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию в РФ, по состоянию на 2019 г. включены 430 сортов, гибридов и родительских компонентов сахарной свеклы, из них отечественной селекции — 88, иностранной селекции — 342 [5] что составляет 79.5% от сортимента.

На российском рынке свеклосемян широко представлены гибриды сахарной свеклы фирм Florimond Desprez (Франция), Sesvanderhave (Франция), Strube (Германия), Syngenta (Швейцария), KWS (Германия), Lion Seeds Ltd. (Великобритания) и другие. Многие исследователи указывают на большую урожайность таких гибридов (на 10.4–131%), чем отечественных [6–8].

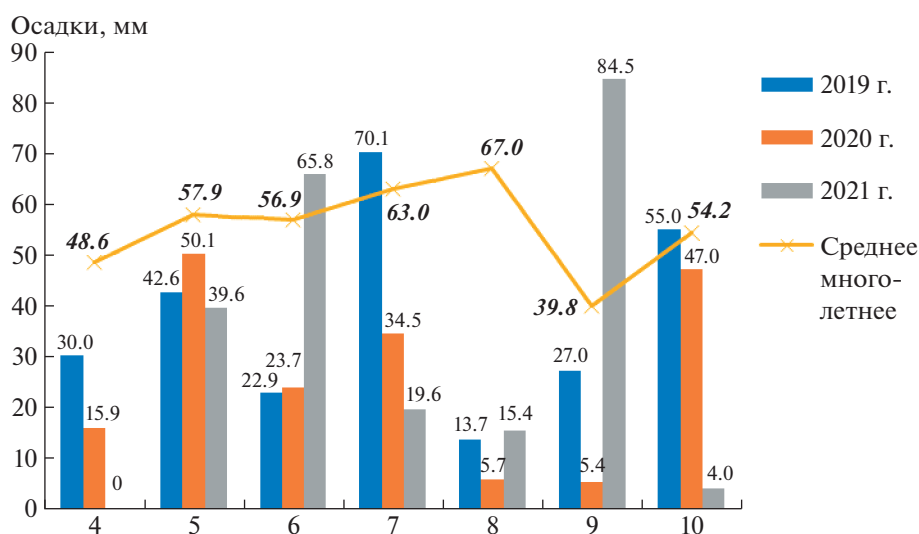


Рис. 1. Количество осадков в 2019–2021 гг.

Чтобы стать рентабельной культурой, гибриды сахарной свеклы должны иметь высокую устойчивость к неблагоприятным биотическим и абиотическим факторам окружающей среды — избытку или недостатку влаги, болезням, вредителям, а также избыточному или недостаточному уровню минерального питания, что позволит растению реализовать свой биологический потенциал, обеспечить получение сбора сахара с гектара не меньше 10 т и высокие технологические качества (способность отдавать сахар при переработке: низкое содержание калия, натрия, магния и кальция и аминного азота) [9].

В ряде опытов подтвержден высокий продуктивный потенциал отечественных гибридов (урожайность корнеплодов до 76 т/га и сахаристость до 19%) по сравнению с иностранными [10–13]. Отзывчивость гибридов отечественной селекции на улучшение условий питания сопоставима с иностранными, или она выше [14–16].

Эффективность использования минеральных удобрений при возделывании сахарной свеклы в значительной степени определяется ее сортовыми особенностями. Для каждого гибрида важно определить его агрохимическую эффективность, которая выражается прибавкой хозяйственно-ценной части продукции, получаемой в результате большего соответствия генетических, физиологических и морфологических свойств растения заданной в конкретных почвенно-климатических условиях минеральной обеспеченности (по сравнению с районированным гибридом) [8, 13, 17]. Применение удобрений является основой полу-

чения высоких урожаев гибридов как отечественной, так и иностранной селекции [18–20].

Различия в уровнях питания растений, которые обеспечиваются внесением удобрений, несомненно, сказывается на агрохимических показателях почвенного плодородия [21–23]. Оценка содержания NPK в корнеобитаемом слое почвы и почвенной кислотности на разных фонах удобренности позволяет сделать вывод об эффективности использования каждым гибридом элементов питания из почвы и удобрений.

Следовательно, разработка сортовой агротехники гибридов сахарной свеклы отечественной селекции в рамках импортозамещения с учетом потребностей конкретного гибрида в элементах питания с целью получения их высокой продуктивности является важной задачей отечественного свекловодства. Цель работы — оценка эффективности применения разных доз удобрений с помощью коэффициентов использования NPK из почвы и удобрений и определение изменений агрохимических свойств почвы, их связи с продуктивностью культуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2019–2021 гг. во Всероссийском научно-исследовательском институте сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлунова. Климат зоны проведения исследования характеризуется значительной континентальностью, его характерной особенностью является большая неустойчивость температуры воздуха и неравномерность выпадения осадков по временам года. Гидротермический коэффициент пери-

ода вегетации в данной местности за последние годы в среднем равен 1.35 [24].

Годы исследования следует отнести к засушливым, т.к. с апреля по октябрь 2019 г. выпало 261.3 мм осадков, в 2020 г. — 182.3 мм и 2021 г. — 228.9 мм, что было на 32.5, 52.9 и 40.9 мм меньше, чем среднемноголетний показатель (387.4 мм). Периоды нормальной увлажненности сочетались с длительными засухами (50–60 сут). Средняя температура воздуха в годы исследования была на 0.1–0.5°C меньше, чем за последние 10 лет. Растения сильно страдали от недостатка влаги, особенно в 2020 г. В целом период 2019–2021 гг. характеризовался как засушливый, что оказало отрицательное влияние на развитие и урожайность сахарной свеклы (рис. 1).

Почва опытного участка — чернозем выщелоченный малогумусный среднесильнозольный тяжелосуглинистый на тяжелом карбонатном суглинке.

Агрохимические свойства почвы и урожайность сахарной свеклы изучали в паровом звене (черный пар — озимая пшеница — сахарная свекла — ячмень с подсевом клевера) зернопаропропашного севооборота со следующим чередованием культур: черный пар — озимая пшеница — сахарная свекла — ячмень с подсевом клевера — клевер 1-го года использования — озимая пшеница — сахарная свекла — однолетние травы (горох + овес) — овес. Минеральные удобрения (в основном в виде нитроаммофоски) вносили только под сахарную свеклу с осени под зяблевую вспашку, полуразложившийся навоз КРС — в черном пару. Агротехника возделывания сахарной свеклы включала глубокую вспашку (на 30–32 см), ранневесеннюю культивацию, внесение почвенных гербицидов, предпосевную культивацию, посев в 3-й декаде апреля и 2–3 междурядные обработки. На фоне удобрения методом расщепленных делянок выращивали гибрид отечественной селекции РМС 120 (оригинатор — ВНИИСС им А.Л. Мазлумова) и гибрид иностранной селекции Митика (оригинатор — Lion Seeds Ltd). Схема опыта представлена в табл. 1.

В образцах почвы определяли величину pH_{KCl} (ГОСТ 26483-85) [25], содержание N-NO — дисульфогеноловым методом [26], P_2O_5 и K_2O и нитратов — по ГОСТ 26204-91 [27]. В посевах сахарной свеклы проводили учет урожайности весовым методом (площадь учетной делянки 10.8 м²) с пересчетом по методике ВНИС [28]. Расчет экономической оценки провели по методике ВНИИА [29], определение КИП и КИУ — по методике ЦИНАО [30].

Таблица 1. Схема применения систем удобрения в опыте

Дозы минеральных удобрений, кг/га	Навоз в пару, т/га	Внесено всего NPK, кг/га (с учетом последствий навоза)
N0P0K0 (контроль)	0	0
N45P45K45	25	206
N90P90K90	25	341
N135P135K135	25	476
N120P120K120	50	501
N190P190K190	0	570

Дисперсионный анализ данных производили по [31], регрессионный анализ — с помощью Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что урожайность отечественного гибрида в вариантах с использованием удобрений составила 37.7–45.1, иностранного — 46.0–51.6 т/га, в контроле — 28.3 и 42.2 т/га соответственно (табл. 2). Урожайность иностранного гибрида была на 5.16–13.9 т/га (на 14.4–49.1%) больше, чем отечественного, наибольшая разница была отмечена в контроле, наименьшая — в вариантах с высокой насыщенностью NPK (варианты N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га и N190P190K190), что свидетельствовало о более значительном влиянии уровня удобрения на урожайность отечественного гибрида по сравнению с иностранным.

Системы удобрения N135P135K135 + навоз 25 т/га, N190P190K190 и N120P120K120 + навоз 50 т/га способствовали созданию максимальной урожайности отечественного гибрида, при этом ее повышение относительно варианта без удобрений составило 14.9–16.8 т/га (на 52.6–59.3%). Наименьшая разница отмечена в вариантах N120P120K120 + навоз 50 т/га, N190P190K190 и N90P90K90 + навоз 25 т/га. Действие удобрений проявилось в увеличении урожайности иностранного гибрида на 3.8–9.4 т/га (на 6.25–22.3%), что свидетельствовало о его слабой реакции на улучшение условий питания (в отличие от отечественного гибрида, где прибавка составила 9.4–16.8 т/га или 33.2–59.3%).

Доля основной продукции в общей массе урожая была наибольшей у иностранного гибрида (81.3–85.1%), отечественного — меньшей (73.4–78.4%). В урожае отечественного гибрида содер-

Таблица 2. Урожайность корнеплодов (т/га) и доля основной продукции в биомассе урожая (%)

Урожайность корнеплодов, т/га		Доля основной продукции, %	
отечественный гибрид	иностраннй гибрид	отечественный гибрид	иностраннй гибрид
Контроль (без удобрений)			
28.3	42.2	78.4	84.4
N45P45K45 + навоз 25 т/га			
37.7	46	73.4	85.3
N90P90K90 + навоз 25 т/га			
40.8	48	74.7	85.1
N135P135K135 + навоз 25 т/га			
45.1	51.6	73.8	82.3
N120P120K120 + навоз 50 т/га			
43.2	48.3	77.7	81.9
N190P190K190			
43.3	50.1	74.8	81.3
<i>HCP</i> _{05гибрид}	2.5	<i>HCP</i> _{05гибрид}	4.1
<i>HCP</i> _{05удобрения}	3.6	<i>HCP</i> _{05удобрения}	1.1

Таблица 3. Уравнения взаимных связей между урожайностью сахарной свеклы и содержанием NPK в почве (слой 0–60 см), величинами доз удобрений

Уравнение, у – урожайность			
х – суммарная доза NPK-удобрений	х – содержание N-NO ₃ в почве	х – содержание P ₂ O ₅ в почве	х – содержание K ₂ O в почве
Иностраннй гибрид			
$y = 0.014x + 42.7 (0.856)$	–	$y = 1.710x + 33.61 (0.858)$	–
Отечественный гибрид			
$y = 0.027x + 30.2 (0.899)$	–	$y = 2.470x + 16.61 (0.677)$	$y = 3.856x - 2.249 (0.517)$

Примечание. Прочерк – связь отсутствует, в скобках – коэффициент корреляции.

жалось на 4.2–11.9% меньше корнеплодов, чем иностранного, наибольшая разница отмечена при использовании N45P45K45 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га. Действие удобрений проявилось в большей степени на отечественном гибриде (снижение доли корнеплодов на 0.7–5.0%), в меньшей – на иностранном (в насыщенных NPK вариантах – на 2.1–3.1%), при том, что системы удобрения N45P45K45 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га повышали этот показатель на 0.7–0.9%.

Наибольшая зависимость урожайности корнеплодов от доз удобрений проявилась у отечественного гибрида, в меньшей степени – у иностранного (табл. 3). 1 кг NPK-удобрений в большей мере повышал урожайность гибрида РМС 120, гибрид Митика менее реагировал на увеличение удобрённости.

Изучение показателей эффективного плодородия в почве опытного участка выявило, что величина pH_{KCl} в почве под посевом отечественного гибрида составила 4.99–5.55 ед., под посевом иностранного гибрида она была несколько больше (5.27–5.58 ед.) (табл. 4). Влияние удобрений проявилось в снижении величины показателя под посевом отечественного гибрида на 0.12–0.56 ед., иностранного гибрида – в меньшей степени (на 0.19–0.30 ед.). Максимальное снижение было отмечено в варианте N190P190K190, но под посевом отечественного гибрида оно было выражено в более значительной степени (0.56 по сравнению с 0.30 ед. – иностранного гибрида). Минимальное снижение величины pH_{KCl} отмечено в контроле и в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га. Варианты с высокой насыщенностью минеральными удобрениями (N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 +

+ навоз 50 т/га и N190P190K190) показали большую разницу изменений показателя (0.15–0.28 ед. рН).

Содержание N-NO₃ в слое почвы 0–60 см под посевом отечественного гибрида было больше (0.52–1.14 мг/100 г почвы), иностранного гибрида – (0.58–0.79 мг/100 г почвы). Действие удобрений повышало содержания нитратного азота в почве под посевом гибрида РМС 120 на 21.1–119% относительно контроля, под посевом гибрида Митика отмечено увеличение содержания нитратного азота только в вариантах N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га на 36.2–50.0%, в остальных вариантах достоверных изменений не отмечено. Максимальное повышение содержания нитратного азота в почве под посевом отечественного гибрида было отмечено в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га и N190P190K190.

Сравнение содержания N-NO₃ в почве под посевами отечественного и иностранного гибридов на разных фонах удобренности не выявило четкой закономерности. В контроле, в вариантах N90P90K90 + навоз 25 т/га и N120P120K120 + навоз 50 т/га содержание нитратного азота было на 11.5–40.3% больше в почве под отечественным гибридом, в вариантах N190P190K190 и N135P135K135 + навоз 25 т/га его содержание в почве было больше на 44.3–66.1% под иностранным гибридом, что, возможно, свидетельствовало о снижении его поглощения растениями. В целом не выявлено четкой зависимости содержания этой формы азота от особенностей поглощения элемента возделываемыми гибридами.

В слое 0–60 см под посевом отечественного гибрида содержалось на 2.75–10.6% больше подвижного P₂O₅, чем под иностранным: 5.91–11.2 и 5.75–10.9 мг/100 г почвы соответственно, что свидетельствовало о более интенсивном поглощении элемента растениями иностранного гибрида. Наибольшая разница была отмечена в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га и N190P190K190, в контроле и в варианте N135P135K135 + навоз 25 т/га различий не отмечено, а в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га было выявлено небольшое преимущество в содержании фосфора в почве под посевом иностранного гибрида (5.16%).

Применение удобрений способствовало повышению содержания P₂O₅ относительно контроля в слое 0–60 см почвы под посевом отечественного гибрида на 30.6–89.5%, иностранного – 20.9–89.6%. Самое высокое содержание фосфора было отмечено в почве под посевами изученных гибридов при действии систем N135P135K135 + навоз

Таблица 4. Агрохимические свойства почвы под посевами гибридов сахарной свеклы отечественной и иностранной селекции

pH _{KCl} , ед. рН		N-NO ₃		P ₂ O ₅		K ₂ O	
1	2	1	2	1	2	1	2
мг/100 г почвы							
Контроль (без удобрений)							
5.55	5.57	0.52	0.58	5.91	5.75	9.27	10.9
N45P45K45 + навоз 25 т/га							
5.56	5.56	0.63	0.59	7.27	6.95	10.5	10.1
N90P90K90 + навоз 25 т/га							
5.3	5.34	0.62	0.87	8.72	9.17	11.4	10.1
N135P135K135 + навоз 25 т/га							
5.22	5.38	1.14	0.79	11.2	10.9	11.1	9.92
N120P120K120 + навоз 50 т/га							
5.43	5.58	0.44	0.51	8.88	8.03	10.3	10.3
N190P190K190							
4.99	5.27	0.98	0.59	9.1	8.64	12.7	11.3

Примечание. В графе 1 – отечественный, 2 – иностранный гибрид. То же в табл. 5.

25 т/га, N190P190K190 и N120P120K120 + навоз 50 т/га. Меньшее содержание элемента в почве под посевами изученных гибридов установлено в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га. Данные свидетельствовали о более интенсивном поглощении элемента в контрольном варианте, это явление было более характерным для посева иностранного гибрида.

Содержание K₂O в почве под посевом отечественного гибрида составило 9.27–12.7 мг/100 г почвы, иностранного – 9.92–11.29 мг/100 г почвы. Выявлено, что в почве под посевом иностранного гибрида в контрольном варианте содержалось на 17.9% больше обменного K₂O, чем под посевом отечественного гибрида, что свидетельствовало о более интенсивном поглощении элемента последним, тогда как в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га, N190P190K190 и N120P120K120 + навоз 50 т/га его было больше на 4.47–13.4% под посевом гибрида РМС 120 (относительно гибрида Митика), что позволило сделать вывод о более значительном поглощении калия иностранным гибридом. Различное использование удобрений сахарной свеклой способствовало увеличению содержания K₂O в почве на 11.2–36.6% под посевом отечественного гибрида, но снижало этот показатель на 6.04–9.24% в почве под посевом иностранного гибрида, что также свидетельствовало об усилен-

Таблица 5. Коэффициенты использования питательных веществ из удобрений (КИУ) и почвы (КИП) (среднее за 2019–2020 гг.)

КИУ						КИП					
1			1			1			1		
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N45P45K45 + навоз 25 т/га											
22	4	44	–	15	–	40	13	30	100	23	29
N90P90K90 + навоз 25 т/га											
27	12	37	–	17	36	46	12	29	73	21	32
N135P135K135 + навоз 25 т/га											
38	27	27	4	12	16	42	10	32	61	20	45
N120P120K120 + навоз 50 т/га											
33	7	32	35	14	16	29	14	36	52	16	33
N190P190K190											
29	3	52	42	9	12	92	11	44	89	22	39

ном поглощении элемента иностранным гибридом в вариантах с высокой удобренностью.

Содержание нитратного азота в слое 0–60 см почвы не оказывало достоверного влияния на урожайность корнеплодов как иностранного, так и отечественного гибридов. Наиболее тесная связь содержания P₂O₅ в почве и урожайности проявилась у гибрида Митика ($r^2 = 0.858$), менее – у гибрида РМС 120 ($r^2 = 0.677$). Повышение содержания нитратного азота в почве в наибольшей степени способствовало увеличению урожайности отечественного гибрида, менее – иностранного.

Повышение содержания K₂O на 1 мг/100 г в почве под посевом отечественного гибрида оказало достоверное влияние на урожайность корнеплодов ($r^2 = 0.517$), увеличив ее на 1.61 т/га. Для иностранного гибрида эта закономерность не обнаружена.

Расчет коэффициента использования питательных веществ из удобрений (КИУ) разными гибридами выявил, что как отечественным, так и иностранным гибридом сахарной свеклы использовался более всего K₂O удобрений, азот – несколько меньше, менее всего – P₂O₅. Азот удобрений в основном наиболее интенсивно использовался отечественным гибридом (КИУ = 22–38%) (табл. 5), а при внесении высоких доз удобрений – также и иностранным гибридом (КИУ = 35–42%). Наибольшее потребление азота удобрений обоими изученными гибридами отмечено при внесении N120P120K120 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га, гибридом Митика – N190P190K190. Увеличение доз удобрений обеспе-

чивало повышение КИУ азота: у отечественного гибрида – на 5–16%, у иностранного – на 30–38%.

Калий удобрений использовался отечественным гибридом на 27–52%, иностранным – на 12–36%, повышение уровня удобренности снижало использование элемента: гибридом РМС 120 – на 7–17, гибридом Митика – на 19–23%. Наиболее высокий уровень потребления данного элемента отечественным гибридом отмечен при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га, N190P190K190 и N90P90K90 + навоз 25 т/га, иностранным гибридом – в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га.

Наиболее высокий КИУ P₂O₅ отмечен для иностранного гибрида (9–17%), менее – для отечественного гибрида (3–12%), кроме варианта N135P135K135 + навоз 25 т/га (КИУ = 27%). Наибольший КИУ P₂O₅ для иностранного гибрида был отмечен при внесении N120P120K120 + навоз 50 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га, для отечественного гибрида – в вариантах N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га. Отмечена тенденция к повышению КИУ P₂O₅ при увеличении уровня удобренности: у гибрида РМС 120 – на 2–23%, у гибрида Митика отмечали в основном снижение на 1–6%.

Коэффициенты использования питательных веществ из почвы (КИП) были больше у иностранного гибрида, чем у отечественного (52–100 и 29–46% – азота, 16–22 и 10–14 – фосфора), а калия – примерно сопоставимы (32–45 и 29–44% соответственно).

Как у отечественного, так и иностранного гибрида отмечена закономерность снижения использования фосфора из почвы при увеличении

Таблица 6. Экономическая эффективность применения удобрений в опыте

Отечественный гибрид		Иностранный гибрид	
прибыль, тыс. руб./га	рентабельность доп. затрат, %	прибыль, тыс. руб./га	рентабельность доп. затрат, %
N45P45K45 + навоз 25 т/га			
16.6	242	—	71.1
N90P90K90 + навоз 25 т/га			
20.0	214	—	79.4
N135P135K135 + навоз 25 т/га			
27.0	215	4.78	101
N120P120K120 + навоз 50 т/га			
17.5	164	—	57.9
N190P190K190			
20.1	181	—	81.0

Примечание. Рентабельность дополнительных затрат — рентабельность применения удобрений и приобретения семян сахарной свеклы.

доз удобрений, но повышения использования калия, что являлось положительным фактом, т.к. способствовало сохранению фосфатного фонда почвы, но использовало значительные запасы почвенного K_2O , имевшееся в черноземах. Потребление азота почвы отечественным гибридом повышалось относительно контроля при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + навоз 25 т/га и N120P120K120 + навоз 50 т/га и снижалось в других вариантах опыта, иностранным гибридом — снижалось во всех вариантах, кроме N190P190K190.

Выявлено, что применение разных доз удобрений обеспечивало высокую рентабельность дополнительных затрат (рентабельность применения удобрений и приобретения семян без учета стоимости других затрат на возделывание культуры (обработку почвы, агротехнических мероприятий при возделывании, уборки, транспортировки урожая)) при возделывании отечественного гибрида (164–242%) (табл. 6), более всего — при использовании N45P45K45 + навоз 25 т/га, а прибыль (20.0–27.0 тыс. руб./га) — при действии систем N135P135K135 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + навоз 25 т/га и N190P190K190.

Наибольшая экономическая эффективность возделывания отечественных гибридов (сочетание рентабельности и прибыли) отмечена при использовании систем удобрения N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га. Применение удобрений в посеве иностранного гибрида не было экономически эффективным, кроме варианта N135P135K135 + навоз 25 т/га, ко-

торый обеспечил невысокую рентабельность (101%) и небольшую прибыль (4.79 тыс. руб./га).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что наиболее высокий уровень урожайности корнеплодов отечественного гибрида сахарной свеклы в опыте (43.2–45.1 т/га) обеспечивало применение систем удобрения N135P135K135 под культуру на фоне внесения навоза 25 т/га в пару, N120P120K120 + навоз 50 т/га в пару и N190P190K190, иностранного гибрида (50.1–51.6 т/га) — N135P135K135 + навоз 25 т/га в пару и N190P190K190. Отечественный гибрид в большей степени использовал элементы питания из удобрений, что подтверждено повышением урожайности относительно контроля и составило 52.6–59.3%, тогда как иностранный гибрид использовал элементы питания из удобрений в значительно меньшей степени (увеличение урожайности на 6.25–22.3%).

Наибольшая прямая корреляция между величиной урожайности корнеплодов от доз удобрений отмечена у отечественного гибрида, в меньшей степени — у иностранного гибрида.

Применение систем удобрения N90P90K90 + навоз 25 т/га в пару и N135P135K135 + навоз 25 т/га в пару в посевах отечественного гибрида было экономически эффективным (прибыль составила 20.0–27.0 тыс. руб./га, рентабельность дополнительных затрат — 214–215%), тогда как для иностранного гибрида оно не было окупаемым.

Изучение содержания элементов питания в почве выявило, что под посевом отечественного

гибрида содержалось на 2.75–10.6% больше подвижных форм P_2O_5 , на 4.47–13.4% — K_2O , чем под посевом иностранного гибрида, это свидетельствовало о повышенном их поглощении последним. Под действием удобрений в почве под посевом отечественного гибрида отмечено повышение содержания нитратного азота на 21.1–119%, P_2O_5 — на 30.6–89.5%, K_2O — на 11.2–36.6% относительно контроля, тогда как под посевом иностранного гибрида выявлено увеличение содержания P_2O_5 на 20.9–89.6, но снижение содержания K_2O — на 6.04–9.24%, а также не были отмечены четкие закономерности динамики содержания $N-NO_3$. Особенности развития растений иностранного гибрида сахарной свеклы в меньшей степени влияли на величину pH_{KCl} почвы, чем отечественного гибрида, а при взаимодействии с удобрениями кислотность почвы под посевом отечественного гибрида РМС 120 снижалась в большей степени, чем под посевом иностранного гибрида Митика.

Выявлено, что азот и калий удобрений лучше использовал отечественный гибрид, фосфор — иностранный (кроме варианта N135P135K135 + + навоз 25 т/га). Потребление азота и P_2O_5 из почвы было более значительным у иностранного гибрида, а интенсивность использования K_2O была сопоставима с КИП данного элемента отечественным гибридом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. М.: Росинформагротех, 2020. 26 с.
2. Фурсов С.В. Перспективы производства основных видов сельскохозяйственной продукции в условиях импортозамещения // Научн. ведомости Белгород. гос. ун-та. Сер. Экономика. Информатика. 2018. Т. 45. № 4. С. 681–692.
3. Чекмарев П.А. Успех, добытый самоотверженным трудом // Защита и карантин раст. 2017. № 1. С. 3–6.
4. Азжеев М.В. Проблемы развития свеклосахарного подкомплекса в условиях импортозамещения / Экономические проблемы развития агропромышленного комплекса в условиях импортозамещения. Мичуринск: МичГАУ, 2015. С. 12–18.
5. Койнова А.Н. Сахарная свекла: в поисках рентабельности // АгроФорум. 2019. № 6. С. 32–35.
6. Святова О.В., Солошенко В.М. Оценка уровня конкурентоспособности отечественных сортов и гибридов сахарной свеклы // Вестн. Курск. ГСХА. 2008. № 4. С. 53–58.
7. Смуров С.И., Иевлев Д.М., Григоров О.В., Шестакова Р.И. Продуктивность отечественных и зарубежных гибридов на разных фонах питания // Сахар. свекла. 2008. № 5. С. 28–30.
8. Заволока И.П., Гостев О.Н., Верецагин Ю.И. Продуктивность гибридов сахарной свеклы отечественной и зарубежной селекции в условиях северо-восточной части ЦЧЗ / Сб. научн. тр., посвящ. 85-летию Мичурин. ГАУ. Мичуринск: МичГАУ, 2016. С. 25–29.
9. Алексеенкова Е. Сахарная свекла: в поисках рентабельности // АгроФорум. 2020. № 1. С. 48–50.
10. Афонин Н.М., Громов А.С., Панков С.М. Определение гибридов сахарной свеклы, наиболее подходящих для выращивания в условиях Тамбовской области // Наука и образование. 2021. Т. 4. № 1. С. 1.
11. Кривичев Д.А., Оганесян С.К. Практические рекомендации по повышению эффективности производства сахарной свеклы в Краснодарском крае // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сб. ст. по мат-лам 71-й научн.-практ. конф. преподавателей по итогам НИР за 2015 г. 2016. С. 618–619.
12. Цыкалов А.Н., Рыльков И.В., Бабин К.Ю. Результаты изучения гибридов сахарной свеклы, представленных АО «Щелково Агрохим» в 2012–2014 гг. // Инновационные технологии производства зерновых, зернобобовых, технических и кормовых культур. 2016. С. 258–264.
13. Кравцов А.М., Бровкина Т.Я., Павелко И.А. Продуктивность гибридов отечественной и зарубежной селекции сахарной свеклы в зависимости от агротехнических факторов // Энтузиасты аграрной науки. Сб. ст. по мат-лам Всерос. научн.-практ. конф. Краснодар: КубГАУ, 2019. С. 32–43.
14. Смуров С.И., Иевлев Д.М., Григоров О.В., Шестакова Р.И. Продуктивность отечественных и зарубежных гибридов на разных фонах питания // Сахарная свекла. 2008. № 5. С. 28–30.
15. Жеряков Е.В. Отзывчивость сорта и гибридов сахарной свеклы на минеральные удобрения // Вестн. Алтай. ГАУ. 2012. № 11 (97). С. 7–12.
16. Курьиндин А.В. Основной элемент повышения продуктивности сахарной свеклы на современном этапе — гибрид интенсивного типа // Тенденции развития науки и образ-я. 2019. № 50 (3). С. 58–60.
17. Ошкин В.А., Костин В.И., Смирнова Н.В. Влияние внекорневой подкормки на технологические качества корнеплодов // Вестн. Ульянов. ГСХА. 2016. № 1. С. 72–75.
18. Дроздова В.В., Редина Н.Е. Влияние минеральных удобрений на питательный режим почвы, урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы // Политемат. сетев. электр. научн. журн. Кубан. ГАУ. 2015. № 111. С. 1643–1657.
19. Шафран С.А., Минакова В.А., Ильюшенко И.В., Александрова Л.В. Влияние удобрений и агрохимических свойств черноземов выщелоченных на урожайность сахарной свеклы // Плодородие. 2015. № 5 (86). С. 27–29.
20. Подрезов П.И., Мязин Н.Г., Кожокина А.Н. Влияние многолетнего внесения удобрений на урожайность и качество урожая сахарной свеклы, выращиваемой на черноземе типичном // Вестн. Воронеж. ГАУ. 2021. Т. 14. № 4 (71). С. 49–57.

21. *Леплявченко Л.П., Суетов В.П., Громова Л.И., Онищенко Л.М., Дроздова В.В., Ерезенко Е.Е., Осипов М.А.* Агрохимические свойства чернозема выщелоченного и продуктивность полевого севооборота в связи с применением минеральных удобрений // Политемат. сетев. электр. научн. журн. Кубан. ГАУ. 2009. № 46. С. 133–187.
22. *Громовик А.И., Королев В.А.* Влияние длительного применения удобрений в зернопаропропашном севообороте на показатели плодородия чернозема выщелоченного // Агрохимия. 2014. № 12. С. 10–15.
23. *Боева Н.Н., Дериглазова Г.М.* Параметры изменения показателей плодородия чернозема типичного при многолетнем использовании удобрений // Вестн. Курск. ГСХА. 2019. № 2. С. 16–20.
24. *Минакова О.А., Александрова Л.В., Куницын Д.А.* Изменение почвенного плодородия и урожайности сахарной свеклы при длительном применении удобрений в зернопаропропашном севообороте лесостепи Центрального Черноземного региона // Агрохимия. 2018. № 1. С. 52–60.
25. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. М.: Изд-во стандартов, 1985. 6 с.
26. *Щеглов Д.И., Громовик А.И., Горбунова Н.С.* Основы химического анализа почв. Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2019. 332 с.
27. ГОСТ 26204-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. М.: Комитет по стандартизации и метрологии, 1992. 8 с.
28. *Барштейн Л.А., Гизбуллин Н.Т.* Методика исследований на сахарной свекле. Киев: ВНИИСС, 1986. 262 с.
29. Нормативные показатели выноса и коэффициент использования питательных веществ сельскохозяйственными культурами из минеральных удобрений и почв. М.: ЦИНАО, 1986. 110 с.
30. Интегрированное применение удобрений в адаптивно-ландшафтном земледелии в нечерноземной зоне европейской части России (практ. рук-во) / Под ред. Л. М. Державина. М.: ВНИИА, 2005. 160 с.
31. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М., 1985. 351 с.

Influence of Different Levels of Soil Fertilization on the Characteristics of NPK Consumption and the Yield of Sugar Beet Hybrids of Domestic and Foreign Breeding in the Central Chernozem Region

O. A. Minakova^{a, #}, L. V. Alexandrova^a, and V. M. Vilkov^a

^aA.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar
VNIIS 86, Ramonsky district, Voronezh region 396030, Russia

[#]E-mail: olalmin2@rambler.ru

It was revealed that in the conditions of the Central Chernozem region, the yield of foreign hybrid root crops was 5.1–6.8 t/ha higher compared to the domestic one, but it responded less to the use of fertilizers, as a result of which its cultivation in most of the studied variants was unprofitable. The correlation dependence of the yield of the main product on the level of fertilization was more pronounced when cultivating a domestic hybrid. Cultivation of a hybrid of sugar beet of domestic selection on the same backgrounds of the main fertilizer compared with a foreign hybrid differed by 2.75–10.6% in the content of mobile forms of P₂O₅ in the soil, by 4.47–13.4% — K₂O, but by 0.02–0.28 less — by the value of pH_{KCl}. Nitrogen and potassium fertilizers were better used by a domestic hybrid, and phosphorus by a foreign one.

Key words: domestic breeding, sugar beet, fertilizers, soil, utilization factor, economic efficiency.

УДК 632.952:632.4:633.491

ФУНГИЦИДНАЯ АКТИВНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ В ОТНОШЕНИИ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ АЛЬТЕРНАРИОЗА КАРТОФЕЛЯ

© 2022 г. А. С. Орина^{1,*}, А. В. Хютти¹, А. М. Шпанев¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: orina-alex@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.04.2022 г.

После доработки 03.06.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Альтерналиоз — одно из самых распространенных заболеваний картофеля во всем мире, в том числе и в России, которое может вызывать снижение урожая клубней на 10–50%. На территории РФ область высокой вредоносности альтерналиоза совпадает с ареалом наиболее патогенного вида *Alternaria solani*, тогда как другой возбудитель *A. tenuissima* встречается во всей зоне возделывания картофеля. Наиболее действенной мерой борьбы с данным заболеванием является химический метод защиты. Однако современные подходы к защите растений также предполагают применение биологических средств. При лабораторной оценке действия 10 химических и 9 биологических препаратов в отношении возбудителей альтерналиоза картофеля установлено, что все проанализированные препараты подавляли рост грибов *Alternaria*: ингибирующее действие химических и биологических фунгицидов варьировало в диапазоне 33–80% и 20–66% соответственно. Показано, что препараты Дискор и Ревус Топ, содержащие дифеноконазол и мандипропамид, а также препарат Луна Транквили на основе пириметанила и флуопирама наиболее эффективно подавляли рост этих грибов (ингибирующее действие 68–80%). Среди биологических препаратов наиболее эффективно рост грибов *Alternaria* подавляли БФТИМ КС-2 и Витаплан на основе *Bacillus amyloliquefaciens* и *B. subtilis*, их ингибирующее действие составило 60–66%. Полученные результаты предваряют проведение полевых испытаний препаратов в регионах возделывания культуры с разными природно-климатическими условиями, для создания адекватной стратегии защиты картофеля от альтерналиоза.

Ключевые слова: альтерналиоз, картофель, *Alternaria solani*, *Alternaria tenuissima*, фунгицидное действие, химические средства защиты растений, биологические препараты.

DOI: 10.31857/S0002188122100076

ВВЕДЕНИЕ

Альтерналиоз является одним из самых распространенных заболеваний картофеля во всем мире. Вредоносность болезни проявляется прежде всего в снижении урожая из-за уменьшения фотосинтетической поверхности листьев, а также в возможности загрязнении сельскохозяйственной продукции метаболитами грибов-возбудителей, среди которых могут присутствовать фитотоксины, микотоксины, аллергены и ферменты [1]. Поражение посадок картофеля альтерналиозом снижает урожай клубней на 10–50% [2–6].

На территории России зона высокой вредоносности альтерналиоза совпадает с ареалом наиболее патогенного вида *Alternaria solani* Soraue и находится в центре и на юге европейской части России, а также на юге Западной Сибири, в Прибайкалье и в Приморье на Дальнем Востоке [7–

10]. Повышенные температуры воздуха в сочетании с кратковременным выпадением осадков и обильными утренними росами благоприятны для развития *A. solani*. Тогда как вид *A. tenuissima* (Kunze) Wiltshire и другие мелкоспоровые виды *Alternaria* в меньшей степени зависят от климатических условий и распространены на всей территории возделывания картофеля в России [10]. В последние годы из-за потепления климата участились случаи сильного поражения растений картофеля альтерналиозом в Центральном и Северо-Западном регионах [11, 12].

В ограничении развития альтерналиоза картофеля большое значение имеет возделывание устойчивых сортов, использование качественного посадочного материала, поддержание оптимального для растений питательного режима за счет внесения полного минерального удобрения с

Таблица 1. Химические и биологические препараты, включенные в исследование

Препарат	Действующее вещество (д.в.)/биологический агент (б.а.)	Норма расхода, кг, л*	Концентрация д.в. (г/л)/б.а. (КОЕ/л) в рабочем растворе**
Химические препараты			
Акробат МЦ, ВДГ	Манкоцеб 600 г/кг + диметоморф 90 г/кг	2.00	4.00 + 0.60
Дискор, КЭ	Дифеноконазол 250 г/л	0.40	0.33
Зорвек Энкантия, СЭ	Фамоксадон 300 г/л + оксатиапипролин 30 г/л	0.65	0.65 + 0.06
Луна Транквилити, КС	Пириметанил 375 г/л + флуопирам 125 г/л	0.80	1.00 + 0.33
Пеннкоцеб, СП	Манкоцеб 800 г/кг	1.60	4.27
Ревус Топ, СК	Дифеноконазол 250 г/л + мандипропамид 250 г/л	0.60	0.50 + 0.50
Ридомил Голд МЦ, ВДГ	Манкоцеб 640 г/кг + мефеноксам 40 г/кг	2.50	5.33 + 0.33
Сектин Феномен, ВфДГ	Манкоцеб 500 г/кг + фенамидон 100 г/кг	1.25	2.08 + 0.42
Сигнум, ВДГ	Боскалид 267 г/кг + пиракlostробин 67 г/кг	0.30	0.27 + 0.07
Танос, ВДГ	Фамоксадон 250 г/кг + цимоксанил 250 г/кг	0.60	0.50 + 0.50
Биологические препараты			
Бактофит, СК	<i>Bacillus subtilis</i> ИПМ 215 (БА-10000 ЕА/мл, 2×10^9 КОЕ/мл)	2.00	1.30×10^{10}
Бисолбисан, Ж	<i>B. subtilis</i> Ч-13, 10^8 КОЕ/мл	3.00	10^9
БФТИМ КС-2, Ж	<i>B. amyloliquefaciens</i> ВКПМ В-11141, 10^9 КОЕ/мл	4.00	1.30×10^{10}
Витаплан, СП	<i>B. subtilis</i> ВКМ-В-2604D 10^{10} КОЕ/г + <i>B. subtilis</i> ВКМ-В-2605D 10^{10} КОЕ/г	0.08	$2.70 \times 10^9 + 2.70 \times 10^9$
Трихоцин, СП	<i>Trichoderma harzianum</i> Г-30 ВИЗР, 10^{10} КОЕ/г	0.08	2.70×10^9
Фитоспорин-М, Ж	<i>B. subtilis</i> 26 Д 10^9 КОЕ/мл	4.00	1.30×10^{10}
Экспериментальный-1, Ж	<i>B. mojavensis</i> PS 17, 5×10^9 КОЕ/мл	3.00	5.00×10^{10}
Экспериментальный-2, С	<i>B. subtilis</i> 5И-12/23, 10^{10} КОЕ/мл	5.00	8.30×10^{11}
Экспериментальный-3, Ж	<i>B. subtilis</i> RCAM01729, 10^9 КОЕ/мл	3.00	10^{10}

*По инструкции производителя.

**Из расчета 300 л рабочего раствора/га обрабатываемой площади.

повышенными нормами калия [13]. При этом наиболее действенной мерой борьбы с данным заболеванием картофеля является химический метод защиты. Положительные результаты по снижению развития альтернариоза получены при применении в схемах защиты картофеля препаратов на основе азоксистробина, боскалида, дифеноконазола, мандипропамида, пиракlostробина, пириметанила, флуапирама и их комбинаций [12, 14–16]. В то же время отмечена недостаточно высокая эффективность препаратов, содержащих манкоцеб, фамоксадон, флуазинам, хлороталонил и цимоксанил, предназначенных для защиты посадок картофеля от фитофтороза и альтернариоза [13, 17, 18].

Современные тенденции в защите культурных растений от патогенов выражаются в повышении объемов применения биологических средств. Например, показана высокая эффективность предпосадочной обработки клубней и двукратного опрыскивания растений в период вегетации грибами *Trichoderma* sp. и бактерией *Bacillus thuringiensis* для защиты картофеля от альтернариоза [19]. По результатам обработки посадочного материала и 3-кратного опрыскивания вегетирующих растений препаратами на основе штаммов В-10 ВИЗР и М-22 ВИЗР *B. subtilis* отмечено снижение развития альтернариоза в фазе роста клубней на 52.4 и 44.7%, тогда как при использовании химического стандарта Ридомил Голд, содержа-

Таблица 2. Действие химических препаратов на рост грибов *Alternaria* spp.

Препарат	Действующее вещество (д.в.)	Диаметр колонии, мм			Подавление роста, % от контроля		
		<i>A. solani</i>		<i>A. tenuissima</i>	<i>A. solani</i>		<i>A. tenuissima</i>
		MF P628031	MF P747151	MF P713021	MF P628031	MF P747151	MF P713021
Акробат МЦ	Манкоцеб + диметоморф	21.3 ± 1.3	23.0 ± 1.1	40.7 ± 1.7	67	69	46
Дискор	Дифеноконазол	13.0 ± 1.1	16.3 ± 2.4	16.3 ± 0.7	80	73	78
Зорбек	Фамоксадон +	30.3 ± 0.7	28.7 ± 8.8	47.7 ± 6.6	53	53	36
Энкантия	+ оксатиапипролин						
Луна	Пириметанил +	16.7 ± 0.7	15.7 ± 1.7	16.3 ± 1.3	74	74	78
Транквилити	+ флуопирам						
Пеннкоцеб	Манкоцеб	26.3 ± 1.3	22.3 ± 0.7	46.0 ± 1.1	59	63	38
Ревус Топ	Дифеноконазол +	15.3 ± 2.4	17.7 ± 0.7	24.0 ± 2.3	76	71	68
	+ мандипропамид						
Ридомил	Манкоцеб +	26.7 ± 3.5	24.7 ± 2.8	41.7 ± 0.7	59	66	44
Голд МЦ	+ мефеноксам						
Сектин	Манкоцеб +	25.7 ± 3.3	31.7 ± 0.7	42.3 ± 1.3	60	54	43
Феномен	+ фенамидон						
Сигнум	Боскалид +	23.3 ± 1.7	28.7 ± 0.7	30.0 ± 0.1	64	59	60
	+ пиракlostробин						
Танос	Фамоксадон +	34.7 ± 1.7	36.7 ± 1.3	50.3 ± 1.7	46	40	33
	+ цимоксанил						

щего манкоцеб, снижение развития заболевания составило 60.3% [20].

Полевые испытания эффективности фунгицидов в защите культурных растений от фитопатогенов должна предварять лабораторная оценка их активности в отношении чистых культур грибов-возбудителей заболевания, которая позволяет быстро оценить действие препаратов и сравнить их между собой, тогда как полевые испытания требуют больше времени и подвержены влиянию множества факторов.

Цель работы – лабораторная оценка действия современных и перспективных фунгицидов (химических и биологических) в отношении возбудителей альтернариоза картофеля *A. solani* и *A. tenuissima*.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования из коллекции чистых культур микроорганизмов лаборатории микологии и фитопатологии ВИЗР были выбраны 2 штамма гриба *A. solani* MF P628031 и MF P747151, выделенные из листьев картофеля из Адыгеи и Камчатского края соответственно. Также в исследование был включен штамм *A. tenuissima* MF P713021, выделенный из листьев картофеля из республики Дагестан.

Лабораторную оценку действия 10 химических и 9 биологических препаратов в отношении возбудителей альтернариоза картофеля проводили во Всероссийском НИИ защиты растений в 2022 г. Химические фунгициды были представлены одно- и двухкомпонентными препаратами, зарегистрированными на территории РФ для борьбы с альтернариозом (табл. 1). Среди выбранных биологических препаратов восемь имели в составе разные штаммы бактерий *Bacillus* spp., один препарат – микромицет *Trichoderma harzianum* Rifai. Из 9-ти изученных биологических препаратов пять зарегистрированы на территории РФ для борьбы с альтернариозом картофеля. Препарат БФТИМ КС-2, Ж не имеет регистрации на картофеле, 3 препарата являются экспериментальными.

Препараты разводили в стерильной воде таким образом, чтобы получить концентрацию рабочего раствора для обработки 1 га (300 л воды), содержащего максимальную норму расхода, рекомендованную для использования производителем.

В чашках Петри с агаризованной средой Чапека стерильным пробочным сверлом диаметром 4 мм делали две лунки на расстоянии 1 см от края чашки. В каждую лунку вносили по 20 мкл раствора препарата. В контрольном варианте в лунки вносили по 20 мкл стерильной воды. Предварительно культуры штаммов *Alternaria* spp. выращивали на среде Чапека в темноте при 24°C в течение

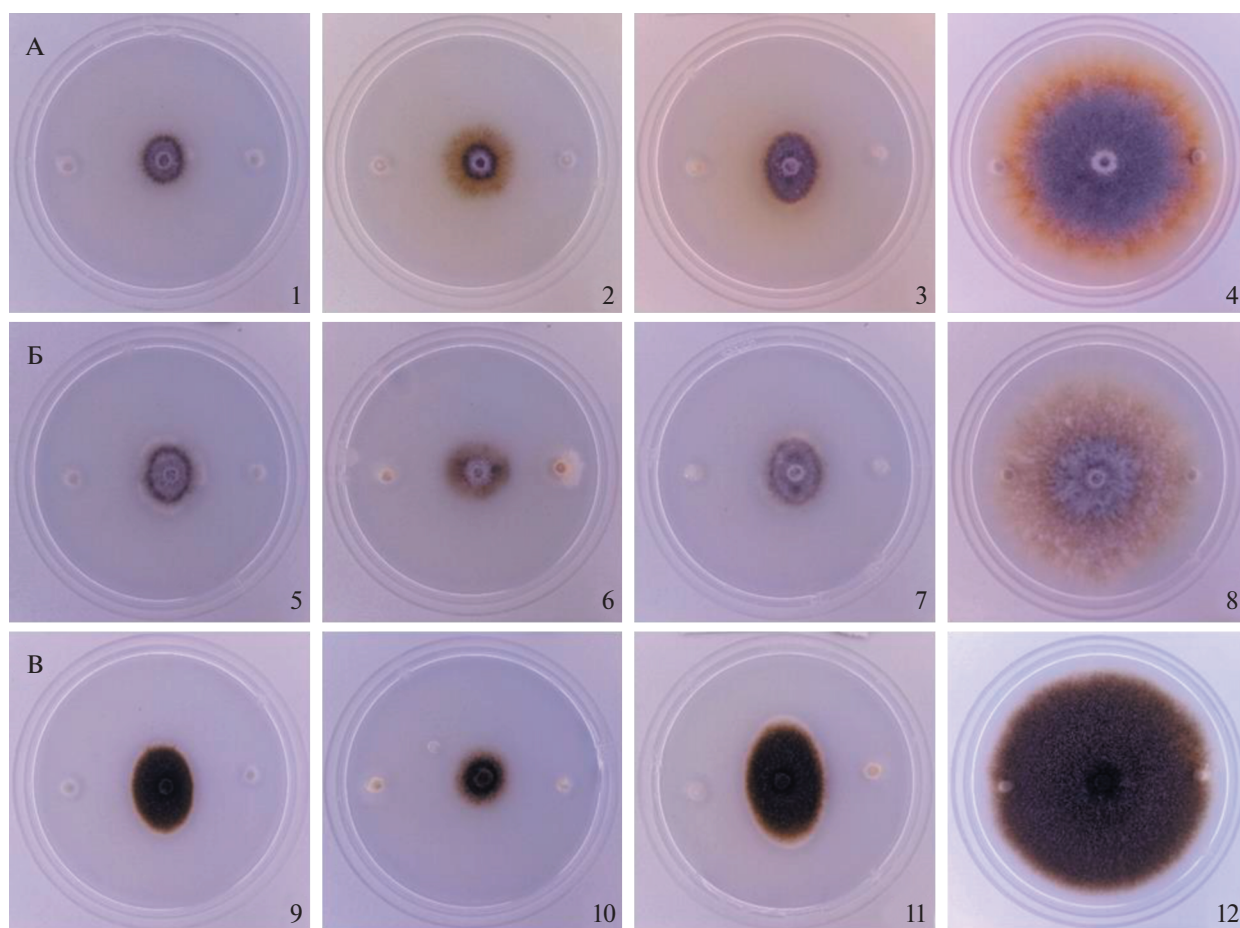


Рис. 1. Действие химических препаратов на рост штаммов *Alternaria solani* MF P747151 (а), MF P628031 (б) и *A. tenuissima* MF P628031 (в). 1, 5, 9 – Дискор, КЭ, 2, 6, 10 – Луна Транквилити, КС, 3, 7, 11 – Ревус Топ, СК, 4, 8, 12 – контроль.

ние 7 сут. Из выросших колоний вырезали диски диаметром 4 мм, которые мицелием вниз помещали на среду в центр каждой чашки Петри с препаратом. Через 7 сут инкубации (24°C, темнота) определяли диаметр колонии гриба, измеряя его по оси между лунками. Из полученной величины вычитали величину инокуляционного диска 4 мм. Эксперимент проводили в 3-х повторностях. Ингибирующее действие препарата на радиальный рост гриба определяли как отношение разницы диаметра колонии в контроле и в варианте к диаметру колонии в контроле, выраженное в %.

Для статистической обработки полученных данных использовали программы Microsoft Excel 2010 и Statistica 10.0, достоверность различий принимали при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На 7-е сутки после инокуляции размер колоний штаммов MF P628031 и MF P747151 *A. solani* оказался сходным и составил 65 ± 4 и 61 ± 2 мм со-

ответственно, тогда как штамм гриба *A. tenuissima* продемонстрировал более высокую скорость роста (диаметр колонии 75 ± 1 мм).

Все химические препараты, включенные в исследование, подавляли рост грибов *Alternaria* spp. (табл. 2). Влияние фунгицидов на рост грибов *A. solani* не имело достоверных различий между штаммами: ингибирующее действие на *A. solani* MF P628031 и MF P747151 варьировало в диапазоне 46–80% и 40–74% соответственно и в среднем составило $63 \pm 7\%$. Ингибирующее действие химических препаратов на рост штамма MF P713021 *A. tenuissima* в среднем составило $52 \pm 11\%$ (диапазон варьирования 33–78%). Штамм MF P713021 *A. tenuissima* оказался на 10–26% менее чувствительным к 6-ти препаратам, чем проанализированные штаммы *A. solani*, тогда как 4 препарата (Сигнум, Ревус Топ, Дискор, Луна Транквилити) подавляли рост всех штаммов *Alternaria* spp. в сходной степени. В среднем чувствительность штамма *A. tenuissima* ко всем химическим фунгицидам была достоверно меньше на 11% ($p = 0.044$).

Таблица 3. Действие биологических препаратов на рост грибов *Alternaria* spp.

Препарат	Биологический агент (б.а.)	Диаметр колонии, мм			Подавление роста, % от контроля		
		<i>A. solani</i>		<i>A. tenuissima</i>	<i>A. solani</i>		<i>A. tenuissima</i>
		MF P628031	MF P747151	MF P713021	MF P628031	MF P747151	MF P713021
Бактофит	<i>B. subtilis</i> ИПМ 215	28.0 ± 3.0	27.0 ± 3.0	33.7 ± 0.7	57	56	55
БФТИМ КС-2	<i>B. amyloliquefaciens</i> ВКПМ В-11141	25.3 ± 0.7	23.3 ± 1.7	25.7 ± 0.7	61	62	66
Фитоспорин-М	<i>B. subtilis</i> 26 Д	28.7 ± 3.5	28.7 ± 2.4	34.3 ± 0.7	56	53	54
Витаплан	<i>B. subtilis</i> ВКМ-В-2604Д + + <i>B. subtilis</i> ВКМ-В-2605Д	27.0 ± 1.1	24.3 ± 2.6	28.7 ± 1.3	58	60	62
Трихоцин	<i>T. harzianum</i> Г-30 ВИЗР	28.7 ± 1.3	21.3 ± 2.4	40.7 ± 2.8	56	65	46
Бисолбисан	<i>B. subtilis</i> штамм Ч-13	40.3 ± 3.3	48.7 ± 1.7	55.0 ± 6.3	38	20	26
Экспериментальный-1	<i>B. mojavensis</i> штамм PS 17	29.3 ± 3.5	24.7 ± 1.3	35.0 ± 2.3	55	59	53
Экспериментальный-2	<i>B. subtilis</i> штамм 5И-12/23	35.0 ± 3.0	22.0 ± 8.5	39.3 ± 2.4	46	64	47
Экспериментальный-3	<i>B. subtilis</i> штамм RCAM01729	34.3 ± 0.7	32.3 ± 8.2	39.3 ± 0.7	47	47	47

Ранее была показана более низкая чувствительность штаммов мелкоспоровых видов *Alternaria*, включающих *A. tenuissima*, *A. alternata* (Fr.) Keissl. и другие, к манкоцебу, азоксистробину, флудиоксону, хлороталонилю, дифеноконазолу и флуазиному по сравнению с штаммами *A. solani* [21]. Штаммы *A. alternata*, выделенные из картофеля в США, также в среднем оказались менее чувствительны к азоксистробину, чем штаммы *A. solani* [22, 23].

Среди проанализированных химических фунгицидов наиболее эффективно рост грибов *Alternaria* подавляли препараты Дискор и Ревус Топ, содержащие дифеноконазол и мандипропамид, а также препарат Луна Транквилити на основе пириметанила и флуопирама — их ингибирующее действие на штаммы *Alternaria* spp. составило 68–78% (рис. 1). Менее эффективными в отношении грибов *Alternaria* оказались препараты, содержащие манкоцеб (Акробат, Ридомил Голд, Пеннкоцеб, Сектин Феномен), ингибирующее действие которых на рост проанализированных штаммов в среднем оказалось равно $56 \pm 6\%$.

Ранее при исследовании влияния фунгицидов на рост 301 изолята *Alternaria* spp., выделенных из картофеля и томата в 5-ти регионах России, была выявлена более высокая эффективность дифеноконазола в сравнении с манкоцебом: в 172 и 1605 раз для *A. solani* и мелкоспоровых штаммов *Alter-*

naria соответственно [21]. В полевых испытаниях с искусственной инокуляцией растений картофеля грибами *Alternaria* в Австралии дифеноконазол более эффективно ограничивал развитие заболевания в сравнении с азоксистробином и боскалидом [24].

Анализ влияния 12 действующих веществ (д.в.) и их комбинаций на рост 26 штаммов *A. solani* показал более высокую эффективность пириметанила, а также его комбинации с флуопирамом, по сравнению с д.в. из классов имидазолины (фенамидон), карбоксамиды (боскалид, пентиопирад), оксизолиндиндионы (фамоксодон), пиридинил-этилбензамиды (флуопирам), стробилурины (азоксистробин, пикоксистробин, пираклостробин, трифлуксистробин) и хлороталонилом [25]. Установлено, что резистентность штаммов *A. solani* к флуопираму встречается реже, чем к д.в. из других классов [25].

В нашем исследовании препарат Сигнум на основе пираклостробина продемонстрировал среднюю эффективность (60%) в ограничении роста штаммов *Alternaria* spp. Известно, что штаммы *Alternaria* spp. могут приобретать резистентность к д.в. класса стробилурины [22, 23, 26]. Наличие мутации гена *cyt b*, ответственной за резистентность к стробилуринам у грибов *Alternaria*, можно диагностировать с помощью ПЦР [23]. Анализ чувствительности штаммов *Alternaria*, вы-

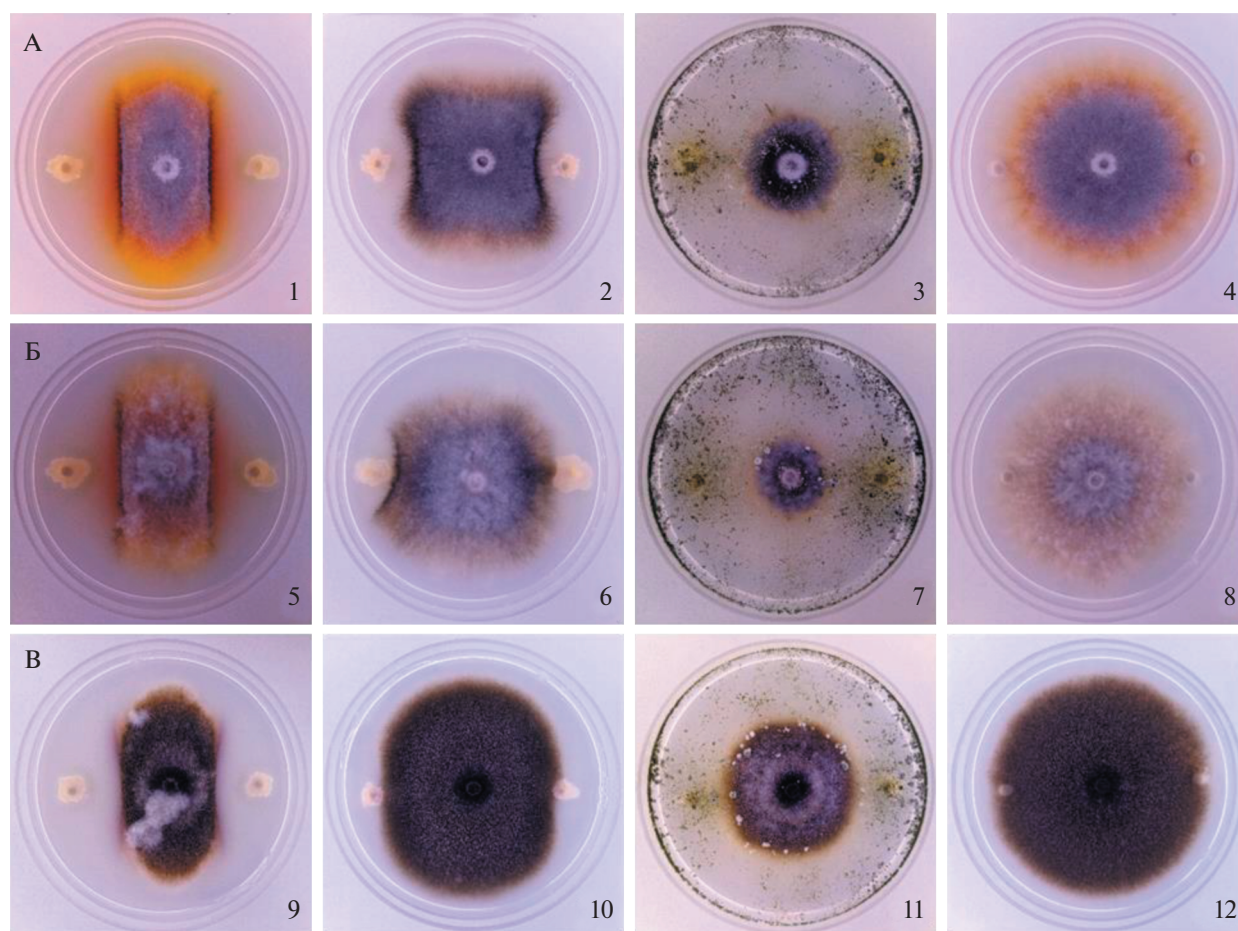


Рис. 2. Действие биологических препаратов на рост штаммов *Alternaria solani* MF P747151 (а), MF P628031 (б) и *A. tenuissima* MF P628031 (в). 1, 5, 9 – БФТИМ КС-2, Ж, 2, 6, 10 – Бисолбисан, Ж, 3, 7, 11 – Трихоцин, СП, 4, 8, 12 – контроль.

деленных из картофеля и томата в России, не выявил резистентные штаммы в популяции возбудителей альтернариоза в 7-ми регионах европейской части страны и на Дальнем Востоке [21].

Все биологические препараты, включенные в исследование, также подавляли рост грибов *Alternaria* spp. (табл. 3). Ингибирующее действие препаратов на рост штаммов *A. solani* варьировало в диапазоне 20–65% (в среднем $53 \pm 5\%$), тогда как ограничение роста штамма MF P713021 *A. tenuissima* составило от 26 до 66% и в среднем оказалось равно $52 \pm 11\%$. Достоверные различия в действии проанализированных биологических препаратов на рост разных штаммов *Alternaria* spp. не выявлены. Исключение составил препарат Трихоцин на основе *T. harzianum*, ингибирующее действие которого на рост как 2-х штаммов MF P628031 и MF P747151 *A. solani*, так и штамма MF P713021 *A. tenuissima*, существенно варьировало от 46 до 65% (рис. 2).

Среди проанализированных биологических препаратов наиболее эффективно рост грибов *Alternaria* подавляли препараты БФТИМ КС-2 и Витаплан на основе *B. amyloliquefaciens* и *B. subtilis*, их ингибирующее действие в среднем составило 63 ± 3 и $60 \pm 2\%$ соответственно. Наименее эффективным в отношении грибов *Alternaria* spp. оказался препарат Бисолбисан, также содержащий в составе споры *B. subtilis* (ингибирующее действие равно $28 \pm 10\%$). Стоит отметить, что среди всех проанализированных биологических препаратов Витаплан характеризовался наименьшей концентрацией биологического агента в рабочем растворе – 1×10^9 КОЕ/л.

Ранее среди 8-ми изученных биологических агентов – штаммов бактерий родов *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas* и грибов *Trichoderma*, – штаммы *B. thuringiensis* и *Trichoderma* sp. наиболее эффективно ингибировали прорастание спор *A. solani* [27]. В нашем исследовании штаммы *B. amyloliquefaciens* и *B. subtilis* в составе 2-х био-

препаратов продемонстрировали эффективность ингибирования роста грибов *Alternaria*, сопоставимую с показателями химических препаратов. Известно, что бактерии *Bacillus* могут образовывать вторичные метаболиты с антифунгальной активностью в отношении широкого спектра грибов [28], в т.ч. циклические липопептиды, белки [29] и летучие органические соединения (ЛОС) [30]. Показано, что ЛОС, продуцируемые бактериями *B. amyloliquefaciens*, ограничивают рост мицелия и ингибируют прорастание спор *A. solani* [30], и могут быть использованы как биорациональные пестициды для защиты растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате лабораторной оценки действия 19 фунгицидов показано, что все проанализированные препараты подавляли рост грибов *Alternaria*: ингибирующее действие химических и биологических фунгицидов варьировало в диапазоне 33–80 и 20–66% соответственно.

Среди 10 химических фунгицидов препараты Дискор и Ревус Топ, содержащие дифеноконазол и мандипропамид, а также препарат Луна Транквилити на основе пириметанила и флуопирама наиболее эффективно подавляли рост грибов *A. solani* и *A. tenuissima*. При этом широко используемые в схемах защиты картофеля от болезней препараты на основе манкоцеба не были столь эффективными, особенно в отношении вида *A. tenuissima*.

Среди 9-ти биологических препаратов наиболее активными в отношении грибов *Alternaria* оказались препараты БФТИМ КС-2 и Витаплан на основе *B. amyloliquefaciens* и *B. subtilis*, их эффективность была сопоставима с многими анализированными химическими препаратами. Препарат БФТИМ КС-2 на данный момент не имеет регистрации к применению на посадках картофеля в защите от альтернариоза.

Полученные результаты дали оценку действия химических и биологических препаратов на рост чистых культур грибов *Alternaria* — возбудителей альтернариоза. Необходимо проведение полевых испытаний препаратов в регионах возделывания культуры с разными природно-климатическими условиями, для создания адекватной стратегии защиты картофеля от альтернариоза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганнибал Ф.Б. Мониторинг альтернариозов сельскохозяйственных культур и идентификация грибов рода *Alternaria*. СПб.: ВИЗР, 2011. 70 с.

2. Воловик А.С., Литун Б.П. Вредоносность заболеваний картофеля // Защита растений. 1975. № 7. С. 4–6.
3. Kuczyńska J. Wpływ niektórych czynników na występowanie i szkodliwość alternariozy ziemniaka // Biul. Inst. Ziemn. 1992. V. 41. P. 73–87.
4. Иванюк В.Г., Банадысев С.А., Журомский Г.К. Защита картофеля от болезней, вредителей и сорняков. Минск: Белорусский НИИ картофелеводства, 2003. 550 с.
5. Olanya O.M., Honeycutt C.W., Larkin R.P., Griffin T.S., He Z., Halloran J.M. The effect of cropping systems and irrigation management on development of potato early blight // J. Gener. Plant Pathol. 2009. V. 75. P. 267–275.
6. Yellareddygar S.K.R., Taylor R.J., Pasche J.S., Zhang A., Gudmestad N.C. Predicting potato tuber yield loss due to early blight severity in the Midwestern United States // Europ. J. Plant Pathol. 2018. V. 152 (1). P. 71–79.
7. Квасникова М.С. Устойчивость сортов и гибридов картофеля к макроспориозу в полевых условиях лесостепной зоны Приморского края // Картофель на Дальнем Востоке. Владивосток, 1976. С. 152–154.
8. Коняева Н.М., Золотарева Е.В., Куликова Г.А., Локтина Г.И. Возбудители грибных болезней картофеля // Возбудители болезней сельскохозяйственных растений Дальнего Востока. М.: Наука, 1980. С. 265–268.
9. Ганнибал Ф.Б. Видовой состав, таксономия и номенклатура возбудителей альтернариоза листьев картофеля // Вестн. защиты раст. 2007. № 5. С. 142–148.
10. Орина А.С., Ганнибал Ф.Б., Левитин М.М. Видовое разнообразие, биологические особенности и география грибов рода *Alternaria*, ассоциированных с растениями семейства *Solanaceae* // Микол. и фитопатол. 2010. Т. 44. № 2. С. 150–159.
11. Смур В.В., Шпанев А.М. Изучение влияния минерального питания на развитие и вредоносность альтернариоза картофеля на Северо-Западе России // Агрохим. вестн. 2020. № 6. С. 43–47.
12. Денискина Н.Ф., Ивашова О.Н., Дыйканова М.Е., Гаспарян И.Н., Левшин А.Г. Устойчивость сортов картофеля раннего к альтернариозу в Центральном регионе // Защита и карантин раст. 2021. № 5. С. 40–41.
13. Мельникова Е.С., Мелькумова Е.А., Кузнецова М.А. Пути снижения вредоносности альтернариоза картофеля // Вестн. Воронеж. ГАУ. 2011. № 4 (31). С. 30–32.
14. Деренко Т.А., Кузнецова М.А., Сметанина Т.И., Козловский Б.Е., Филиппов А.В. Влияние припосадочного внесения Квадриса на снижение вредоносности фитофтороза и альтернариоза картофеля в период вегетации растений // Защита картофеля. 2014. № 1. С. 39–40.
15. Приходько Е.С., Хохлов В.П., Бирик Т.С., Россинская Т.М., Селицкая О.В., Смирнов А.Н. Влияние метеоусловий на развитие патоккомплекса *Alternaria–Fusarium* в посадках картофеля // Достиж. науки и техн. АПК. 2019. Т. 33. № 1. С. 14–22.

16. Кузнецова М.А., Денисенков И.А., Рогожин А.Н., Сметанина Т.И., Демидова В.Н., Стацюк Н.В. Определение оптимальной стратегии защиты картофеля от альтернариоза в условиях эпифитотии // Сб. ст. по мат-лам II Международ. научн.-практ. конф. "Современные подходы и методы в защите растений". Екатеринбург, 2020. С. 40–41.
17. Сергиенко В.Г., Богданович С.В. Оценка токсикологического действия фунгицидов на возбудителя альтернариоза картофеля // Картофелеводство. Сб. научн. тр. Минск, 2008. Т. 14. С. 440–446.
18. Смух В.В., Шпанев А.М. Проблемы химической защиты посадок картофеля от альтернариоза // Сб. ст. по мат-лам II Международ. научн.-практ. конф. "Современные подходы и методы в защите растений". Екатеринбург, 2020. С. 50–51.
19. Алдиба А.Ш., Еськов И.Д. Влияние обработки различными микроорганизмами на развитие альтернариоза (*Alternaria solani*) и урожайность картофеля // Аграрн. научн. журн. 2021. № 3. С. 4–8.
20. Байрамбеков Ш.Б., Корнева О.Г. Биопрепараты против альтернариоза картофеля // Защита и карантин раст. 2009. № 8. С. 30–31.
21. Побединская М.А., Плуталов П.Н., Романова С.С., Кокаева Л.Ю., Николаев А.В., Александрова А.В., Еланский С.Н. Устойчивость возбудителей альтернариоза картофеля и томата к фунгицидам // Микол. и фитопатол. 2012. Т. 46. № 6. С. 401–408.
22. Tymon L., Johnson D. Fungicide resistance of two species of *Alternaria* from potato in the Columbia Basin of Washington // Plant Disease. 2014. V. 98. P. 1648–1653.
23. Ding S., Halterman D., Meinholz K., Gevens A. Distribution and stability of qoi fungicide resistance in populations of potato pathogenic *Alternaria* spp. in Wisconsin // Plant Disease. 2019. P. 103.
24. Horsfield A., Wicks T., Davies K. Effect of fungicide use strategies on the control of early blight (*Alternaria solani*) and potato yield // Austral. Plant Pathol. 2010. V. 39. P. 368–375.
25. Fairchild K., Miles T., Wharton P. Assessing fungicide resistance in populations of *Alternaria* in Idaho potato fields // Crop Protect. 2013. V. 49. P. 31–39.
26. Pasche J.S., Piche L.M., Gudmestad N.C. Effect of the F129L mutation in *Alternaria solani* on fungicides affecting mitochondrial respiration // Plant Disease. 2005. V. 89. P. 269–278.
27. Aldiba A., Escov I. Biological control of early blight on potato caused by *Alternaria solani* by some bioagents // Proceed. 1st Inter. Symp. Innovat. Life Sci. (ISILS 2019). 2019. P. 103–107.
28. Chaurasia B., Pandey A., Palni L.M.S., Trivedi P., Kumar B., Colvin N. Diffusible and volatile compounds produced by an antagonistic *Bacillus subtilis* strain cause structural deformations in pathogenic fungi in vitro // Microbiol. Res. 2005. V. 160. P. 75–81.
29. Kim P., Bai H., Bai D., Chae H., Chung S., Kim Y. et al. Purification and characterization of a lipopeptide produced by *Bacillus thuringiensis* CMB26 // J. Appl. Microbiol. 2004. V. 97. P. 942–949.
30. Zhang D., Yu S., Yang Y., Zhang J., Zhao D., Pan Y., Fan S., Yang Z., Zhu J. Antifungal effects of volatiles produced by *Bacillus subtilis* Against *Alternaria solani* in potato // Front. Microbiol. 2020. V. 11. P. 1196.

Activity of Chemical and Biological Fungicides against *Alternaria* Pathogenes Caused Early Blight of Potato

A. S. Orina^{a, #}, A. V. Khiutti^a, and A. M. Shpanev^a

^aAll-Russian Institute of Plant Protection
shosse Podbel'skogo, 3, Saint-Petersburg 196608, Russia

[#]E-mail: orina-alex@yandex.ru

Early blight is one of the most common potato diseases in the world which can cause yield losses of 10–50%. In Russia the area of early blight high severity coincides with the range of the most pathogenic species *Alternaria solani*, while another pathogen *A. tenuissima* is found throughout the potato growing area. The most effective method of early blight control is a chemical protection. However, modern approaches to plant protection also involve the use of biological agents. In this study the effect of 10 chemical and 9 biological fungicides on *Alternaria* pathogens caused potato early blight was evaluated in laboratory condition. The inhibitory effect of chemical and biological fungicides on the growth of *Alternaria* fungi varied in the range of 33–80% and 20–66%, respectively. Diskor and Revus Top fungicides containing difenoconazole and mandipropamide, as well as Luna Tranquility based on pyrimethanil and fluopyram, most effectively suppressed the growth of *Alternaria* fungi (inhibitory effect 68–80%). Among biological fungicides BFTIM KS-2 and Vitaplan containing *Bacillus amyloliquefaciens* and *B. subtilis* were the most effective in *Alternaria* spp. growth inhibition (60–66%). The obtained results precede the field trials of fungicides in the regions of potato cultivation with different climatic conditions for creation of adequate strategy for early blight control.

Key words: early blight, potato, *Alternaria solani*, *Alternaria tenuissima*, fungicide effect, chemical plant protection, biological agents.

УДК 631.816.11:633.853.52:631.52(571.5)

ВЫНОС МАКРОЭЛЕМЕНТОВ УЛЬТРАСКОРОСПЕЛЫМ СОРТОМ СОИ, СОЗДАННЫМ ДЛЯ УСЛОВИЙ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

© 2022 г. Л. Г. Соколова¹, С. Ю. Зорина^{1,*}, Е. Н. Белоусова¹,
Н. Б. Катыхова¹, А. В. Поморцев¹, Н. В. Дорофеев¹

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Россия

*E-mail: zorina@sifibr.irk.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 25.05.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Исследовали величину затрат макроэлементов на 1 т основной продукции у созданного для условий Восточной Сибири ультраскороспелого сорта сои Унга селекции СИФИБР СО РАН. В трехлетних полевых опытах изучена специфика формирования выноса азота, фосфора и калия при возделывании сорта после оптимальных предшественников (черного пара, сидерального пара, сои). В среднем за годы наблюдений на формирование 1 т зерна с соответствующим количеством побочной продукции затрачивалось 64.2 ± 2.4 кг азота, 24.6 ± 1.7 кг фосфора и 37.7 ± 6.0 кг калия. Показатели выноса мало зависели от предшественника в севообороте ($p > 0.05$). Результаты могут быть основой методических рекомендаций для оптимизации условий питания при возделывании нового сорта сои путем применения минеральных удобрений.

Ключевые слова: соя, ультраскороспелый сорт, вынос макроэлементов, предшественники, серая лесная почва, Восточная Сибирь.

DOI: 10.31857/S0002188122100118

ВВЕДЕНИЕ

Соя – самая распространенная зернобобовая культура в мировом земледелии с высокой пищевой ценностью и постоянно растущим экономическим потенциалом [1]. Повышенный спрос на сою, благодаря ее роли не только в продовольственной, но и в агроэкологической сферах, способствует активному поиску потенциальных площадей для возделывания культуры во всем мире [2]. На территории России посевные площади сои динамично расширяются [3, 4]. В последние годы сою начали возделывать на территории Иркутской обл. По данным официальной статистики, посевы этой культуры в 2021 г. занимали порядка 400 га (0.06% от общей посевной площади). Относительно 2020 г. прирост занятых культурой площадей увеличился на 139% [5].

Освоение нетрадиционных для сои регионов в нашей стране обусловлено появлением сортов северного экотипа в результате успешной работы отечественных селекционеров. Сорта сои, созданные на принципах селекции с агроэкологической адресностью, позволяют не только преодолевать барьеры адаптации культуры к нети-

пичным условиям, но и получать рентабельные урожаи высокого качества [6–8].

Необходимое условие получения стабильных урожаев полевых культур, особенно новых для регионального полеводства – это разработка технологий возделывания, позволяющих максимально адаптировать потребности сорта к конкретным почвенно-климатическим условиям. Оптимизация минерального питания считается одним из важных аспектов прогрессивных агротехнологий, неотъемлемой частью которых является рациональное внесение удобрений [9]. Потребность растений в элементах питания устанавливается, исходя из их выноса на единицу товарной продукции и соответствующего количества побочной продукции (удельный или нормативный вынос) [10]. Для основных соеводческих районов РФ нормативный вынос азота на 1 т зерна сои составляет 65–100 кг. Для фосфора и калия его величины находятся в пределах 18–30 и 25–50 кг соответственно [3, 11]. Показатели определяются комплексом факторов: уровнем урожайности, гидротермическими условиями, длительностью периода вегетации, плодородием почвы, взаимодействием питательных элементов, сортоспеци-

Таблица 1. Гидротермические условия вегетационного сезона сои в годы исследования

Месяц	Температура >10°C				Осадки, мм			
	2016 г.	2019 г.	2020 г.	Норма*	2016 г.	2019 г.	2020 г.	Норма*
Май	85	103	273	173	19	11	17	14
Июнь	516	490	495	441	36	143	51	54
Июль	616	595	598	562	96	170	69	80
Август	503	498	511	462	90	41	101	72
Сентябрь	185	94	132	111	22	35	11	17
Весь сезон	1904	1780	2009	1749	263	400	248	237

*“Климатическая норма” для района исследования — средние показатели за 1981–2010 гг., по данным метеостанции “Залари” (www.pogodaklimat.ru; индекс станции 30606).

фичностью и др. [4, 12]. Многофакторность свидетельствует о необходимости знаний о реальных расходах основных элементов питания для каждого сорта, причем в конкретных почвенно-климатических условиях. Только так задача удовлетворения потребностей полевой культуры за счет внесения удобрений может решаться эффективно и без ущерба для окружающей среды.

Цель работы — определить затраты азота, фосфора и калия на формирование 1 т основной продукции для нового ультраскороспелого сорта сои Унга селекции СИФИБР СО РАН, в том числе на фоне различных предшественников (черного пара, сидерального пара и сои) в условиях лесостепи Прибайкалья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на агроэкологическом стационаре Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН, расположенном в северо-западной части лесостепной зоны Прибайкалья (53°33′58.75″ с.ш. и 102°35′23.90″ в.д.). Почва опытного участка — серая лесная среднесуглинистая (Luvic Retic Phaeozem (Loamic, Aric) [13]), наиболее широко представлена в пахотном фонде региона [14].

Полевые опыты проведены в течение вегетационных сезонов 2016, 2019 и 2020 гг., отличающихся по гидротермическим условиям. Сумма активных температур ($T_a > 10^\circ\text{C}$) за вегетацию наиболее близкой к показателям “климатической нормы” оказалась в 2019 г. (табл. 1). Сезоны 2016 и 2020 гг. превышали среднемноголетний показатель на 9–15%. При этом в 2016 г. теплее оказался практически весь сезон, за исключением мая ($T_a = 85^\circ\text{C}$, при норме 173°C). В 2020 г. начало вегетации, напротив, отличалось избытком тепла (273°C), а остальные месяцы были ближе к среднемноголетним показателям. Количество осад-

ков в годы исследования также различалось. Вегетационный сезон 2019 г. характеризовался обильным осадков (400 мм, при норме 235 мм). Основное их выпадение пришлось на июнь и июль. Август выделялся недобором влаги, а сентябрь ее избытком. Сезоны 2016 и 2020 гг. были значительно ближе к показателям “нормы” по общему количеству осадков, но отличались их распределением в течение вегетации. В целом годы исследования в достаточной мере отражали разнообразие метеоусловий, характерных для современной климатической ситуации в регионе, — весенне-летние засухи, чередующиеся с периодами обильного увлажнения на фоне умеренных температур.

В опытах возделывали ультраскороспелый сорт сои северного экотипа (*Glycine hispida* (Moench) Maxim, сорт Унга селекции СИФИБР СО РАН). В условиях характерного для Иркутской обл. продолжительного светового дня сорт обладает коротким вегетационным периодом (95–105 сут). Высота растений меняется от 60 до 68 см, прикрепление нижнего боба происходит в основном на расстоянии ≈ 10 см от поверхности почвы. Урожайность достигает 25 ц/га, содержание жира в семенах — $19 \pm 1.8\%$, сырого протеина — 37.8%. В 2021 г. сорт передан в государственное сортоиспытание.

Сою возделывали как 2-ю культуру в 4-польных севооборотах, отличающихся первым полем: черный пар/сидеральный пар/соя — соя — яровая пшеница — яровой ячмень. Черный и сидеральный пары, а также сою изучали как возможных предшественников сои в рамках разработки оптимальных севооборотов для новой культуры регионального полеводства.

Посев сои проводили в оптимальные для региона сроки — середина или конец 2-й декады мая [15]. Норма высева — 1.1 млн семян/га. Перед посевом семена инокулировали препаратом “Нит-

рагин Соя” фирмы ООО “ПлантаПлюс” из расчета 2 л/т. Схема опытов: 1 — соя после черного пара (ЧП), 2 — соя после краткосрочного летнего сидерального пара (СИД) [16] и 3 — соя после сои. Урожай сои убирали во 2-й декаде сентября. Учетная площадь в каждом из вариантов составляла 1000 м². Продуктивность сои оценивали методом прямого комбайнирования. Элементы структуры урожая учитывали в снопах с площади 0.25 м². Повторность четырехкратная.

Вынос макроэлементов основной и побочной продукцией сои определяли на основе данных биомассы зерна, створок, стеблей с учетом содержания азота, фосфора и калия для каждого органа. Вклад листьев в формирование выноса не учитывали, поскольку на момент уборки урожая соя сбрасывает листья в соответствии со своими биологическими особенностями [3, 17]. Содержание макроэлементов в тканях растений определяли в пятикратной повторности следующими методами [18]: азот — по Кьельдалю, фосфор — колориметрическим методом после восстановления с амидолом, калий — методом пламенной фотометрии.

Анализ свойств почвы проводили общепринятыми методами [18]. Плотность сложения определяли буровым методом, актуальную кислотность (pH_{H_2O}) — потенциометрическим методом (соотношение почва : раствор = 1 : 2.5), ЕКО — по методу Бобко—Аскинази; содержание $C_{орг}$ — по Тюрину, $N_{общ}$ — по Кьельдалю. Определение нитратов и аммония в почвенных вытяжках определяли методом дистилляции. Подвижные соединения фосфора и калия анализировали по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО [19]. Повторность анализов пятикратная.

Согласно полученным данным, почва опытных полей характеризовалась следующими свойствами: плотность сложения — 1.0–1.2 г/см³, содержание $C_{орг}$ — 1.9–2.5%, $N_{общ}$ — 0.19–0.26%, величина pH_{H_2O} 6.9–7.1, емкость катионного обмена (ЕКО) — 25.9–26.4 мг экв/100 г. Содержание доступных форм азота в почвах перед посевом в годы исследования варьировало от 13 до 121 мг/кг, что соответствовало грациям от “очень низкого” до “высокого” [15]. Обеспеченность подвижными соединениями фосфора изменялась меньше (60–104 мг/100 г), но во все годы относилась к грации “высокая” [20]. Содержание доступных форм калия находилось в пределах от “повышенного” до “очень высокого” (16–59 мг/100 г). Четкой закономерности по влиянию предшествующей культуры на накопление

подвижных форм макроэлементов в почве перед посевом сои выявить не удалось.

Статистический анализ выполнен с помощью программы SigmaPlot for Windows Version 14.0. Нормальность распределения результатов в выборках оценивали по критерию Шапиро—Уилка. Для выявления различий между вариантами использовали однофакторный дисперсионный анализ с последующей процедурой множественного сравнения (критерий Фишера). Статистически значимыми принимали различия при уровне значимости (p) < 0.05. В таблицах и на рисунках приведены средние и их стандартные отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продуктивность сои в полевых опытах. Урожайность зерна сои в годы исследования варьировала от 1.5 до 2.8 т/га (табл. 2). Максимальные показатели получены в условиях 2019 г., статистически значимые различия между вариантами при этом отсутствовали ($p = 0.29$). В 2016 и 2020 гг. продуктивность сои оказалась меньше и примерно одинаковой по величине. При этом наблюдали значимое снижение урожайности в варианте соя после сои ($p < 0.05$). После паровых предшественников изученные параметры в оба года не отличались ($p = 0.33$ и 0.87 для 2016 и 2020 гг. соответственно). Возможной причиной снижения продуктивности культуры в варианте соя после сои могли быть изменения в морфологии растений. Анализ структуры урожая выявил, что количество бобов, прикрепленных ниже 12 см (уровень среза комбайна), во все годы оказалось наибольшим именно в варианте соя после сои. Их доля от общего числа бобов в 2016 и 2020 гг. повышалась соответственно до 16 и 20%, в отличие от 5% в 2019 г. В результате данную долю урожая при механизированной уборке не учитывали. Потери урожая в варианте соя после сои по сравнению с вариантами после паровых предшественников могли быть связаны и со снижением необходимых для развития культуры влагозапасов в год возделывания предшествующей культуры. Соя отличается высокой транспирационной активностью (коэффициент транспирации в среднем составляет 700 [3]), а пары, особенно черные, в условиях лесостепи Прибайкалья известны как влагонакопители [21]. На связь между потерями урожая и влагозапасами в год возделывания предшественников в настоящее время обращают серьезное внимание [22]. Для некоторых сортов сои показано снижение урожайности зерна при повышении температуры воздуха, особенно в сочетании с недобором влаги [23]. Нельзя исключать влияние и других

Таблица 2. Урожайность сои сорта Унга в полевых опытах с разными предшественниками, т/га

Вариант	Урожайность, т/га		Соотношение основной продукции к побочной
	зерна	побочной продукции	
2016 г.			
Соя после ЧП	2.00 ± 0.18 ^a	3.03 ± 0.27 ^a	1 : 1.51
Соя после СИД	2.16 ± 0.31 ^a	2.42 ± 0.35 ^a	1 : 1.12
Соя после сои	1.58 ± 0.11 ^b	2.02 ± 0.13 ^b	1 : 1.28
<i>p</i>	0.011	0.002	
2019 г.			
Соя после ЧП	2.76 ± 0.26 ^a	4.18 ± 0.39 ^a	1 : 1.51
Соя после СИД	2.36 ± 0.41 ^a	3.69 ± 0.64 ^a	1 : 1.56
Соя после сои	2.81 ± 0.52 ^a	3.96 ± 0.78 ^a	1 : 1.41
<i>p</i>	0.29	0.42	
2020 г.			
Соя после ЧП	2.03 ± 0.22 ^a	3.25 ± 0.34 ^a	1 : 1.60
Соя после СИД	2.05 ± 0.13 ^a	3.31 ± 0.21 ^a	1 : 1.61
Соя после сои	1.56 ± 0.20 ^b	2.47 ± 0.30 ^b	1 : 1.58
<i>p</i>	0.007	0.005	

Примечания. 1. ЧП – черный пар, СИД – краткосрочный сидеральный пар. То же в табл. 3, 4. 2. Разными надстрочными латинскими буквами обозначены варианты, статистически значимо различающиеся при $p \leq 0.05$.

факторов на ход продукционного процесса, поскольку в нашем исследовании сою выращивали на разных полях севооборота. Согласно [24], участок возделывания может детерминировать 72% фактора урожайности, а на долю сорта приходится только 28%.

Величина побочной продукции (стебли + створки) у созданного сорта изменялась аналогично урожайности зерна и в зависимости от года, и варианта опыта. Показатели варьировали в пределах 2.02–4.18 т/га. Соотношение основной и побочной продукции в отчуждаемой биомассе изменялось от 1 : 1.12 до 1 : 1.63.

Исследования показали, что урожайность нового селекционного сорта Унга определялась метеоусловиями, складывавшимися в течение вегетации. Продуктивность повышалась в условиях температурного оптимума (в пределах “климатической нормы”) и усиленного режима увлажнения первой половины вегетации. В менее благоприятных гидротермических условиях было возможно снижение урожайности сои, особенно при повторных посевах (соя после сои). Независимо от условий, соотношение основной и побочной продукции было довольно стабильным, что важно с позиций установки норматива выноса.

Содержание основных макроэлементов в тканях сои. К моменту уборки урожая содержание основ-

ных макроэлементов в тканях растений сои определялось в основном функцией органа растений (рис. 1). Наибольшая концентрация макроэлементов зафиксирована в зерне, причем эта величина мало зависела от условий года и варианта опыта ($p > 0.05$). Например, содержание азота изменялось от 54.3 до 58.4 мг/г сухого вещества, а коэффициент варируемости данных в обобщенной 3-летней выборке составил всего 3.5%. Показатели для фосфора и калия менялись в пределах 15.9–22.1 и 18.5–29.8 мг/г соответственно при более высокой варируемости ($V = 7$ и 16%). В створках и стеблях содержание макроэлементов во все годы оказалось существенно меньше, чем в зерне. Для азота и фосфора величина показателей уменьшалась в 7–12 раз, для калия – в 1–5 раз, вследствие не только различной функциональной роли элементов, но и особенностей их транспорта в растениях (поглощения–реутилизации) [25, 26]. Азот и фосфор, являясь структурными элементами органических веществ, к концу вегетации активно накапливались в зерне сои. Для калия в этот период, напротив, был характерен отток в корневую систему. Статистически значимые различия между вариантами опыта по содержанию калия и фосфора в тканях створок и стеблей ($p < 0.05$) свидетельствовали о том, что агрофон, включая предшествующую культуру, мо-

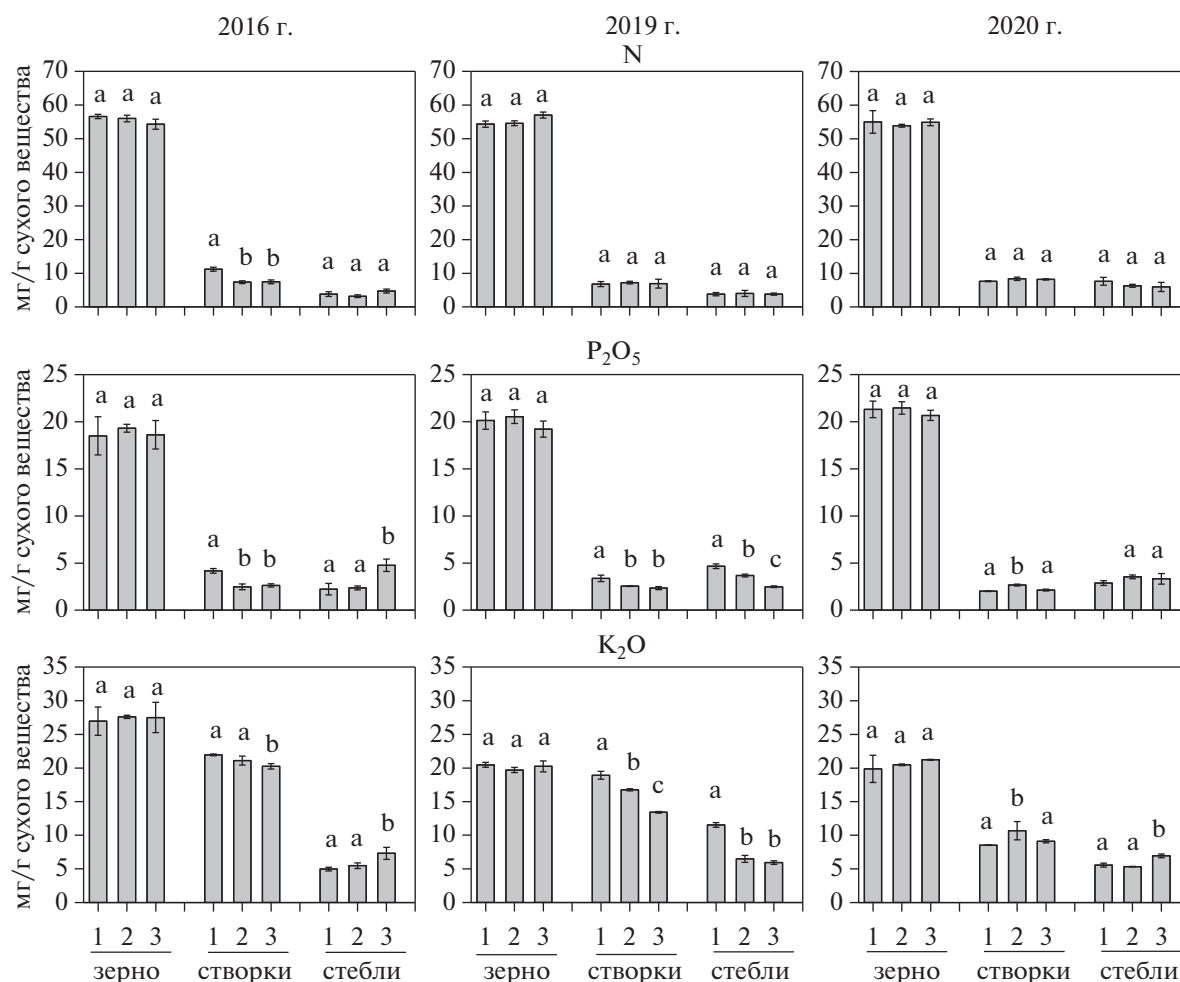


Рис. 1. Содержание основных макроэлементов в тканях сои в фазе полной спелости, мг/г сухого вещества. Варианты: 1 — соя после черного пара, 2 — соя после краткосрочного сидерального пара, 3 — соя после сои. Разными буквами отмечены выборки данных, имеющие статистически значимые межвариантные различия при $p \leq 0.05$, одинаковыми — те, для которых такие различия не обнаружены.

жет влиять на процессы питания этими элементами исследованного сорта сои. Азотное питание при успешной инокуляции семян ризобактериями было менее подвержено влиянию факторов внешней среды.

Вынос макроэлементов новым ультраскороспелым сортом сои. Величина общего выноса макроэлементов надземной массой сои с единицы площади (хозяйственный вынос) определялась как продуктивностью, так и содержанием элементов в тканях (табл. 3). Максимальные показатели выноса, особенно азота и фосфора, зафиксированы в 2019 г. (соответственно 148–189 и 61–73 кг/га), когда урожайность была наиболее высокой. В опыте этого года не выявлено статистически значимых различий между вариантами по величине выноса данных элементов ($p > 0.05$). Только вынос калия в варианте после черного пара в 2019 г.

отличался от сидерального более высокими показателями (соответственно 117 и 84 кг/га, $p = 0.012$), что было обусловлено и наибольшей концентрацией элемента в побочной продукции и ее значительной массой. В опытах 2016 и 2020 гг. по сравнению с 2019 г. показатели выноса всех макроэлементов оказались меньше и примерно одинаковыми. Изменения в вариантах также соответствовали закономерностям, установленным при анализе продуктивности сои. Например, вынос всех макроэлементов в варианте соя после сои, как и урожайность, значимо уменьшался по сравнению с остальными вариантами опытов ($p < 0.05$). Снижение выноса азота независимо от года и варианта составило $\approx 25\%$. Для фосфора и калия уменьшение показателей варьировало от 15 до 30% вследствие выявленных изменений содержания элементов в побочной продукции. Среднее по-

Таблица 3. Хозяйственный вынос макроэлементов ультраскороспелым сортом сои Унга в опытах с разными предшественниками, кг/га

Год	Вариант	Вынос			Вынос зерном, % от общего		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2016	Соя после ЧП	<u>130 ± 3</u>	<u>46 ± 5</u>	<u>86 ± 9</u>	86	80	63
		114 ± 11	37 ± 4	54 ± 5			
	Соя после СИД	<u>136 ± 19</u>	<u>49 ± 7</u>	<u>96 ± 14</u>	90	85	67
		121 ± 18	42 ± 6	60 ± 9			
	Соя после сои	<u>99 ± 8</u>	<u>39 ± 3</u>	<u>71 ± 6</u>	89	83	70
		85 ± 7	29 ± 2	43 ± 4			
	<i>p</i>	<u>0.008</u>	<u>0.042</u>	<u>0.015</u>			
		0.006	0.006	0.010			
	Соя после ЧП	<u>171 ± 16</u>	<u>73 ± 7</u>	<u>117 ± 11</u>	88	77	50
		150 ± 14	56 ± 6	57 ± 5			
2019	Соя после СИД	<u>148 ± 25</u>	<u>61 ± 11</u>	<u>84 ± 15</u>	87	79	56
		129 ± 22	48 ± 8	47 ± 8			
	Соя после сои	<u>189 ± 34</u>	<u>66 ± 12</u>	<u>97 ± 18</u>	88	86	61
		168 ± 20	56 ± 10	59 ± 11			
	<i>p</i>	<u>0.140</u>	<u>0.262</u>	<u>0.035</u>			
		0.111	0.366	0.129			
	Соя после ЧП	<u>136 ± 15</u>	<u>52 ± 7</u>	<u>62 ± 8</u>	88	90	75
		112 ± 12	43 ± 6	40 ± 5			
	Соя после СИД	<u>134 ± 8</u>	<u>55 ± 3</u>	<u>68 ± 3</u>	88	86	74
		111 ± 7	44 ± 2	42 ± 2			
2020	Соя после сои	<u>102 ± 13</u>	<u>39 ± 6</u>	<u>52 ± 8</u>	89	88	73
		86 ± 11	32 ± 5	33 ± 5			
	<i>p</i>	<u>0.007</u>	<u>0.003</u>	<u>0.025</u>			
		0.009	0.004	0.022			

Примечание. Над чертой – общий вынос надземной массой, под чертой – зерном.

глошение питательных веществ надземной массой у созданного сорта сои составило 138 кг N/га, 53 кг P₂O₅/га, 81 кг K₂O/га при средней урожайности зерна 2.1 т/га. Вынос увеличивался при повышении продуктивности сои. Максимальная урожайность отмечена в опыте 2019 г. (2.36–2.81 т/га), показатели выносов при этом достигали соответственно 148–189, 61–73, 84–117 кг/га.

Хозяйственный вынос макроэлементов сортом Унга оказался сопоставим с параметрами, известными для отечественных сортов близкой группы спелости. Например, для раннеспелого сорта Лира в условиях Краснодарского края вынос макроэлементов в неудобренном варианте составил 148 кг N/га, 32.3 кг P₂O₅/га, 52.2 кг K₂O/га при накоплении сухой вегетативной биомассы 2.8 т/га [27]. Для сорта Ланцетная в условиях Белгородской обл. показатели выноса при максимальной урожайности зерна (3.13 т/га), достигнутой на фоне внесения удобрений в

дозе N9P40K60S10, составляли соответственно 203 кг N/га, 54.6 кг P₂O₅/га, 117.3 кг K₂O/га [28]. При этом отечественные сорта сои уступали сортам, возделываемым на территории США и Аргентины, особенно по поглощению азота и калия. По обобщенным данным [29], усредненные показатели выноса составляли 261 кг N/га, 25 кг P₂O₅/га, 133 кг K₂O/га при урожайности сои 3.8 т/га. Результат вполне ожидаем, поскольку в этих странах в основном возделываются сорта с более длительным периодом вегетации (до 200 сут) и, соответственно, с большей биомассой. Однако все приведенные показатели указывали на связь между поглощением макроэлементов соей и ее продуктивностью. По последним оценкам, связь имеет нелинейный характер и точнее описывается методом квантильной регрессии [29].

Необходимым условием при разработке нормативов выноса элементов минерального питания зерновыми и зернобобовыми культурами яв-

Таблица 4. Вынос основных элементов питания 1 т основной продукции с учетом побочной при выращивании сои ультраскороспелого сорта Унга на зерно в условиях Восточной Сибири, кг ($n = 9$)

Вариант	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	lim	среднее*	V, %	lim	среднее*	V, %	lim	среднее*	V, %
Соя после ЧП	61.4–69.9	64.5 ± 3.1	4.7	22.7–27.6	24.9 ± 1.2	4.9	30.2–43.0	38.5 ± 7.8	19.4
Соя после СИД	61.7–65.8	63.8 ± 1.7	2.6	22.0–27.0	24.9 ± 2.1	8.5	32.1–44.9	37.3 ± 4.4	12.0
Соя после сои	61.4–66.3	64.3 ± 1.6	2.5	22.2–25.6	24.1 ± 1.3	5.3	38.2–45.9	37.2 ± 5.4	14.7
<i>p</i>	0.074			0.19			0.39		

*Среднее за 2016, 2019 и 2020 гг.

ляется преимущественная аккумуляция макроэлементов в зерне [10]. У созданного сорта сои доля зерна в выносе надземной массой для азота составила 82–89%, что свидетельствовало об эффективной реутилизации элемента, причем независимо от урожайности и условий вегетации. Для фосфора пределы изменений оказались шире (74–86%), но также не зависели от величины урожайности. Например, при близкой продуктивности сои в опыте 2019 г. (2.36–2.81 т/га) относительный вынос фосфора зерном в вариантах опыта изменялся от 74 до 85%. Эти же пределы отмечены в 2016 г., но доля фосфора в выносе с ростом урожайности зерна возрастала (74% и 86% при урожайности 1.58 и 2.16 т/га в вариантах соя после сои и соя после сидерального пара соответственно). По-видимому, различия относительных затрат фосфора на формирование зерна в большей степени были обусловлены вариабельностью содержания элемента в побочной продукции. Доля зерна в выносе калия оказалась наименьшей, как следствие особенностей процессов реутилизации. Показатели в основном находились в пределах от 56 до 65% при разных величинах урожайности. Только в варианте соя после черного пара в 2019 г., когда зафиксировано наиболее высокое накопление калия в побочной продукции, относительный вынос его зерном снизился до 49%, хотя урожайность была высокой (2.76 т/га). Данные свидетельствовали, что доля калия, удаляемого с зерном, подвержена большей изменчивости по годам, в отличие от азота и фосфора, но также не зависит от урожайности. Сходные закономерности в процессах реутилизации всех макроэлементов у сои представлены в работах [25, 26].

Затраты макроэлементов на формирование 1 т основной продукции с учетом побочной у изученного сорта сои практически не зависели от варианта и года исследований (табл. 4). Коэффициент вариабельности показателей для азота и фосфора в 3-летней выборке данных во всех

вариантах не превышал 8%. Также не выявлено статистически значимых различий между выборками данных в вариантах опыта ($p > 0.05$). В среднем на формирование 1 т зерна сои ультраскороспелого сорта Унга с соответствующим количеством побочной продукции затрачивалось 64.5 ± 2.4 кг N, 24.8 ± 1.7 кг P₂O₅ и 37.9 ± 6.0 кг K₂O, независимо от условий года и предшествующей культуры. Незначительная вариабельность показателей удельного выноса у исследованного сорта сои в наших опытах, по-видимому, связана с его высокой адаптированностью к условиям питания, поскольку селекция сорта происходила на базе данного стационара.

Данные позволили заключить, что при возделывании сои в условиях региона в первую очередь потребуются восполнение запасов фосфора. Порядка 80% этого элемента, аккумулированного в надземной части, удаляется с поля даже без учета побочной продукции (соевой соломы и половы). В этих же условиях отчуждение калия будет меньше, поскольку его аккумуляция в зерне составляет только 50–60%. Тем не менее, требуется восполнение запасов калия, особенно на полях с невысоким его содержанием. Несмотря на то, что продуктивный вынос азота высок (>80%), необходимость его восполнения, учитывая значимую роль биологического азота в формировании урожая сои и сложные взаимодействия симбионтов с внесенными удобрениями [30–32], требует отдельных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые получены репрезентативные оценки выноса основных макроэлементов созданным для условий Восточной Сибири ультраскороспелым сортом сои Унга селекции СИФИБР СО РАН. В 3-летних полевых опытах на среднегумусированной серой лесной почве установлено, что на формирование 1 т зерна исследованного сорта с соответствующим количе-

ством побочной продукции затрачивалось 64.2 ± 2.4 кг азота, 24.6 ± 1.7 кг фосфора и 37.7 ± 6.0 кг калия. Показатели выноса мало зависели от гидротермических условий и наиболее оптимальных предшественников в севообороте ($p > 0.05$). С урожаем зерна отчуждалось 82–89 и 74–86% от суммарных величин накопленного надземной биомассой азота и фосфора соответственно. Для калия показатели были меньше (49–65%). Преимущественная аккумуляция основных макроэлементов в зерне исследованного сорта сои позволяет использовать полученные нормативы выноса для расчета доз минеральных удобрений под планируемый урожай. Целесообразно включить эти нормативы в рекомендации производству при возделывании ультраскороспелых сортов сои в условиях региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jia F., Peng S., Green J., Koh L., Chen X. Soybean supply chain management and sustainability: A systematic literature review // J. Clean. Prod. 2020. V. 255. 120254.
2. Feng L., Wang H.Y., Ma X.W., Peng H.B., Shan J.R. Modeling the current land suitability and future dynamics of global soybean cultivation under climate change scenarios// Field Crops Res. 2021. V. 263. 108069.
3. Щегорев О.В. Соеводство. Монография. 2-е перераб. и доп. изд. Краснознаменск: ООО "Типография Парадиз", 2018. 600 с.
4. Novikova L.Yu., Bulakh P.P., Nekrasov A.Yu., Seferova I.V. Soybean response to weather and climate conditions in the Krasnodar and Primorye territories of Russia over the past decades // Agronomy. 2020. V. 10. 1278.
5. Посевные площади сельскохозяйственных культур под урожай 2021 года: статистический бюллетень. Фед. служба гос. стат., Иркутскстат, 2021. 40 с.
6. Сеферова И.В., Вишнякова М.А. Генофонд сои из коллекции ВИР для продвижения агрономического ареала культуры к северу // Зернобоб. и круп. культуры. 2018. № 3 (27). С. 41–47.
7. Омелянюк Л.В., Асанов А.М., Юсова О.А., Чураков А.А. Новый скороспелый сорт сои Заряница для условий Сибири // Масл. культуры. 2020. Вып. 3 (183). С. 161–168.
8. Зеленцов С.В., Мошненко Е.В., Трунова М.В., Бубнова Л.А., Будников Е.Н., Лукомец А.В., Савиченко В.Г., Дорофеев Н.В., Катышева Н.Б., Поморцев А.В. Холодоустойчивый сорт сои северного экотипа Саяна // Масл. культуры. 2021. № 1 (185). С. 95–102.
9. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15.
10. Шафран С.А. Совершенствование нормативно-справочной базы для определения потребности сельскохозяйственных культур в минеральных удобрениях // Агрохимия. 2019. № 7. С. 27–34.
11. Перспективная ресурсосберегающая технология производства сои: метод. рекоменд. М.: Росинформротех, 2008. 56 с.
12. Neto M.E., Lara L.M., de Oliveira S.M., dos Santos R.F., Braccini A.L., Inoue T.T., Batista M.A. Nutrient removal by grain in modern soybean varieties // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. 615019.
13. IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. World Soil Resources Reports 106. Rome: FAO, 2015.
14. Колесниченко В.Т., Уфимцева К.А., Кузьмин В.А. Почвенная карта Иркутской области. М-б 1:1 500 000. М.: ГУГК, 1988.
15. Дорофеев Н.В., Бояркин Е.В., Пешкова А.А. Урожайность сои в Восточной Сибири в зависимости от срока посева // Зерн. хоз-во. 2008. № 3. С. 30–31.
16. Соколова Л.Г., Зорина С.Ю., Белоусова Е.Н., Поморцев А.В., Дорофеев Н.В. Эмиссия CO₂ из почвы при введении краткосрочной сидерации в паровое поле в условиях лесостепной зоны Прибайкалья // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1262–1273.
17. Бакалай Г.Т., Безуглова О.С. Соя. Экология, агротехника, переработка. Ростов н/Д.: Феникс, 2003. 156 с.
18. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
19. ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартинформ, 2013.
20. Практические рекомендации по почвенной диагностике азотного питания полевых культур и применению азотных удобрений в сибирском земледелии: производ.-практ. изд. М.: Росинформротех, 2018. 48 с.
21. Солодун В.И., Цвынтарная Л.А. Влияние чистых и сидеральных паров на засоренность зерновых культур // Вестн. ИрГСХА. 2016. Вып. 72. С. 22–27.
22. Meyer N., Bergez J.-E., Constantin J., Belleville P., Justes E. Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management // Agric. Water Manag. 2020. 231. 105998.
23. Baker J., Allen Jr. L., Boote K., Jones P., Jones J. Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration // Crop Sci. 1989. V. 29. P. 98–105.
24. Carkner M.K., Entz M.H. Growing environment contributes more to soybean yield than cultivar under organic management // Field Crops Res. 2017. V. 207. P. 42–51.
25. Gaspar A.P., Laboski C.A.M., Naeve S.L., Conley S.P. Dry matter and nitrogen uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels // Crop Sci. 2017. V. 57 (4). P. 2170–2182.
26. Gaspar A.P., Laboski C.A.M., Naeve S.L., Conley S.P. Phosphorus and potassium uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels // Crop Sci. 2017. V. 57 (4). P. 2193–2204.

27. Тишков Н.М., Махонин В.Л., Носов В.В. Содержание и вынос элементов питания растениями сои в зависимости от применения удобрений // Масл. культуры. 2019. Вып. 4 (180). С. 70–79.
28. Иванова С.Е., Лукин С.В. Совершенствование минерального питания сои в Белгородской области // Питание растений. 2018. № 4. С. 2–4.
29. Salvagiotti F., Magnano L., Orteiz O., Enrico J., Bar-raco M., Barbagelata P., Condori A., Di Mauro G., Man-lla A., Rotundo J., Garcia F. O., Ferrari M., Gudelj V., Ci-ampitti I. Estimating nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean // Eur. J. Agron. 2021. V. 127. 126289.
30. Salvagiotti F., Cassman K.G., Specht J.E., Walters D.T., Weiss A., Dobermann A. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review // Field Crops Res. 2008. V. 108. P. 1–13.
31. Ciampitti I.A., Salvagiotti F. New insights into soybean biological nitrogen fixation // Agron. J. 2018. V. 110 (4). P. 1185–1196.
32. Pannecouque J., Goormachtigh S., Ceusters N., Bode S., Boeckx P., Roldan-Ruiz I. Soybean response and profit-ability upon inoculation and nitrogen fertilisation in Belgium // Eur. J. Agron. 2022. V. 132. 126390.

Macronutrients Removal with Ultra-Early Soybean Variety Created for the East Siberia Conditions

L. G. Sokolova^a, S. Yu. Zorina^{a, #}, E. N. Belousova^a, N. B. Katysheva^a,
A. V. Pomortsev^a, and N. V. Dorofeev^a

^a*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry—Siberian Branch, RAS
ul. Lermontova 132, Irkutsk 664033, Russia*

[#]*E-mail: zorina@sifibr.irk.ru*

The value of macronutrient costs per 1 ton of basic products was studied in the ultra-ripe soybean variety Un-ga of the selection of SIFIBR SB RAS created for the conditions of Eastern Siberia. In three-year field exper-iments, the specifics of the formation of nitrogen, phosphorus and potassium removal during cultivation of the variety after optimal precursors (black steam, sideral steam, soy) were studied. The removal of nitrogen, phosphorus and potassium was studied in the three-year field experiments, when the soybean was cultivated after optimal predecessors (black fallow, green manure fallow, soybean). On average, nutrient uptake was 64.2 ± 2.38 kg N/t, 24.6 ± 1.66 kg P₂O₅/t, 37.7 ± 5.99 kg K₂O/t. Removal indicators were little dependent on the predecessors in the crop rotation ($p > 0.05$). The results can be the basis of methodological recommen-dations for optimizing nutritional conditions in the cultivation of a new soybean variety through the use of mineral fertilizers.

Key words: soybean, ultra-ripe variety, macronutrients removal, predecessors, grey forest soil, Eastern Siberia.

УДК 546.74: 581.192: 631.484

ВЛИЯНИЕ РОСТСТИМУЛИРУЮЩИХ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ НА УРОЖАЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НИКЕЛЕМ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ[§]

© 2022 г. В. П. Шабает^{1,*}, В. Е. Остроумов¹, М. П. Волокитин²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

²Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пушкино Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: vpsh@rambler.ru

Поступила в редакцию 03.03.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

В вегетационном опыте исследовано влияние ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на урожай яровой пшеницы при выращивании растений до полной спелости на искусственно загрязненной никелем агросерой почве. Установлена устойчивость растений к токсическому действию тяжелого металла при внесении бактерий. Определены элементный химический состав, вынос никеля и биофильных элементов надземной биомассой, включая зерно, и корневой системой растений.

Ключевые слова: *Pseudomonas*, *Triticum aestivum* L., $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, химический состав растений.

DOI: 10.31857/S0002188122100106

ВВЕДЕНИЕ

При повышенном содержании никеля (Ni) в почве происходит угнетение роста и развития растений [1]. Установлено, что применение стимулирующих рост растений ризосферных бактерий [2], в том числе бактерий рода *Pseudomonas* [3–6], существенно уменьшало фитотоксичность Ni и повышало устойчивость растений к токсическому действию тяжелого металла (ТМ). В предыдущем вегетационном опыте было изучено влияние внесения ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост и элементный химический состав культуры яровой пшеницы при выращивании растений до фазы выхода в трубку на искусственно загрязненной Ni агросерой почве [7]. Применение бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 уменьшало фитотоксичность ТМ, стимулировало рост и увеличило массу вегетативных органов и корневой системы яровой пшеницы, усилило фитоэкстракцию Ni и улучшило минеральное питание растений в загрязненных условиях. Исследований по влиянию ростстимулирующих ризосферных бактерий

рода *Pseudomonas* на урожай, в особенности зерна, и минеральное питание зерновых культур при их выращивании до полной спелости в условиях загрязнения почвы Ni проведено недостаточно.

Цель работы – изучение влияния внесения ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на урожай яровой пшеницы и элементный химический состав растений, включая содержание и накопление в них Ni, при выращивании растений до созревания на агросерой почве, загрязненной ТМ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили при выращивании культуры яровой пшеницы *T. aestivum* L. сорта Злата (Московский НИИСХ “Немчиновка”) на агросерой почве юга Московской обл. в вегетационном опыте при искусственном загрязнении почвы водорастворимым соединением Ni. В сосудах, содержащих 5 кг почвы, выращивали по 13 растений до полного созревания в течение 118 сут. В работе испытывали 20-й штамм бактерии *P. fluorescens*, 21-й штамм бактерии *P. fluorescens* и 23-й штамм бактерии *P. putida*, увеличивавших устойчивость растений к токсическому

[§] В работе использованы материалы исследований по теме госзаданий №№ 121041500050-3, 121040800142-5 и 121040800103-6.

действию ТМ при выращивании до фазы выхода в трубку [7]. В контрольном варианте растения культивировали без внесения Ni и бактерий, во втором — с внесением Ni без бактерий, в остальных трех вариантах на фоне загрязнения почвы Ni — с внесением каждой из вышеупомянутых бактерий. В опыте был использован пахотный горизонт среднесуглинистой агросерой почвы (Luvisol) (слой 0–20 см), на которой в предшествующий год выращивали ячмень. Почва имела следующие показатели: pH_{KCl} 5.62, $C_{орг}$ — 1.3%, $N_{вал}$ — 142 мг/100 г почвы, Ca и Mg (1 н. KCl) — 12.7 и 1.7 ммоль-экв/100 г, $N-NH_4$, $N-NO_3$ (0.1 н. Na_2SO_4) — 0.5 и 0.6 мг/100 г соответственно, подвижные P_2O_5 и K_2O (0.2 н. HCl) — 20.2 и 12.9 мг/100 г почвы соответственно.

В почву вносили $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ (квалификации “х.ч.” (Реахим, Россия)) из расчета 200 мг Ni/кг почвы за 10 сут до посева семян на фоне внесения NPK-удобрений по 100 мг д.в./кг почвы в виде азотнокислого аммония, двухзамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия. При посеве стерилизованные, пророщенные семена раскладывали на почве и инокулировали водными суспензиями чистых культур бактерий в водопроводной воде из расчета 10^8 кл./растение и засыпали 3-см слоем почвы. В вариантах без инокуляции бактериями вносили аналогичным образом адекватное количество автоклавированных бактериальных суспензий. Влажность почвы в сосудах в течение вегетационного периода поддерживали поливами на уровне $\geq 60\%$ ПВ. Повторность опыта четырехкратная.

После срезания растения высушивали при $70^\circ C$ до постоянной массы и взвешивали отдельно зерно, солому (листья, стебли и полосу) и корни. Корни отмывали от почвы водопроводной, а затем дистиллированной водой. После сжигания растительного материала (0.1 г) в разбавленной серной кислоте (1 : 2) с катализатором (K_2SO_4 : Zn : Se : $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ = 100 : 24 : 2 : 0.2) определяли содержание азота в растениях феноловым методом. Растительный материал (0.5 г) после сжигания в смеси концентрированных кислот HNO_3 : $HClO_4$ (2 : 1) анализировали на содержание Ni и других зольных элементов. Содержание Ni и зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP OES Optima 5300 DV (Perkin Elmer, США). Калий определяли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP (BWB, Великобритания), pH — на pH-метре pH 325-B (WTW, Германия). Статистическую обра-

ботку полученных данных проводили с использованием пакета MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При загрязнении почвы Ni без внесения бактерий установлено токсическое действие ТМ на растения яровой пшеницы, которое выражалось в уменьшении надземной массы растений: зерна — на 14, соломы — на 20% по сравнению с контролем — вариантом без загрязнения почвы металлом и инокуляции бактериями (табл. 1). Масса корней в условиях Ni-стресса уменьшилась в 1.7 раза. Внесение всех бактерий в загрязненных условиях оказывало примерно одинаковое действие и увеличило массу зерна на 19–22, соломы — на 19–32%. Бактерии при загрязнении Ni также способствовали лучшему росту корневой системы. Масса корней, загрязненных металлом растений, при инокуляции бактериями увеличилась в 1.5–1.8 раза. На фоне достоверного уменьшения урожая неинокулированных растений под влиянием Ni по сравнению с контролем, применение всех бактерий в загрязненных условиях обеспечивало получение такого же урожая, в том числе и зерна, как и не инокулированных растений без загрязнения. Масса корней и соломы растений, инокулированных бактериями, были практически такими же, как и в контрольном варианте. Таким образом, применение этих бактерий полностью устраняло токсическое действие Ni, внесенного из расчета 200 мг/кг почвы, на растения яровой пшеницы. В результате проведения предыдущего вегетационного опыта было также обнаружено, что применение данных бактерий значительно уменьшало токсическое действие Ni на растения и стимулировало их рост при выращивании до фазы трубкования и загрязнении металлом в дозе 300 мг/кг почвы [7].

Применение бактерий не оказало существенного влияния на содержание Ni в зерне и соломе (табл. 2). Содержание Ni в корневой системе инокулированных бактериями растений, напротив, увеличилось в 1.2–1.4 раза. При этом в корнях содержалось в десятки раз больше Ni, чем в надземных органах. Применение бактерий увеличило вынос Ni (в мкг/сосуд) зерном из загрязненной ТМ почвы в 1.3–1.4 раза, соломой — в 1.4–1.6 раза (табл. 3). Накопление Ni корнями было значительно больше по сравнению с зерном и соломой и увеличилось при внесении бактерий в 1.7–2.5 раза. Под влиянием внесения бактерии *P. putida* 23 в наибольшей степени увеличились содержание в корнях и вынос Ni корнями и суммарной биомассой растений.

Таблица 1. Биомасса растений в период уборки

Вариант	Масса растений (сухое вещество), г/сосуд			
	зерно	солома	корни	сумма
Без Ni и внесения бактерий – контроль	23.4	30.4	3.6	57.4
Ni без внесения бактерий	20.0	24.4	2.1	46.5
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	24.4	32.2	3.1	59.7
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	24.2	29.0	3.3	56.5
Ni + <i>P. putida</i> 23	23.8	29.3	3.7	56.8
HCP ₀₅	3.3	4.9	1.1	9.8

В вариантах с инокуляцией бактериями после срезания загрязненных Ni растений в фазе полного созревания не установлено существенных изменений реакции почвенной среды по сравнению с вариантом с загрязнением почвы без применения бактерий (табл. 4). Некоторое увеличение pH_{KCl} (на 0.34–0.43 ед.) относительно исходной почвы было отмечено только при загрязнении никелем как без внесения, так и при внесении бактерий.

В табл. 5 представлены данные содержания макро- и микроэлементов в различных органах растений. При загрязнении почвы Ni без внесения бактерий установлено увеличение содержания практически всех исследованных биофильных элементов в зерне, соломе и корнях по сравнению с контролем. При этом исключения касались фосфора, Ca и Mg, для которых величины этого показателя в различных органах или не изменялись или увеличивались, или уменьшались, а также Cu, содержание которой в растениях было на минимальном уровне по сравнению с другими элементами. Увеличение содержания элементов в органах растений при загрязнении Ni без внесения бактерий, вероятно, происходило вследствие концентрирования элементов в результате уменьшения массы загрязненных ТМ растений и угнетения их роста (табл. 1). Под влиянием внесения всех бактерий на фоне загрязнения Ni содержание большинства элементов в зерне не изменялось по сравнению с не инокулированным вариантом с загрязнением, кроме некоторого увеличения этого показателя для фосфора, Mn, а также Mg за исключением вариантов с инокуляцией *P. fluorescens* 20 и *P. putida* 23. При применении всех бактерий в загрязненных условиях в соломе содержалось больше Fe, несколько больше Mg, Mn и Zn (кроме варианта с *P. fluorescens* 21), в корнях – содержание практически всех элементов существенно не изменялось.

В табл. 6 представлены данные выноса из почвы макро- и микроэлементов зерном и суммар-

ной биомассой растений. Без применения бактерий при загрязнении Ni вынос почти всех элементов зерном изменялся в виде тенденции, кроме значительного уменьшения этого показателя для Ca и Mg и увеличения – для Mn. В суммарной биомассе загрязненных Ni растений количество большинства элементов без инокуляции бактериями также изменялось в виде тенденции, кроме достоверного уменьшения этого показателя для Ca. Внесение бактерий в целом примерно в одинаковой степени влияло на вынос биофильных элементов растениями из загрязненной почвы. Под влиянием применения всех бактерий увеличилось накопление большинства элементов в зерне, кроме некоторого уменьшения этого показателя для Ca и при этом не изменился вынос Fe и Cu, кроме его увеличения при инокуляции *P. fluorescens* 20. Применение бактерий на фоне загрязнения Ni увеличило вынос суммарной биомассой растений всех исследованных элементов из почвы. При этом наибольшее увеличение (в 1.5–1.7 раза) было установлено для Fe и Mn. Увеличение выноса питательных элементов инокулированными бактериями растениями из загрязненной почвы происходило в основном вследствие стимуляции их роста (табл. 1).

Таблица 2. Содержание Ni в растениях в период уборки

Вариант	Зерно	Солома	Корни
	Ni, мг/кг		
Без Ni и внесения бактерий – контроль	2	2	5
Ni без внесения бактерий	12	6	142
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	14	7	166
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	13	7	171
Ni + <i>P. putida</i> 23	13	7	199
HCP ₀₅	2	1	19

Таблица 3. Вынос Ni растениями

Вариант	Зерно	Солома	Корни	Сумма
	вынос Ni, мкг/сосуд			
Без Ni и внесения бактерий – контроль	47	61	18	126
Ni без внесения бактерий	240	146	298	684
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	342	225	515	1082
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	315	203	564	1082
Ni + <i>P. putida</i> 23	309	205	736	1250
НСР ₀₅	63	45	100	185

Таблица 4. Реакция почвенной среды после выращивания растений

Вариант	pH _{KCl} почвенной суспензии, ед.
Без Ni и внесения бактерий – контроль	6.20 ± 0.01
Ni без внесения бактерий	6.26 ± 0.04
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	6.25 ± 0.04
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	6.26 ± 0.04
Ni + <i>P. putida</i> 23	6.29 ± 0.03
Исходная почва	5.86 ± 0.00

Примечание. Средние из 4-х повторностей опыта ± ошибки средней.

Таким образом, проведенное исследование показало, что применение стимулирующих рост растений бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 или *P. putida* 23 оказало положительное влияние на рост яровой пшеницы при загрязнении агросерой почвы водорастворимым соединением Ni в дозе 200 мг/кг почвы. При этом внесение бактерий увеличило урожай, в том числе и зерна, в условиях искусственного загрязнения почвы ТМ. Исследованные бактерии в одинаковой степени стимулировали рост загрязненных растений. Кроме того, все бактерии полностью устраняли негативное влияние Ni на растения яровой пшеницы, обеспечивая получение такой же биомассы растений, включая зерно, как и не инокулированных растений, не подвергнутых Ni-стрессу. Таким образом, внесение бактерий повышало устойчивость растений яровой пшеницы к негативному действию ТМ. Ранее в результате проведения вегетационных опытов было установлено, что при загрязнении агросерой почвы соединениями Pb и Cd соответственно из расчета 200 мг Pb и 10 мг Cd/кг почвы внесение ростстимулирующих бактерий рода *Pseudomonas* также полностью

устраняло токсическое действие ТМ на растения ячменя [8, 9]. При этом применение бактерий обеспечивало получение такой же биомассы растений, как и выращенных без загрязнения.

Испытанные бактерии, оказали неоднозначное влияние на биомассу яровой пшеницы, содержание и аккумуляцию Ni в растениях. Инокуляция индийской горчицы бактерией *Pseudomonas* Ps29C, устойчивой к Ni и стимулирующей рост растений, защищала их от металла, внесенного в различных концентрациях в почву, не влияя при этом на аккумуляцию Ni в корнях и побегах [10]. Применение в загрязненной Ni почве ростстимулирующих бактерий *Pseudomonas* sp. увеличило биомассу горчицы сарептской (*Brassica juncea*), не оказывая влияния на содержание ТМ в растениях [11]. В наших исследованиях прибавки биомассы растений в загрязненных условиях при применении всех бактерий происходили также без существенных изменений содержания Ni в зерне и соломе. Внесение испытанных бактерий увеличило вынос растениями Ni зерном и соломой из загрязненной почвы, как и при выращивании растений до фазы трубкования в предыдущем опыте [7] и, таким образом, усилило фитоэкстракцию ТМ вследствие стимуляции роста растений, без существенных изменений содержания в них ТМ. В корневой системе при полной спелости растений содержалось значительно больше Ni, чем в надземных органах, как и в вегетативной массе в предыдущем опыте в фазе трубкования [7]. Под влиянием бактерий увеличились как содержание, так и накопление Ni в корневой системе, причем в наибольшей степени при инокуляции *P. putida* 23. Увеличение содержания в корнях инокулированных бактериями растений, наряду с увеличением накопления в них Ni, свидетельствовало об усилении барьера на границе надземные органы–корни при поступлении ТМ в зерно и солому. Усиление этого барьера уменьшило проникновение Ni в надземные органы и, таким образом, повышало устойчивость растений к токсическому действию ТМ, устраняя его негативное действие.

Увеличение аккумуляции Ni в растениях под влиянием бактерий происходило без существенных изменений реакции почвенной среды, которая, как известно, оказывает существенное влияние на подвижность в почве и биодоступность ТМ. Увеличение выноса Ni надземной биомассой и в корневой системе инокулированных бактериями рода *Pseudomonas* растений было, вероятно, обусловлено увеличением подвижности в почве ТМ под влиянием продуцируемых бактериями экзометаболических – сидорофоров. Бактериальные

Таблица 5. Содержание биофильных элементов в растениях

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu		
	%					мг/кг					
Зерно	Без Ni и внесения бактерий – контроль	1.88	0.18	0.23	0.08	0.24	124	13	60	4	
	Ni без внесения бактерий	2.06	0.20	0.30	0.07	0.24	159	18	74	5	
	Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	2.02	0.24	0.30	0.05	0.25	164	21	74	5	
	Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	2.14	0.26	0.30	0.05	0.28	136	24	72	4	
	Ni + <i>P. putida</i> 23	2.04	0.23	0.34	0.05	0.29	133	25	70	4	
	Солома	Без Ni и внесения бактерий – контроль	0.36	0.07	2.12	0.94	0.28	161	21	34	6
		Ni без внесения бактерий	0.40	0.07	2.20	0.83	0.32	206	27	37	7
		Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	0.32	0.07	2.24	0.77	0.34	247	32	42	7
		Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	0.36	0.06	2.26	0.77	0.37	371	41	37	8
		Ni + <i>P. putida</i> 23	0.31	0.07	2.20	0.78	0.37	371	38	43	7
Корни	Без Ni и внесения бактерий – контроль	1.14	0.02	0.33	1.25	0.32	1.20	140	98	9	
	Ni без внесения бактерий	1.33	0.04	0.43	0.58	0.40	1.33	170	107	9	
	Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	1.20	0.05	0.38	0.45	0.48	1.35	177	98	10	
	Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	1.20	0.05	0.37	0.53	0.42	1.41	171	115	11	
	Ni + <i>P. putida</i> 23	1.20	0.06	0.39	0.56	0.42	1.36	162	125	11	

Примечания. 1. Содержание Fe в корнях дано в %. 2. Средние из 4-х повторностей опыта. 3. Ошибки определений макро- и микроэлементов в вариантах опыта не превышали соответственно 5 и 15%.

Таблица 6. Вынос биофильных элементов растениями

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	мг/сосуд					мкг/сосуд			
	Зерно								
Без Ni и внесения бактерий – контроль	440	42	54	19	56	2900	304	1400	94
Ni без внесения бактерий	412	40	60	14	48	3180	360	1480	100
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	492	59	73	12	61	4000	512	1810	122
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	518	63	73	12	68	3290	581	1740	97
Ni + <i>P. putida</i> 23	486	55	81	12	69	3170	595	1670	95
HCP ₀₅	70	11	11	2	10	830	110	180	25
	Целое растение								
Без Ni и внесения бактерий – контроль	590	64	711	350	153	7850	1450	2790	308
Ni без внесения бактерий	538	58	606	229	134	8230	1380	2610	290
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	632	83	806	274	186	12000	2090	3460	378
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	659	81	740	253	189	14100	2330	3200	365
Ni + <i>P. putida</i> 23	621	77	740	262	190	14100	2330	3400	341
HCP ₀₅	81	12	110	22	28	2500	480	520	44

сидерофоры способны влиять на подвижность в почве и биодоступность металлов в результате процессов подкисления, комплексообразования, осаждения и восстановления. В зависимости от состава и концентрации продуцируемых сидерофоров ризосферными микроорганизмами, а также свойств металла, возможно как увеличение, так и уменьшение его подвижности [12].

Обнаруженные при уборке большая масса подвергнутых никелевому стрессу растений и их устойчивость к токсическому действию ТМ при внесении ризобактерий могли быть обусловлены также увеличением выноса из загрязненной почвы биофильных элементов зерном, соломой и корневой системой а, следовательно, улучшением минерального питания растений. Микробы, ассоциированные с растениями, могут стимулировать их рост, оказывая положительное влияние на минеральное питание, в том числе в условиях стресса, вызванного ТМ [13]. Увеличение выноса элементов минерального питания инокулированными бактериями растениями яровой пшеницы при выращивании до полной спелости происходило в целом без существенных изменений содержания большинства элементов в надземных органах, в том числе в зерне и в корнях. Следовательно, внесение бактерий увеличило накопление питательных элементов в растениях при загрязнении почвы Ni вследствие стимуляции их роста и увеличения урожая.

ВЫВОДЫ

1. Внесение ростстимулирующих ризосферных бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 способствовало росту растений яровой пшеницы и повышало их устойчивость к токсическому действию Ni при искусственном загрязнении ТМ агросерой почвы в дозе 200 мг/кг почвы. Применение бактерий увеличило массу зерна, соломы и корней загрязненных растений и полностью устраняло фитотоксичность ТМ.

2. Инокуляция бактериями усилила фитоэкстракцию Ni, увеличивая вынос ТМ из загрязненной почвы надземной биомассой, без значимых изменений его содержания в зерне и соломе. Под влиянием бактерий увеличилось содержание и накопление Ni в корневой системе, при инокуляции *P. putida* 23 — в наибольшей степени.

3. Положительное действие и устойчивость растений к токсическому действию Ni при инокуляции бактериями было обусловлено: а) — усилением барьера корневой системы по отношению к поступлению ТМ в надземную биомассу и б) — улучшением минерального питания инокулиро-

ванных бактериями растений (увеличением выноса ими из загрязненной почвы большинства биофильных элементов).

4. Увеличение выноса биофильных элементов растениями, инокулированными бактериями, из загрязненной почвы происходило вследствие стимуляции роста растений и увеличения урожая, в целом без существенных изменений содержания элементов в надземных органах.

5. Увеличение выноса Ni растениями при внесении бактерий происходило без существенных изменений реакции почвенной среды и, вероятно, было обусловлено образованием бактериальных сидерофоров.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят ЦКП ИФХиБПП РАН за выполнение химических анализов почвы и определение зольных элементов в растворах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейтрализация загрязненных почв // Под ред. Мажайского Ю.А. Рязань: Мещерск. ф-л ВНИИГиМ РАСХН, 2008. 528 с.
2. *Burd G.I., Dixon D.G., Glick B.R.* A plant growth-promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings // *App. Environ. Microbiol.* 1998. V. 64. № 10. P. 3663–3668.
3. *Dorjey S., Dolkar D., Sharma R.* Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review // *Inter. J. Curr. Microbial. App. Sci.* 2017. V. 6. № 7. P. 1335–1344. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.160>
4. *Анохина Т.О., Сиунова Т.В., Сизова О.И., Захарченко Н.С., Кочетков В.В.* Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробιοтехнологиях // *Агрохимия.* 2018. № 10. С. 54–66. <https://doi.org/10.1134/S0002188118100034>
5. *Farwell A.J., Vesely S., Nero V., Rodrigues H., Shah S., Dixon D.G., Glick B.R.* The use of transgenic canola (*Brassica napus*) and plant growth-promoting bacteria to enhance plant biomass at a nickel-contaminated field site // *Plant and Soil.* 2006. V. 288. № 1–2. P. 309–318. DOI: 1007/s11104-006-9119-y
6. *Farwell A.J., Vesely S., Nero V., Rodrigues H., McCormack K., Shah S., Dixon D.G., Glick B.R.* Tolerance of transgenic canola plants (*Brassica napus*) amended with plant growth-promoting bacteria to flooding stress at a metal-contaminated field site // *Environ. Pollut.* 2007. V. 147. № 3. P. 540–545. DOI: . 2006.10.014 <https://doi.org/10.1016/j.envpol>
7. *Шаббаев В.П., Остроумов В.Е.* Влияние стимулирующих рост растений ризосферных бактерий на устойчивость яровой пшеницы к токсическому действию никеля при загрязнении агросерой почвы // *Агрохимия.* 2021. № 11. С. 87–94. <https://doi.org/10.31857/S0002188121090106>

8. Шабает В.П. Почвенно-агрохимические аспекты ремедиации загрязненной свинцом почвы при внесении стимулирующих рост растений ризосферных бактерий // Почвоведение. 2012. № 5. С. 601–611.
9. Шабает В.П., Бочарникова Е.А., Остроумов В.Е. Ремедиация загрязненной кадмием почвы при применении стимулирующих рост растений ризобактерий и природного цеолита // Почвоведение. 2020. № 6. С. 738–750.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20060118>
10. Rajkumar M., Freitas H. Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard // Bioresource Technol. 2008. V. 99. Iss. 9. P. 3491–3498.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.046>
11. Ma Y., Rajkumar M., Luo Y., Freitas H. Inoculation of endophytic bacteria on host and non-host plants-effects on plant growth and Ni uptake // J. Hazard. Mater. 2011. V. 195. P. 230–237.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.034>
12. Mishra J., Singh R., Arora N.K. Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms. Mini review article. // Front. Microbiol. 06 September 2017. Article 1706. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706>
13. Chandel A.K., Chen H., Sharma H.Ch., Adhikari K., Gao B. Beneficial microbes for sustainable agriculture // Microbes for sustainable development and bioremediation. 1 st ed. Chapter 15. P. 257–266 / Eds. Chandra R., Sobti R.C. Boca Raton: CRC Press, 2020. 386 p. <https://doi.org/10.1201/9780429275876>

Influence of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Spring Wheat Yield under Agrogray Soil Contamination with Ni

V. P. Shabayev^{a, #}, V. E. Ostroumov^a, and M. P. Volokitin^b

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

^b*Institute Basic Biological Problems, RAS
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

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

Influence of application of plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Pseudomonas* on the yield of spring wheat when plants are grown up to maturity in agrogray soil artificially contaminated with Ni in pot experiment was studied. The resistance of plants to heavy metal toxicity was estimated when bacteria were introduced. Chemical composition of plants and uptake of Ni and biophilic elements by aboveground biomass, including grain and by root system of bacterially inoculated plants were determined.

Key words: *Pseudomonas*, *T. aestivum* L., NiCl₂ · 6H₂O, chemical composition of plants.

УДК 631.8:519.237.5

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В АГРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2022 г. А. В. Пасынков¹, Е. Н. Пасынкова^{1,*}

¹Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства “Белогорка” –
филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха
188338 п. Белогорка, Гатчинский р-н, Ленинградская обл., Россия

*E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

Поступила в редакцию 11.04.2022 г.

После доработки 02.06.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Обсуждаются особенности и практические аспекты использования регрессионного анализа в агрохимических исследованиях. Показано, что линейные уравнения регрессии не могут являться корректным методом статистической обработки экспериментальных данных, т.к. в зависимости от того, в какой части биологического интервала независимых переменных (в начале, в середине или в конце) получены данные, уравнения могут показывать противоречивые результаты. В большинстве случаев зависимости между различными показателями в агрохимических исследованиях максимально точно отражают нелинейные уравнения: логарифмические, половинной степени, 2-го, 3-го порядка и т.п. Множественный регрессионный анализ с учетом ограничений (распределение выборок, мультиколлинеарность и т.д.) может быть использован при исследовании зависимостей урожайности и показателей качества от доз и соотношений удобрений, норм биологических и химических средств защиты растений, гидротермических условий, складывающихся в период вегетации, а также в изучении взаимосвязей биохимического состава и технологических качеств сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: регрессионный анализ, нелинейные уравнения, урожайность, удобрения, средства защиты растений, гидротермические условия, технологические качества.

DOI: 10.31857/S0002188122100088

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестна важная роль методов математической статистики при анализе данных, полученных при проведении полевых экспериментов и сопутствующих им широкого спектра наблюдений и аналитических работ. При этом важность статистической обработки экспериментальных данных не подвергалась сомнению в предшествующий период развития агрохимии, а в настоящее время роль статистической обработки данных значительно возросла. Это связано с накоплением и использованием сравнительно больших массивов экспериментальных данных, полученных в различных регионах России как при проведении серийных краткосрочных и особенно длительных стационарных опытов, проводимых в рамках Географической сети опытов с удобрениями под методическим руководством ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова.

Еще одной из причин потребности в статистической обработке является обеспокоенность сло-

жившимся положением редакторов научных журналов биологического и сельскохозяйственного профиля. Даже в комментариях к “Правилам для авторов” одного из ведущих сельскохозяйственных журналов нашей страны прямо указано, что “... большинство статей отклоняется по причине отсутствия статистической обработки” [1]. Трудно представить такие “откровения” у редакторов физико-математических журналов.

Известно несколько методов статистической обработки экспериментальных данных, используемых в агрохимических исследованиях. Анализ частоты использования методов статистической обработки данных, представленных в публикациях в последние годы, показал, что наряду с дисперсионным, регрессионный анализ является одним из основных ее методов. Поэтому в данной публикации частично обсуждаются теоретические, но в основном практические аспекты использования именно регрессионного анализа.

Регрессионный анализ, как метод статистической обработки экспериментальных данных основан на методе наименьших квадратов [2]. Более детально с сущностью метода наименьших квадратов, а также развитием и особенностями применения регрессионного анализа можно ознакомиться в капитальном труде, переведенном на русский язык и выдержавшем в СССР и современной России 3 издания [3]. В этой книге описываются методы подбора и исследования линейных и нелинейных регрессионных моделей различной степени сложности, а также, что очень важно в настоящее время, рассматриваются и обсуждаются практические аспекты их применения. Важность практического использования регрессионного анализа при статистической обработке экспериментальных данных в агрохимических исследованиях отмечали с середины XX в. и в нашей стране [4–6]. Цель работы — исследование особенностей использования регрессионного анализа в агрохимических исследованиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В представленной работе обсуждаются особенности и результаты использования регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных авторами статьи, а также полученных при статистической обработке опубликованных данных других авторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим основные аспекты использования парного и множественного регрессионного анализа в агрохимических исследованиях. Наиболее часто используют уравнения парной линейной регрессии: $Y = a_0 + bX$, где Y — зависимая переменная, X — независимая переменная, a_0 — в частном случае [5], константа, показывающая, какую величину примет зависимая переменная в случае отсутствия действия независимой переменной, b — эмпирический коэффициент, который, как и a_0 рассчитывают с определенной ошибкой. Известно, что максимально точно линейные уравнения отражают связи между зависимой (Y) и независимой (X) переменной только в узком их (переменных) интервале варьирования. Однако если провести даже краткий и поверхностный анализ статей, поступающих в отечественные и зарубежные журналы биологического и сельскохозяйственного профиля, можно довольно быстро убедиться в широком применении уравнений парной линейной регрессии при анализе зависимостей, по-

лученных при проведении полевых и вегетационных экспериментов, а также аналитических работ.

В следующем примере показаны как положительные стороны в использовании линейных уравнений, так и возможные отрицательные последствия их применения. Рассмотрим зависимость экстрактивности зерна пивоваренного ячменя от содержания белка (рис. 1). Проведенный авторами статьи анализ собственных и литературных данных зависимостей экстрактивности зерна (Y , % а.с.в.) пивоваренного ячменя от содержания сырого белка ($X = N_{\text{общ}} \times 6.25$, % а.с.в.) с учетом географического принципа показал, что в северных и центральных областях Нечерноземья России между этими показателями наблюдается статистически значимая (при $p < 0.05$) линейная отрицательная (рис. 1а), южнее Нечерноземья — слабая отрицательная или ее отсутствие (рис. 1б), еще южнее — отсутствие или слабая положительная зависимость (рис. 1в). Необходимо отметить, что на рис. 1а и 1в графики линейного уравнения и уравнения 2-го порядка практически совпадают.

Объединение всех данных в один массив при общем числе наблюдений $n = 120$ и проведение графического и регрессионного анализа показало, что зависимость экстрактивности зерна от содержания белка носит нелинейный характер. При этом данная зависимость наиболее точно (по величине коэффициента детерминации R^2) описывается уравнением 2-го порядка с четко выраженной точкой экстремума (ТЭ) (в данном случае минимума функции), находящейся в пределах полученных экспериментальных данных (рис. 1г). Следует отметить, что при анализе только данных, представленных на рис. 1б и (или) 1в, можно прийти к заключению о том, что белковость зерна пивоваренного ячменя в данных (конкретных) почвенно-климатических условиях не имеет никакого значения для накопления экстрактивных веществ по причине отсутствия статистически значимых зависимостей между ними.

Приведенный выше пример показывает, что линейные уравнения регрессии не могут являться корректным методом статистической обработки полученных данных, т.к. в зависимости от того, в какой части биологического интервала (в начале, в середине или в конце) получены экспериментальные данные, уравнения будут показывать некорректные, взаимоисключающие и (или) противоречивые результаты. При этом линейные уравнения без использования графического анализа не будут показывать реально существующие зависимости (закономерности) и вполне вероятно будут вводить в заблуждение относительно степени

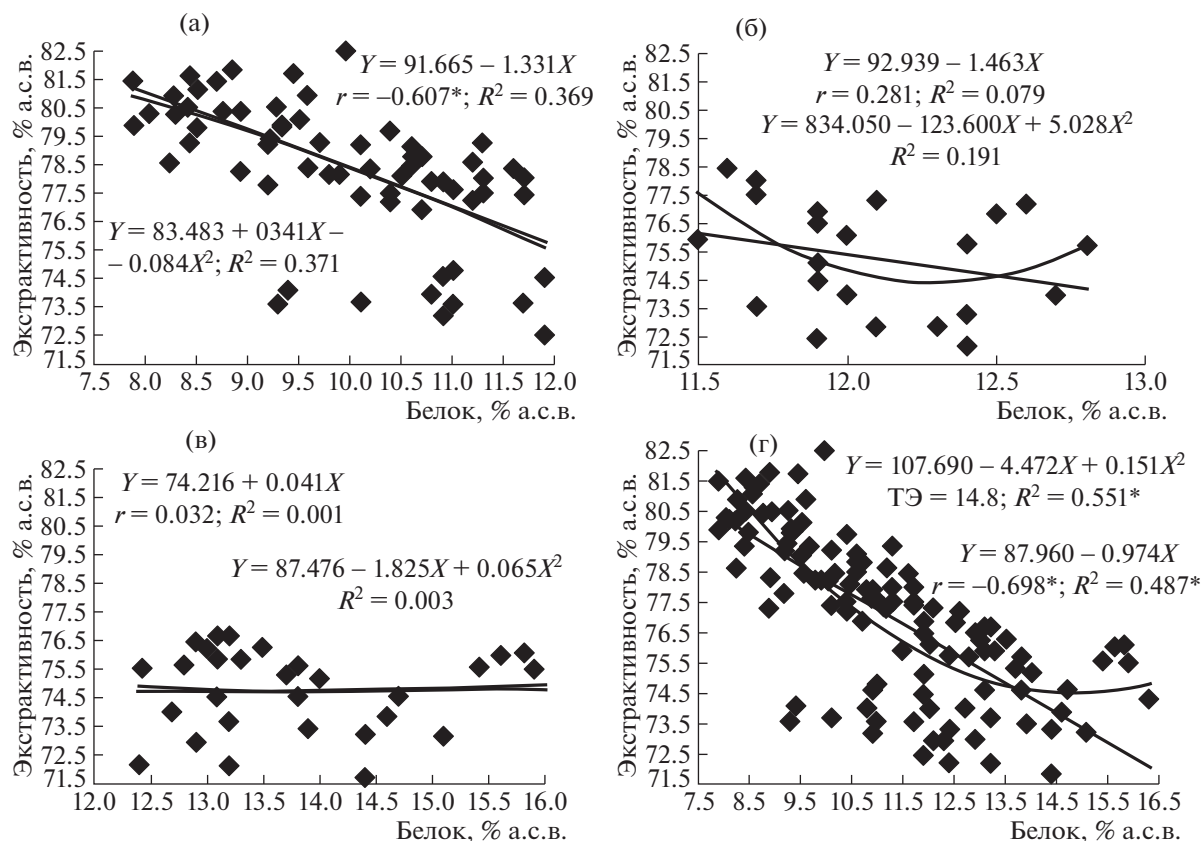


Рис. 1. Зависимость экстрактивности (Y) от содержания белка в зерне пивоваренного ячменя (X), ТЭ – точка экстремума.

тесноты связи между переменными и направленности их действия.

В настоящее время общепризнано, что в подавляющем большинстве случаев зависимости между различными показателями в биологических и агрохимических исследованиях максимально точно отражают нелинейные уравнения. Одними из наиболее часто применяемых в агрохимических исследованиях являются уравнения половинной степени: $Y = a_0 + bX - cX^{0.5}$ и 2-го порядка: $Y = a_0 + bX - cX^2$, которые используют при исследовании зависимостей урожайности и показателей качества сельскохозяйственных культур от доз минеральных и органических удобрений [6–8], норм применения биологических и химических средств защиты растений [9–12], а также от гидротермических условий, складывающихся в период вегетации (суммы осадков, суммы эффективных температур, ГТК, продолжительности межфазных периодов и т.п.) [13, 14]. Чаще всего уравнения половинной степени используют в тех случаях, когда точка экстремума не достигается по причине выхода величин зависимой переменной на плато, а 2-го порядка – когда точка

экстремума (минимума или максимума функции) объективно существует и поэтому может быть определена. При этом точка экстремума может находиться или не находиться в пределах данных, полученных при проведении экспериментальных и (или) аналитических работ. Ввиду того, что уравнения половинной степени и 2-го порядка в основном используют при статистической обработке данных, полученных при проведении многофакторных экспериментов, эффективность и особенности их применения будут рассмотрены ниже.

Следующим видом нелинейных уравнений, используемых в агрохимических исследованиях, служат уравнения 3-го порядка: $Y = a_0 + bX + cX^2 + dX^3$ с 2-мя точками экстремума. Причем обе точки экстремума или только одна из них может находиться в пределах полученных экспериментальных данных. В качестве примера уравнения 3-го порядка (рис. 2) представлена зависимость показателя “число падения” зерна озимой ржи от толщины зерновки [15]. При этом, как видим, обе точки экстремума (2.12 и 3.13 мм) в уравнении 3-го порядка находятся в пределах полученных данных.

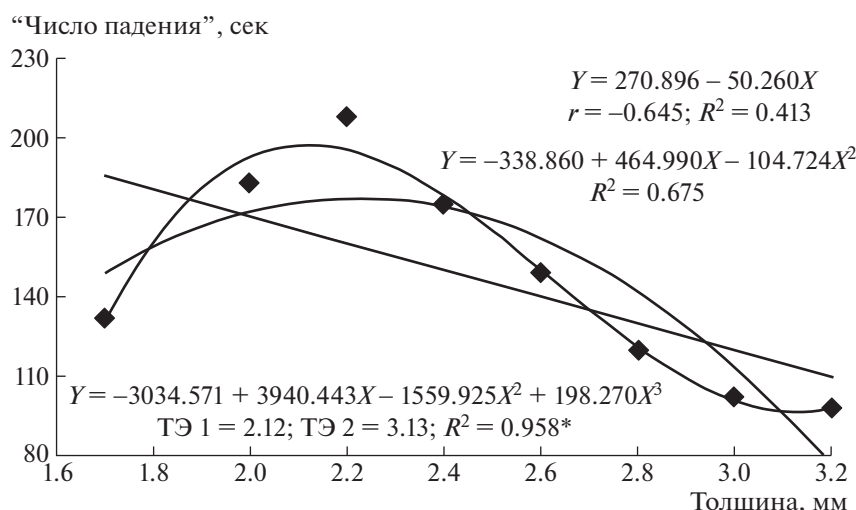


Рис. 2. Зависимость показателя “число падений” от толщины зерновки.

На рис. 2 также приведены линейное и уравнение 2-го порядка, коэффициенты корреляции (r) которых статистически незначимы на принятом в агрохимических исследованиях уровне значимости ($p < 0.05$). К тому же оба уравнения показывают и меньшую точность (по величине R^2), чем уравнение 3-го порядка. Изложенное выше и данные, представленные на рис. 1 и 2, подтверждают важность графического анализа полученных экспериментальных данных, а также необходимость расчета не только уравнения парной линейной регрессии, но и уравнений 2-го и 3-го порядка. Так как только в этом случае появляется определенная уверенность в корректном проведении статистической обработки данных и объективно вытекающих из этого заключений и выводов.

В научной литературе имеются сведения и об использовании в агрохимических исследованиях уравнений более высоких порядков (в частности, шестого) [16]. Как и в предыдущем случае, сначала авторы провели графический анализ полученных данных, а затем рассчитали уравнения, которые с максимальной точностью отражали наблюдаемые ими зависимости.

Логарифмические уравнения применяются в тех случаях, когда одна из переменных переведена в $\lg$ или по своей сути является $\lg$. Известно, что показатель pH по своей сути является $\lg$ [17]. По этой причине какие-либо зависимости, в которых данный показатель служит в качестве зависимой (Y) или независимой переменной (X) будут иметь следующий вид: $Y(\text{pH}) = a_0 + b \lg X$ или $\lg Y = a_0 + bX(\text{pH})$. Чаще всего в практической деятельности перевод в логарифмы необходим при

анализе зависимостей величины pH от содержания обменного Al^{3+} и подвижных форм Fe и Mn ($\lg \text{Al}^{3+}$, $\lg \text{Fe}$ и $\lg \text{Mn}$ соответственно), а также и других показателей почвенного плодородия от величины pH [18]. Необходимость перевода зависимой переменной в $\lg$ может возникнуть и для выявления зависимости урожайности ($\lg Y$) от величины pH в контрольных (без внесения как минеральных, так и органических удобрений) вариантах полевых опытов. Необходимо отметить, что в случае применения удобрений зависимости урожайности (Y) от содержания элементов минерального питания в почве (X_1 , мг/кг) и находящихся в составе вносимых удобрений (X_2 , кг д.в./га) не имеют биологического смысла [7], т.к. определить вклад каждого из 2-х источников минерального питания растений (в рассматриваемом случае почвы (X_1) и удобрений (X_2)) в формировании урожая, показателей биохимического состава и технологических качеств возможно только при использовании схем опытов с удобрениями на нескольких контрастных фонах плодородия почвы, при этом более точно — при использовании изотопов соответствующих элементов минерального питания: ^{15}N , ^{32}P , ^{40}K и т.п.

В качестве примера использования регрессионного анализа данных, полученных авторами статьи при проведении длительного полевого опыта с известкованием [17, 18], показано (табл. 1), что содержание обменного Al^{3+} в почве (рис. 3а) и подвижных форм Fe и Mn статистически значимо связано с величиной pH_{KCl} , при этом более тесно — с содержанием Al^{3+} , менее тесно — с содержанием Mn. На рис. 3б представлена зави-

симость урожайности зерна ячменя ($\lg Y$), полученная в засушливый год, от величины рН.

Известно, что множественный регрессионный анализ (МРА) как статистический метод предполагает установление зависимостей от 2-х и более независимых переменных, причем в некоторых случаях независимые переменные могут иметь несколько градаций каждая. При этом в подавляющем большинстве случаев в агрохимических исследованиях необходим учет взаимодействия независимых переменных [10], что существенно усложняет проведение статистического анализа. По этой причине без использования современной компьютерной техники с соответствующим программным обеспечением невозможно учесть такое многообразие факторов, а также выявить степень их взаимодействия. При этом одновременно должны соблюдаться все обязательные ограничения [3] по корректному использованию МРА, которые будут рассмотрены ниже.

Метод МРА изначально был рекомендован, применялся (и применяется) при статистической обработке данных специально спланированных полнофакторных полевых опытов с удобрениями [2, 4], затем — с различными выборками из полнофакторных схем [4, 6, 9], а в последующий период — со средствами защиты растений при раздельном и комплексном их применении с удобрениями. Дальнейшее совершенствование схем многофакторных полевых опытов с комплексным применением средств химизации пошло по пути введения в их схемы факторов с прерывным шагом, в частности, доз удобрений и норм расхода химических средств защиты растений [9–12]. Это стало возможным в связи с развитием новых методических подходов к проведению полевых

Таблица 1. Зависимости величин рН (Y , ед.) от содержания обменного Al^{3+} и подвижных форм Fe и Mn (2021 г.)

Уравнение регрессии ($n = 7, p < 0.05$)	r	R^2
$Y = 4.233 - 0.552 \lg X (\text{Al}^{3+})$	-0.933^*	0.870
$Y = 8.718 - 3.348 \lg X (\text{Mn})$	-0.820^*	0.672
$Y = 7.184 - 3.348 \lg X (\text{Fe})$	-0.892^*	0.796

Примечание. $n = 7$ — общее число наблюдений, *статистически значимо при $p < 0.05$. То же в табл. 2–5 и на рис. 1–8.

опытов при комплексном применении средств химизации [10] и развитием отечественной электронно-вычислительной техники, а затем и с появлением персональных компьютеров. При этом были созданы предпосылки для создания различных пакетов отечественных прикладных статистических программ, в частности, “Stat” (ВИУА им. Д.Н. Прянишникова, 1991, автор — Арутюнова Л.В.), что дало возможность проведения статистической обработки данных, полученных при проведении полевых опытов, в схемы которых были включены факторы как с непрерывным, так и с прерывным шагом [9–12].

Как было отмечено выше, полевые опыты могут быть как полнофакторные, а также представлять определенные выборки из них: 1/4, 1/8 или 1/9 [4, 6, 10]. В качестве примера полнофакторного полевого опыта можно привести четырехфакторный полевой опыт с озимой рожью, проведенный по схеме $4 \times 2 \times 2 \times 2$ в лаборатории агрохимии НИИСХ Северо-Востока (ныне ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров) [19]. В 32-х вариантах опыта на постоянном фосфорно-калийном фоне изучали эффективность возрастающих доз азот-

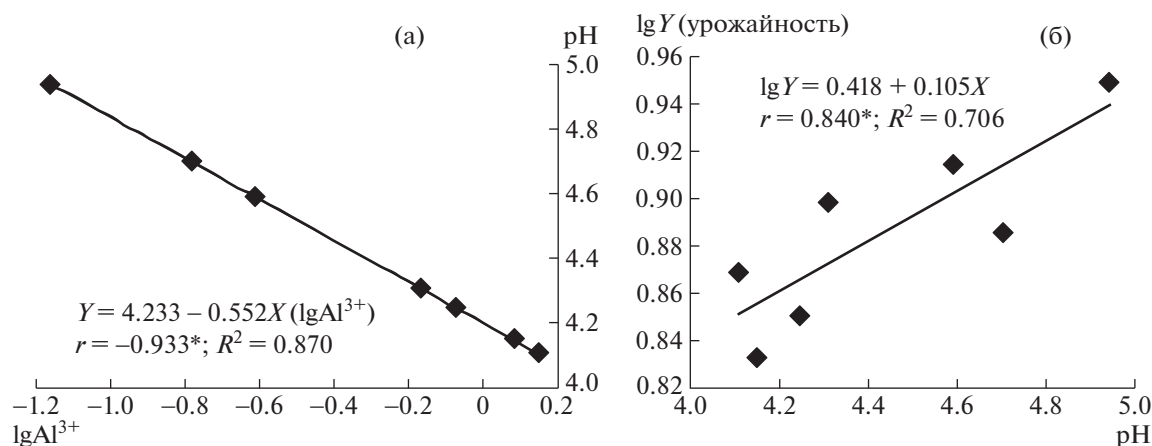


Рис. 3. Зависимость рН (Y , ед.) от содержания обменного Al^{3+} ($\lg X$) — (а) и урожайности зерна ячменя ($\lg Y$) от величины рН (X , ед.) — (б).

Таблица 2. Зависимость урожайности и показателей качества зерна (Y) озимой ржи от примененных средств химизации (X) (среднее за 3 года) [19]

Показатель (Y)	Уравнение регрессии ($n = 96$)	R^2
Урожайность, ц/га	$Y = 17.19 + 7.95N - 1.11N^2 + 5.56F + 4.34T + 0.93N \cdot T - 4.40K - 2.05N \cdot \Phi$	0.98*
ЧПС, шт./м ²	$Y = 280.2 + 35.08N + 0.50N \cdot F$	0.78*
Масса 1000 зерен, г	$Y = 25.60 + 2.24T - 0.73N - 0.18F$	0.90*
Натура, г/л	$Y = 686.87 + 7.44T - 6.41N$	0.77*
Белок, %	$Y = 8.45 + 0.94N - 0.23F \cdot K - 0.10N \cdot T$	0.89*
Крахмал, %	$Y = 49.66 + 1.03K \cdot T - 0.34N^2$	0.72*

Примечание. N – дозы азотных удобрений (в кодированных единицах: 0, 2, 3, 4), F – фундазол, K – кампозан, T – тилт (0 – без обработки, 1 – рекомендуемые производственные нормы), ЧПС – число продуктивных стеблей.

ных удобрений (N_0 , N_{60} до посева, N_{90} (N_{60} до посева + N_{30} весной) и N_{120} (N_{60} до посева + N_{30} весной + N_{30} в фазе трубкования)), фунгицидов фундозола и тилта, а также ретарданта кампозана (без обработки и их рекомендуемые производственные нормы). В табл. 2 представлены некоторые результаты статистической обработки данных, полученных при проведении упомянутого выше четырехфакторного опыта. Как видим, практически большинство зависимостей имели линейный характер. Исключение составляли зависимости урожайности зерна и содержания крахмала в нем от доз азотных удобрений. Например, с усилением азотного питания урожайность зерна возрастала, однако каждое последующее увеличение доз азота приводило к меньшему ее увеличению по сравнению с предыдущей дозой ($+N - N^2$). Содержание крахмала с увеличением доз азота снижалось, при этом каждая последующая доза в большей степени снижала содержание крахмала по сравнению с предыдущей ($-N^2$).

Многофакторный полевой опыт, представляющий собой выборку (1/4) из полнофакторного эксперимента ($6 \times 6 \times 6$) с 6-ю дозами азотных, фосфорных и калийных удобрений был заложен и его проводили также в НИИСХ Северо-Востока в 6-польном зернопаротравяном полевом севообороте: чистый пар—озимая рожь—ячмень с подсевом клевера—клевер одногодичного использования (сено)—яровая пшеница—овес [20]. Схема опыта включала 54 варианта в двукратной повторности. За единицу доз азотных (N_{aa}), фосфорных (P_{cd}) и калийных (K_x) удобрений под зерновые культуры приняты следующие величины (код. ед.): 000 – без удобрений, 111 – (NPK)60, 222 – (NPK)60, 333 – (NPK)90, 444 – (NPK)120 и 555 – (NPK)150. Под клевер внесение удобрений в опыте не предусмотрено.

Ниже в качестве примера статистической обработки данных приведено уравнение, отражаю-

щее зависимость содержания подвижного фосфора (Y , мг/кг) от доз азотных, фосфорных и калийных удобрений (код. ед.): $Y = 53.6 + 13.2P - 1.1P^2 + 1.2N \cdot P - 2.56N$, $R^2 = 0.809^*$ (рис. 4). Калийные удобрения на содержание подвижного фосфора достоверного влияния не оказали. Существенное влияние на содержание фосфора оказали фосфорные и азотные удобрения, а также их совместное применение. При этом с возрастанием доз фосфорных удобрений содержание фосфора в почве увеличивалось, однако каждое последующее их возрастание замедляло темпы роста содержания фосфора ($+P - P^2$). Применение азотных удобрений при одностороннем внесении снижало ($-N$), а совместное внесение азотных и фосфорных – повышало ($+N \cdot P$) содержание фосфора в почве. Необходимо отметить, что в целях наглядности на подобного рода рисунках, отражающих зависимость показателей плодородия почв от доз удобрений (рис. 4), возможно использование шкалы единиц доз удобрений в д.в. Однако при этом необходима обязательная ссылка на то, что независимые переменные при расчете уравнения регрессии были представлены в кодированных единицах.

Уравнение, отражающее зависимость содержания калия в почве (Y , мг/кг) от доз азотных, фосфорных и калийных удобрений (код. ед.), показало, что его содержание зависело от всех 3-х видов примененных в опыте удобрений: $Y = 154.835 + 17.404K - 1.339K^2 + 0.941N \cdot K + 0.918P \cdot K - 1.051N \cdot P$, $R^2 = 0.870^*$. Однако известно, что графическое изображение от 3-х независимых переменных (в данном случае N , P и K) в трехмерном пространстве невозможно. Поэтому в данном случае для построения графических изображений величина одной из независимых переменных (выбор ее определяется целью и задачами проведения исследований) фиксируется на одном уровне, а затем воспроизводится графиче-

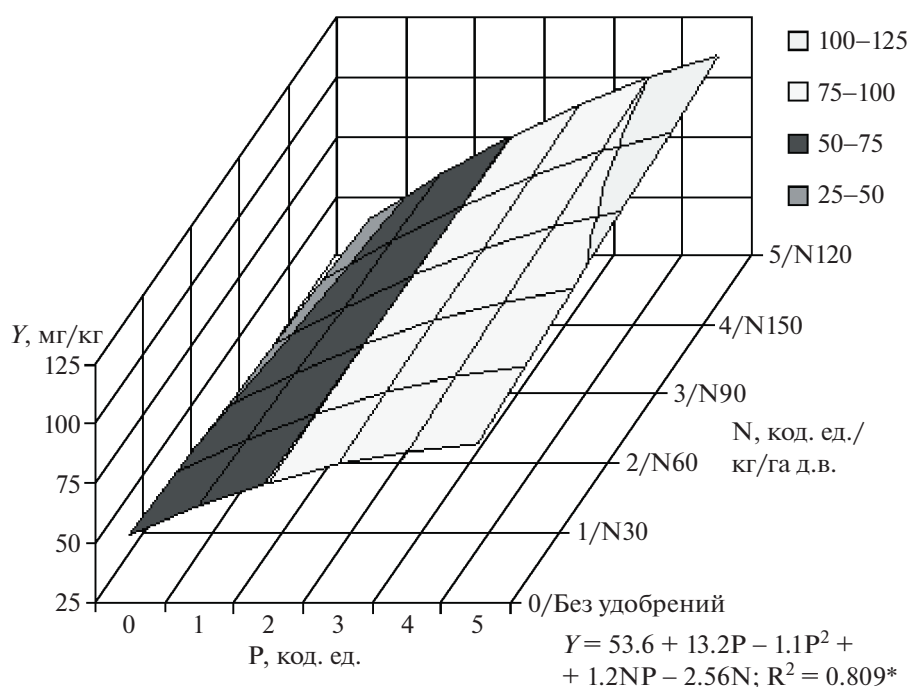


Рис. 4. Зависимость содержания подвижного фосфора в почве (Y) от доз азотных (N) и фосфорных удобрений (P).

ческое изображение уже от двух независимых переменных, как это представлено на рис. 4. При этом в тексте или подрисуночной надписи необходима обязательная ссылка на то, что величина одной из трех независимых переменных зафиксирована на определенном уровне.

МРА может быть использован и при изучении вопросов изменения содержания и фракционно-группового состава органического вещества (гумуса) в почве при проведении опытов с использованием полнофакторных схем или выборок из них с непрерывным или прерывным шагом независимых переменных. Проведение авторами статьи регрессионного анализа экспериментальных данных, опубликованных в работе [21], позволило рассчитать уравнения множественной нелинейной регрессии (полинома половинной степени и 2-го порядка), отражающие зависимость со-

держания в почве суммы гуминовых кислот от изученных доз минеральных удобрений с прерывным шагом и органических удобрений — с непрерывным шагом доз (табл. 3, 4, рис. 5).

Вызывает сожаление тот факт, что авторы публикации не применили множественный регрессионный анализ полученных ими же экспериментальных данных и не использовали графический анализ, который значительно облегчил бы интерпретацию и вызывал бы большее доверие к представленной работе, а также способствовал бы более объективному объяснению закономерностей, полученных авторами при проведении полевого эксперимента.

Важное практическое значение уравнений регрессии состоит в том, что их использование позволяет применить интерполяцию. Это дает возможность получить сведения о величине зависи-

Таблица 3. Зависимость содержания гуминовых кислот (Y , %) от доз минеральных (X_1) и органических удобрений (X_2)

Уравнение	Уравнение регрессии ($n = 12$)	R^2	ТЭ
Линейное (1)	$Y_1 = 28.125 - \text{const}$	—	—
Квадратичное (2)	$Y_2 = 24.406 + 12.184X_1 - 9.266X_1^2 + 0.776X_2^2$	0.650*	0.657
В степени 0.5 (3)	$Y_3 = 25.657 + 3.319X_1^{0.5} + 6.654X_2 - 7.554X_2^{0.5}$	0.629*	—

Примечание. X_1 (код. ед.): 0 — без удобрений, 0.33 — 1/3 дозы, 0.5 — 1/2 дозы, 1 — полная доза; X_2 (код. ед.): 0 — без удобрений, 1 — навоз 40 т/га, 2 — навоз 80 т/га [21]; ТЭ — точка экстремума в зависимости от доз минеральных удобрений. То же в табл. 4 и на рис. 5.

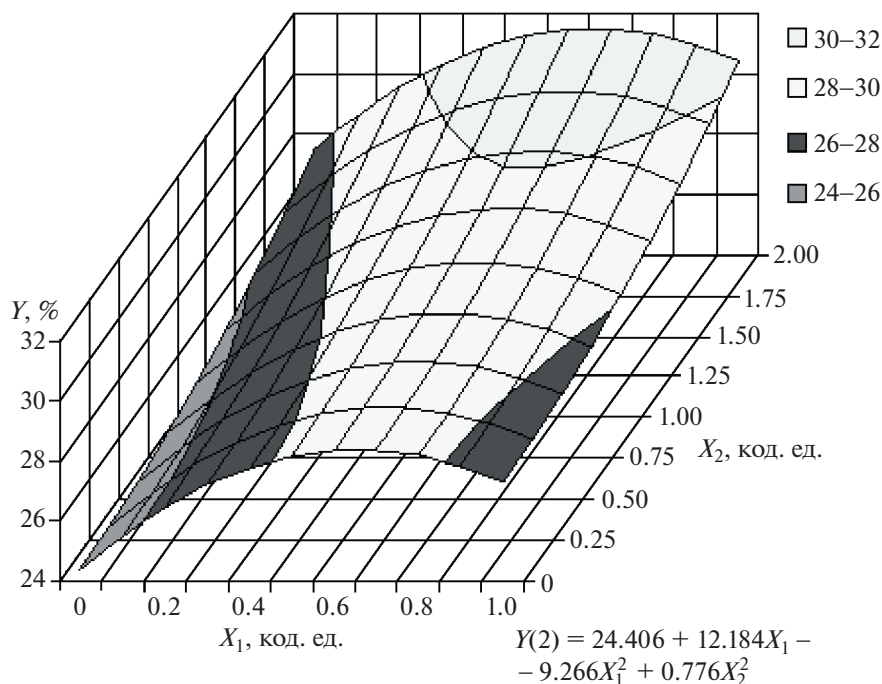
Таблица 4. Алгоритм и результаты сравнительной оценки точности уравнений

$Y_2 = 24.406 + 12.184X_1 - 9.266X_1^2 + 0.776X_2^2$						$Y_3 = 25.657 + 3.319X_1^{0.5} + 6.654X_2 - 7.554X_2^{0.5}$		
X_1	X_2	Y_3	Y_{p2}	$(Y_3 - Y_{p2})$	$(Y_3 - Y_{p2})^2$	$Y_{т3, п3}$	$(Y_3 - Y_{п3})$	$(Y_3 - Y_{п3})^2$
0	0	25.9	24.4	1.5	2.25	25.7	0.2	0.04
0.33	0	27.6	27.4	0.2	0.04	27.6	0.0	0.00
0.5	0	29.8	28.2	1.6	2.56	28.0	1.8	3.24
1	0	26.9	27.3	-0.4	0.16	29.0	-2.1	4.41
0	1	25.8	25.2	0.6	0.36	24.8	1.0	1.00
0.33	1	26.5	28.2	-1.7	2.89	26.7	-0.2	0.04
0.5	1	26.2	29.0	-2.8	7.84	27.1	-0.9	0.81
1	1	28.1	28.1	0.0	0.00	28.1	0.0	0.00
0	2	25.7	27.5	-1.8	3.24	28.3	-2.6	6.76
0.33	2	30.7	30.5	0.2	0.04	30.2	0.5	0.25
0.5	2	33.6	31.3	2.3	5.29	30.6	3.0	9.00
1	2	30.7	30.4	0.3	0.09	31.6	-0.9	0.81
Σ					24.76	Σ		26.36

Примечание. Y_3 – экспериментальное содержание гуминовых кислот, %; Y_p – расчетное содержание гуминовых кислот, % (расчитанное по уравнению (2) или (3 (табл. 3); $(Y_3 - Y_p)$ – отклонения экспериментальных величин содержания гуминовых кислот (Y_3) в почве от расчетных (Y_p); Σ – сумма квадратов отклонений экспериментальных величин от расчетных или $\Sigma(Y_3 - Y_p)^2$.

мой переменной (Y) для неосуществленных в опыте промежуточных вариантов, что значительно углубляет традиционный анализ опытных и аналитических данных [6]. Например, используя

уравнение 2-го порядка (табл. 3) можно определить содержание гуминовых кислот (Y) при внесении отсутствующих в опыте дозах минеральных (X_1) и органических удобрений (X_2), в частности:

**Рис. 5.** Зависимость содержания гуминовых кислот (Y) от доз минеральных (X_1) и органических удобрений (X_2).

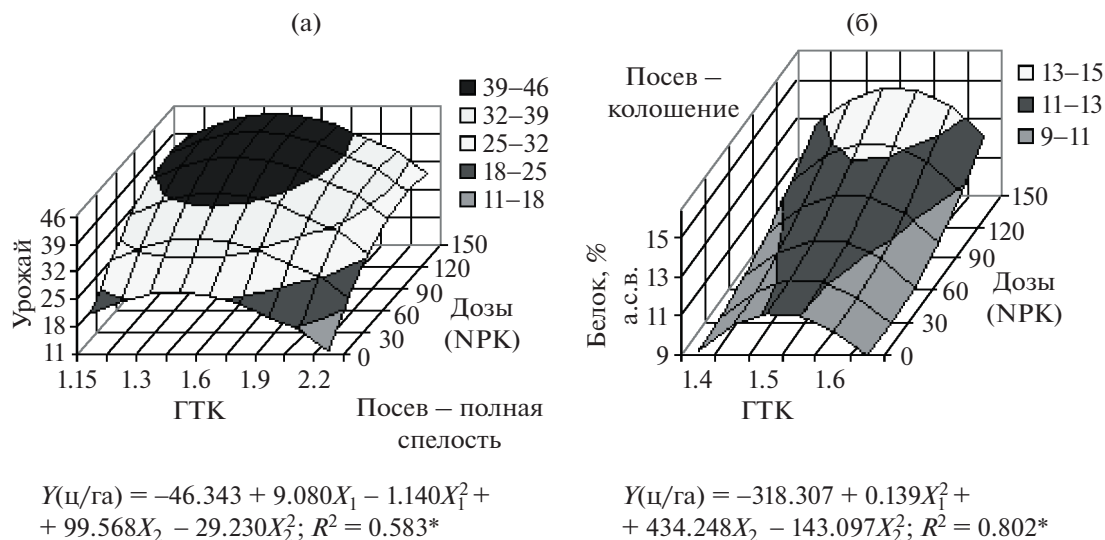


Рис. 6. Зависимость урожайности зерна пшеницы (а) и содержания белка в зерне ячменя (б) (Y) от доз минеральных удобрений (X_1 , код. ед.) и ГТК (X_2).

0.25 и 0.5, а также 0.75 и 1.25–27.1 и 29.5% соответственно.

МРА может быть применен и при изучении зависимостей урожайности и технологических качеств сельскохозяйственных культур от доз удобрений (код. ед.) и гидротермических условий (в частности, ГТК), складывающихся в период вегетации (посев–полная спелость) или, что особенно важно, в его основные межфазные периоды (рис. 6).

При этом в целях корректного исследования зависимостей урожайности и технологических качеств культур от гидротермических условий в период вегетации, рекомендуется учитывать температуру и уровень выпадения осадков ежедневно и связывать их не с календарными сроками (декада, месяц), а с датами наступления и продолжительностью основных фаз развития растений или в целом периода вегетации (посев (посадка)–полная спелость). Это связано с тем, что календарные сроки окончания осенней и возобновления весенней вегетации озимых культур и многолетних трав, а также сроки сева яровых зерновых и сроки посадки овощных и пропашных культур по годам не совпадают, а гидротермические условия летне-осеннего и весенне-летнего периодов вегетации, и в особенности их межфазных периодов, могут существенно отличаться от средних многолетних [22–24].

Исследования показали, что зависимости урожайности и технологических качеств зерновых культур от возрастающих уровней минерального питания и гидротермических условий межфаз-

ных периодов и всего периода вегетации имеют сложный нелинейный характер. Наиболее точно (по величине R^2) данные зависимости отражают уравнения множественной нелинейной регрессии, в частности, полинома половинной степени и 2-го порядка, с четко выраженными точками экстремума или областями оптимума. Максимальная урожайность зерна формируется при нормальном или избыточном увлажнении. При этом она наиболее тесно связана с гидротермическими условиями, складывающимися в период трубкование–цветение (яровая пшеница), трубкование–колошение (пивоваренный ячмень), трубкование–выметывание (пленчатый овес) и всего периода вегетации (посев–полная спелость) [13, 14, 24, 25] (рис. 6а). В максимальной степени (по величине R^2) показатели технологических качеств зерна пивоваренного ячменя (белок, экстрактивность и т.п.) определяется (в отличие от его урожайности [13]) гидротермическими условиями, складывающимися в вегетативный (посев–колошение; рис. 6б) и репродуктивный период (колошение–полная спелость) [14].

МРА может найти применение и в изучении взаимосвязей биохимического состава и технологических качеств культур. Например, его использование позволило получить уравнение множественной нелинейной регрессии, отражающее зависимость содержания сырой клейковины в зерне пшеницы (Y , %) от содержания белка ($X_1 = N_{\text{общ}} \times 5.7$, %) и массы 1000 зерен (X_2 , г): $Y = -41.928 + 0.081X_1^2 + 2.548X_2 - 0.028X_2^2$ (рис. 7). В разработанном уравнении все показатели каче-

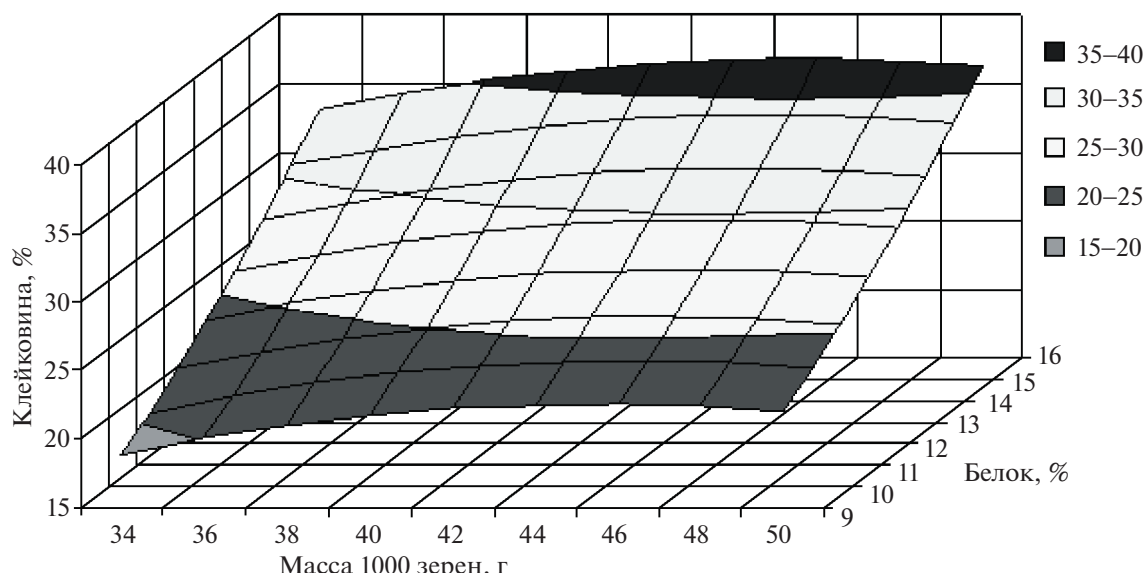


Рис. 7. Зависимость содержания сырой клейковины (Y , %) в зерне пшеницы от содержания белка (X_1 , %) и массы 1000 зерен (X_2 , г).

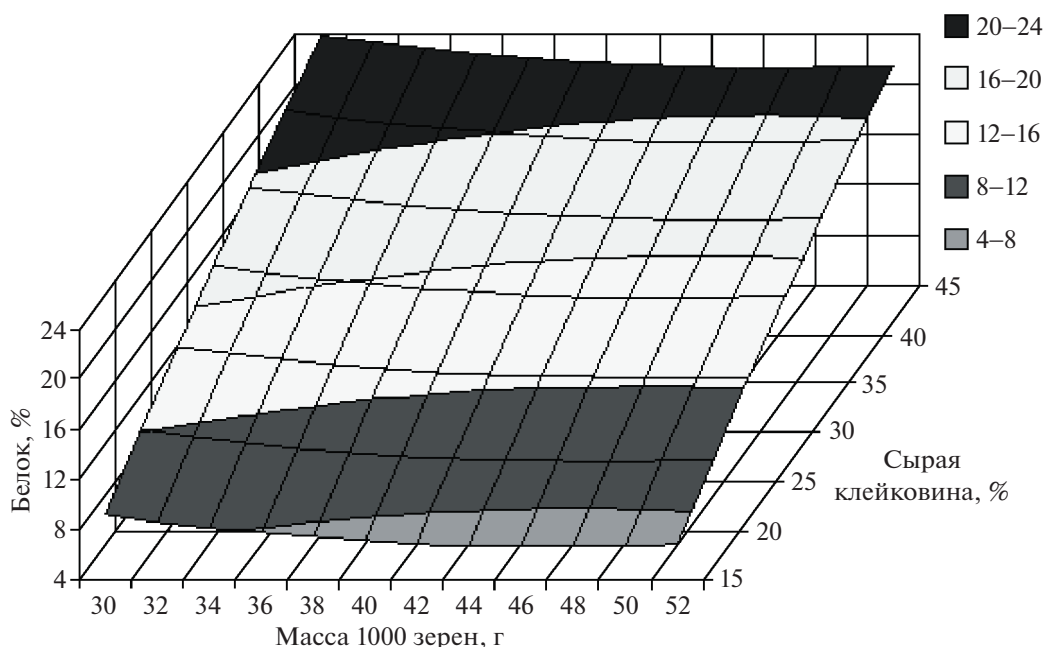


Рис. 8. Зависимость содержания белка (Y , % а.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X_1 , %) и массы 1000 зерен (X_2 , г).

ства приведены на 12%-ную влажность или на воздушно-сухое вещество (в.с.в.) [26]. В последующий период была решена обратная задача и разработано уравнение 2-го порядка, отражающее зависимость содержания белка ($Y = N_{\text{общ}} \times 5.7$, %) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X_1 , %) и массы 1000 зерен (X_2 , г): $Y = 16.0570 + 0.6768X_1 - 0.0032X_1^2 - 0.7891X_2 + 0.0083X_2^2$ (рис. 8).

В разработанном уравнении содержание белка приведено на абсолютно сухое вещество (а.с.в.), а содержание клейковины и масса 1000 зерен – на 12%-ную влажность или на в.с.в. [27]. В дальнейшем был разработан алгоритм и представлены результаты проверки прогностических возможностей разработанных уравнений по независимым данным, т.е. используя экспериментальные дан-

Таблица 5. Алгоритм оценки точности прогноза уравнений

Данные X_1 , X_2 и Y_3 из работы [28], озимая пшеница сорта Московская 39					Данные X_1 , X_2 и Y_3 из работы [29], озимая пшеница 9-ти сортов					
$Y = -41.928 + 0.081X_1^2 + 2.548X_2 - 0.028X_2^2$					$Y = 16.0570 + 0.6768X_1 - 0.0032X_1^2 - 0.7891X_2 + 0.0083X_2^2$					
X_1	X_2	Y_p	Y_3	$(Y_3 - Y_p)$	X_1	X_2	Y_p	Y_3	$(N_3 - N_p)$	ДР
12.0	42.2	27.4	28.0	0.6	29.4	39.8	14.93	14.61	-0.056	0.157
13.6	42.0	30.7	27.8	-2.9*	30.8	41.3	15.43	15.49	0.010	0.162
12.8	43.4	29.2	30.1	0.9	32.1	38.5	16.41	15.90	-0.089	0.168
13.2	43.6	30.1	31.4	1.3	31.8	39.4	16.14	15.77	-0.064	0.166
13.2	44.5	30.1	30.2	0.1	29.2	41.1	14.68	14.46	-0.039	0.155
13.7	45.0	31.2	30.8	-0.4	32.2	38.2	16.50	15.94	-0.098	0.168
13.8	45.5	31.5	31.9	0.4	31.0	39.0	15.81	15.43	-0.067	0.163
13.7	45.3	31.2	30.4	-0.8	31.1	41.0	15.61	15.50	-0.019	0.163
13.9	46.1	31.7	30.7	-1.0	31.0	39.7	15.72	15.29	-0.075	0.162
13.8	46.0	31.5	31.6	0.1	$n = 9$		ЧВ = 0		ОП = 100%	
$n = 10$		ЧВ = 1		ОП = 90%	Примечание. X_1 – содержание сырой клейковины, %; X_2 – масса 1000 зерен, г; Y_p – расчетное содержание белка (расчет по разработанному уравнению регрессии), % а.с.в.; Y_3 – экспериментальное содержание белка ($N_{\text{общ}} \times 5.7$), % а.с.в.; $(N_3 - N_p)$ – отклонения экспериментальных величин содержания общего азота (N_3) в зерне пшеницы от расчетных (N_p), % а.с.в.; ДР – допускаемые расхождения (ГОСТ 10846-91), $\pm$; n – общее число наблюдений; ЧВ – число величин, выходящих за пределы допускаемых расхождений; ОП – оправдываемость (точность) прогноза, %					
Примечание. X_1 – содержание белка в зерне, %; X_2 – масса 1000 зерен, г; Y_p – расчетное содержание сырой клейковины (расчет по уравнению регрессии), %; Y_3 – экспериментальное содержание сырой клейковины, %; $(Y_3 - Y_p)$ – отклонения экспериментальных величин от расчетных, $\pm$; n – общее число наблюдений; -2.9* – отклонения выходят за пределы $\pm 2\%$; ЧВ – число величин, выходящих за пределы $\pm 2\%$; ОП – оправдываемость (точность) прогноза, %										

ные содержания белка, сырой клейковины и массы 1000 зерен, полученные другими авторами в опытах с иными сортами пшеницы и в иных, чем у авторов статьи, временных рамках и почвенно-климатических условиях (табл. 5). При этом оправдываемость прогноза обоих уравнений превысила 80% [26, 27]. Необходимо отметить, что в большинстве ГОСТов нашей страны используется понятие “допускаемое расхождение”, которое показывает максимальную аналитическую ошибку при определении какого-либо показателя (содержание белка, сырой клейковины, масса 1000 зерен, натура и т.п.).

Выше было отмечено существование ограничений по корректному использованию множественного регрессионного анализа. Первое — это проверка полученных экспериментальных или аналитических данных на нормальность распределения [3]. В тех случаях, когда распределение значимо отличается от нормального, рекомендуется использовать непараметрические методы [30–32]. Необходимость использования параметрического и непараметрического критериев обусловлена тем, что они имеют разные предпосылки для своего применения, а это существенно по-

вышает надежность результатов, если они совпадают по обоим критериям. Однако в некоторых случаях и непараметрические критерии могут оказаться неприменимыми, в частности, по причине малого количества опыто-лет [33, 34].

Второе — мультиколлинеарность или статистически значимая зависимость различных независимых переменных ($X_1, X_2, \dots, X_n$) между собой. Сравнительно быстро определить наличие или отсутствие мультиколлинеарности можно, используя матрицу коэффициентов корреляции между независимыми переменными. Для устранения мультиколлинеарности рекомендуется удалить из модели независимые переменные, ее вызывающие. При этом при проведении пошагового регрессионного анализа необходимо очень тщательно подходить к отсеку независимых переменных, обязательно учитывая биологический смысл изучаемых процессов, а в некоторых случаях, и физический смысл полученных оценок [33, 34]. Небольшой опыт применения авторами статьи множественного регрессионного анализа показал, что чаще всего мультиколлинеарность наблюдается в случае узкого биологического интервала варьирования независимых переменных.

Поэтому при планировании полевых, вегетационных и лабораторных экспериментов необходимо стремиться к тому, чтобы получить максимально возможный биологический интервал изучаемых факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные примеры не охватывают даже малой части многообразных и сложных процессов, при описании которых могут быть использованы статистические методы, поэтому по мере количественного увеличения компьютерной техники и разработки программного обеспечения, возможности использования различных статистических моделей в естественных науках будут неуклонно расширяться. Следует лишь опасаться бездумного их использования и превращения науки в виртуальную компьютерную игру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила для авторов. Требования к оформлению статей // *Зерн. хоз-во России*. 2019. № 4 (64). С. 77.
2. *Перегудов В.Н.* Метод наименьших квадратов и его применение в исследованиях. М.: Статистика, 1965. 340 с.
3. *Дрейпер Н.Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ / Пер. с англ. М.: Диалектика, 2007. 711 с.
4. *Перегудов В.Н.* Планирование многофакторных полевых опытов с удобрениями и математическая обработка их результатов. М.: Колос, 1978. 182 с.
5. *Доспехов Б.А.* Методика опытного дела / Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Колос, 1979. 416 с.
6. *Иванова Т.И.* Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. М.: Агропромиздат, 1989. 235 с.
7. *Державин Л.М.* Применение минеральных удобрений в интенсивном земледелии. М.: Колос, 1992. 272 с.
8. *Завалин А.А.* Удобрение сельскохозяйственных культур на осушаемых минеральных почвах. М.: ВИУА, 1995. 138 с.
9. *Петросян А.Г.* Влияние комплексного применения средств химизации на продуктивность озимой пшеницы и некоторые свойства дерново-подзолистой почвы: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: ВИУА, 1989. 24 с.
10. Программа и методика исследований в Географической сети опытов по комплексному применению средств химизации в земледелии. М.: ВИУА, 1990. 187 с.
11. *Цимбалист Н.И.* Взаимодействие и оптимизация применения минеральных удобрений и пестицидов в агробиоценозах Центрального района Нечерноземной зоны России: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М.: ВИУА, 1993. 40 с.
12. *Цимбалист Н.И., Ладонин В.Ф., Алиев А.М., Цветкова Н.А.* Оптимизация сочетания азотных удобрений и пестицидов при возделывании озимой пшеницы // *Агрохимия*. 1996. № 8–9. С. 35–51.
13. *Пасынков А.В., Пасынкова Е.Н.* Урожайность зерна ячменя и ее зависимость от минерального питания и гидротермических условий в период вегетации // *Агрохим. вестн.* 2019. № 2. С. 33–38. <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10024>
14. *Пасынков А.В., Пасынкова Е.Н.* Зависимость показателей качества зерна пивоваренного ячменя от уровня минерального питания и гидротермических условий в период вегетации // *Агрохим. вестн.* 2020. № 3. С. 33–41. <https://doi.org/10.24411/1029-2551-2020-10036>
15. *Пасынков А.В., Андреев В.А., Завалин А.А., Пасынкова Е.Н.* Изменение показателей качества зерна озимой ржи при его фракционировании // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2013. № 9. С. 36–40.
16. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю.* Изучение динамики изменения содержания подвижного железа в дерново-подзолистой легкой почве, мелиорируемой доломитом // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 44–53. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030098>
17. *Небольсин А.Н., Небольсина З.П.* Теоретические основы известкования почв. СПб., 2005. 252 с.
18. *Небольсин А.Н., Небольсина З.П.* Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ЛНИИСХ РАСХН, 2010. 354 с.
19. *Пасынков А.В., Ладонин В.Ф.* Эффективность средств химизации и энергетическая оценка их применения при возделывании озимой ржи // *Агрохимия*. 1996. № 6. С. 63–70.
20. *Пасынков А.В., Светлакова Е.В., Котельникова Н.В.* Влияние длительного применения минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, продуктивность севооборота и качество зерна // *Агрохимия*. 2016. № 10. С. 38–47.
21. *Чеботарев Н.Т., Конкин П.И., Зайнуллин В.Г., Юдин А.А.* Изменение фракционно-группового состава и баланса гумуса под влиянием удобрений на дерново-подзолистой почве Евро-Северо-Востока // *Плодородие*. 2019. № 6. С. 25–28. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.111.07>
22. *Минеев В.Г.* Основные направления исследований влияния погодно-климатических условий на эффективность удобрений // Эффективность удобрений при различных погодных и климатических условиях. Тр. ВИУА. 1985. С. 8–16.
23. *Минеев В.Г., Громыко О.И., Шербакова Н.И.* Изучение связи урожаев яровых культур и эффективности удобрений с погодными условиями // *Погода и эффективность удобрений*. Бюл. ВИУА. 1985. № 75. С. 3–6.
24. *Завалин А.А., Пасынкова Е.Н., Пасынков А.В.* Зависимость урожая зерна яровой пшеницы от гидротермических условий межфазных периодов вегетации // *Плодородие*. 2010. № 4. С. 6–8.
25. *Пасынкова Е.Н.* Зависимость урожая зерна овса от доз азотных удобрений и гидротермических усло-

- вий межфазных периодов вегетации // Пробл. агрохим. и экол. 2010. № 4. С. 13–17.
26. Пасынков А.В., Завалин А.А., Пасынкова Е.Н. Совершенствование способа прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы // Рос. сел.-хоз. наука. 2020. № 2. С. 7–12.
<https://doi.org/10.31857/S2500-2627-2020-2-7-12>
 27. Пасынков А.В., Завалин А.А., Пасынкова Е.Н., Андреев В.Л. Сравнительная оценка различных методов прогноза содержания белка в зерне пшеницы // Рос. сел.-хоз. наука, 2021. № 3. С. 22–27.
<https://doi.org/10.31857/S2500262721030054>
 28. Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Влияние фосфорных и цинковых удобрений в зависимости от известкования дерново-подзолистой почвы на урожай и качество зерна озимой пшеницы // Агрохим. вестн. 2020. № 3. С. 41–44.
<https://doi.org/10.24411/1029-2551-2020-10037>
 29. Колмаков Ю.В., Зелова Л.А., Ковтуненко А.Н., Кашуба Ю.Н. Источники высокого качества зерна озимой пшеницы // Зерн. хоз-во России, 2014. № 3. С. 46–48.
 30. Ивойлов А.В. Анализ данных агрономических исследований методами непараметрической статистики. Саранск: Изд-во Мордов. гос. ун-та им. Н.П. Огарева, 2000. 68 с.
 31. Якушев В.П., Буре В.М. Статистический анализ опытных данных. Непараметрические критерии. СПб., 2001. 61 с.
 32. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: СПбГАУ, 2007. 141 с.
 33. Фрид А.С. Обоснование методических подходов к анализу данных многолетних опытов // Агрохимия, 2013. № 10. С. 75–96.
 34. Фрид А.С. Рекомендации к анализу данных многолетних полевых опытов (проект) // Агрохимия. 2022. № 3. С. 81–93.
<https://doi.org/10.31857/S0002188122030048>
 35. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Прогноз содержания легкоподвижного марганца в дерново-подзолистых почвах при известковании // Бюл. ВИА. 2003. № 117. С. 111–113.

Features of the Use of Regression Analysis in Agrochemical Researches

A. V. Pasynkov^a and E. N. Pasynkova^{a,*}

^aLeningrad Scientific Research Institute of Agriculture “Belogorka” –
Branch of Federal Research Centre of Potato Named after A.G. Lorch
ul. Institutskaya 1, Gatchinsky district, Leningrad region, p. Belogorka 188338, Russia

*E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

Features are considered and practical aspects of the use of regression analysis in agrochemical research are discussed. It is shown that linear regression equations cannot be a correct method of statistical processing of experimental data, since depending on which part of the biological interval of independent variables (at the beginning, in the middle or at the end) data are obtained, the equations can show conflicting results. In most cases, the relationships between various indicators in agrochemical researches reflect non-linear equations as accurately as possible: logarithmic, half degree, second, third order, et all. Multiple regression analysis, taking into account limitations (sampling distribution, multicollinearity) can be used in the study of dependences of yield and quality indicators on doses and ratios of fertilizers, norms of biological and chemical plant protection products, hydrothermal conditions that develop in vegetation period, as well as in the study of the relationship between the biochemical composition and technological qualities of agricultural crops.

Key words: regression analysis, nonlinear equations, yield, fertilizers, plant protection products, hydrothermal conditions, technological qualities.

УДК 63.54:631.811.1:574.4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОТА: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ. СООБЩЕНИЕ 2. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

© 2022 г. В. Н. Башкин^{1,*}, Р. А. Галиулина^{2,**}

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

²Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: bashkin@issp.serpukhov.su

**E-mail: rosa_g@rambler.ru

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 10.06.2022 г.

Биологические приемы повышения эффективности использования азота могут рассматриваться как улучшенные методы ведения сельского хозяйства, которые синхронизируют потребность в азоте сельскохозяйственных культур с доступностью его в почве. Показано, что они являются наиболее достижимыми путями решения данной проблемы. Селекция сельскохозяйственных культур, нацеленная на физиологические процессы в корнях и побегах, вероятно, увеличит поглощение азота и использование его почвенных форм, в то время как селекция, направленная на увеличение эффективности биологической фиксации азота бобовыми культурами, повысит общую эффективность системы. Показано, что разработка новых N-фиксирующих симбиозов в не бобовых культурах может снизить потребность в химических удобрениях в агроэкосистемах, но является гораздо более долгосрочной целью.

Ключевые слова: эффективность использования азота, биологическая азотфиксация, селекция, микробиом, корни, здоровье почвы.

DOI: 10.31857/S0002188122090034

ВВЕДЕНИЕ

Роль биологического азота известна давно, и природа азотфиксации относительно хорошо изучена. Еще в начале XX века Д.Н. Прянишников указывал на значимость этого источника азота и на соотношение минерального и биологического азота в различных системах земледелия [1]. Хотя растения не могут использовать атмосферный N_2 напрямую, уже более столетия известно, что разнообразные бактерии и археи, известные как diazотрофы, могут преобразовывать атмосферный N_2 в NH_3 с помощью биологической фиксации азота (БФА), и что полученный NH_3 может быть использован растениями прямо или косвенно для роста [2–4]. Diazотрофы можно найти в любой почве, в ризосфере растений, физически связанных с корнями растений и другими органами, и даже в растениях, внутри специализированных, фиксирующих N органов, называемых узелками. Скорость БФА свободноживущими diaзотрофами в почве как пра-

вило, низка (между 1 и 20 кг N/га в год [5]), хотя ассоциативная микробная азотфиксация в ризосфере или на поверхности растений может в значительной степени способствовать росту растения в системах с низким поступлением других источников азота [6, 7]. Напротив, БФА в клубеньках является высокоэффективной и в условиях высокой урожайности может превышать 300 кг/га в год [8–10], поскольку обмен питательными веществами между растениями и их внутриклеточными бактериальными эндосимбионтами является целенаправленным [11], что позволяет избежать потерь растительного C и бактериального аммония в почву и связанный с ней микробиом. Однако БФА в клубеньках в основном ограничивается бобовыми и несколькими не бобовыми семействами растений [12], в то время как большинство видов сельскохозяйственных культур, включая злаки, не могут получить доступ к атмосферному N_2 таким образом.

Обостряющаяся глобальная проблема N вызвала новый интерес к БФА как частичному ре-

шению, которое может быть реализовано посредством: разработки и использования бобовых и ризобий (их естественных симбионтов) с повышенным потенциалом БФА; разработки более эффективной ассоциативной фиксации N в не бобовых культурах, особенно в основных злаках; и возможно за счет создания симбиозов клубеньков или даже растений, способных фиксировать N [6, 13, 14]. БФА в зернобобовых культурах остается важным источником азота во многих системах земледелия, что способствует повышению эффективности использования азота (ЭИА), хотя относительный вклад бобовых в сельское хозяйство сократился с увеличением использования азотных удобрений. Отчасти это было связано с производством зерновых в рамках “зеленой революции”, которая заменила традиционные зернобобовые севообороты в таких странах, как Индия, что привело к дефициту зерновых бобовых и даже их импорту из Африки [15].

Таким образом, существуют огромные возможности для увеличения вклада БФА бобовых в сельское хозяйство с помощью системной агрономии и подходов к селекции растений [16, 17], а также путем улучшения эффективности и устойчивости штаммов ризобий, используемых в качестве инокулянтов [18–20].

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ФИКСАЦИЯ N И ИНКОРПОРАЦИЯ БОБОВЫХ КУЛЬТУР

Выращивание бобовых культур повышает урожайность последующих культур, а также снижает потребность в минеральных азотных удобрениях. Во многих сообщениях отмечено повышение урожайности зерновых при выращивании после бобовых, чем после не бобовых или после пара [16, 21, 22]. В частности, установлено, что агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав функционировал в более устойчивом состоянии по сравнению с зерновыми культурами, это достигалось за счет дополнительного использования биологического азота, большей его иммобилизации и меньших потерь элемента [23–25]. Раскрыты особенности использования растениями азота удобрений ^{15}N при инокуляции семян биопрепаратами, показаны источники азота (удобрение, почва, биологический и “экстра” азот) в формировании урожая, выявлено влияние инокулянтов на потоки азота в системе удобрения—почва—растения—атмосфера, формировании устойчивости агросистемы при использовании различных источников питания растений [26]. Биологически активный препарат азоризин не влиял на урожайность покровного ячменя, но

смягчал отрицательное воздействие азота удобрений на азотфиксацию, повышая коэффициент азотфиксации бобовой травосмеси, особенно в 1-й, бобово-злаковой — в 3-й год жизни [27, 28]. Бактериальные препараты и микроэлементные удобрения оказали существенное влияние на формирование фотосинтетической деятельности агроценозов клевера паннонского [29]. При этом внесение биомассы хлореллы повышало уровень азотфиксации, но не снижало урожайность и не ослабляло действие ростстимулирующих биопрепаратов на основе ризобий и цианобактерий [30]. Изучена эффективность применения препаратов корневых diaзотрофов в посевах яровой пшеницы при минимальной обработке почвы [31].

Бобовые часто используют в краткосрочных севооборотах, такие как кукуруза—бобовые, или при многолетнем выращивании кукурузы с бобовыми зимними покровными культурами. Во многих развивающихся регионах мира бобовые широко используют для удовлетворения потребностей в белке. Тем не менее, в последние десятилетия широкая доступность минеральных азотных удобрений и низкие урожаи бобовых по сравнению с зерновыми культурами привели либо к застою, либо к сокращению площадей для выращивания бобовых в разных регионах [32]. Существует ряд экологических (например, температура и избыток осадков) и экономических (например, недостаточная покупательная способность фермеров приобретать семена) ограничений, снижающих урожайность и прибыльность бобовых [30], что может быть причиной сокращения их производства. В недавних обзорах [31, 33] утверждается, что, хотя был достигнут значительный прогресс в развитии агрономии зернобобовых, понимании взаимоотношения между бобовыми растениями и популяциями ризобий, а также выгоды БФА для фермерского хозяйства, тем не менее, пространственная и временная интеграция бобовых в этих системах все еще недостаточно развита, существуют значительные пробелы в знаниях и системах практических рекомендаций. Преодоление этих трудностей позволит еще больше повысить вклад бобовых культур в системах земледелия, в частности, в Африке к югу от Сахары [33]. Авторы рекомендуют интегрировать БФА в программы селекции и улучшить общую агрономию, чтобы максимизировать потенциал симбиоза за счет устранения различных почвенных и других экологических ограничений.

Бобовые также являются привлекательным вариантом для систем смешанных культур. Но, несмотря на преимущества этих агросистем, имеющих большую эффективность использования ре-

сурсов, включая ЭИА, смешанные культуры все еще остаются “на окраинах современного интенсивного сельского хозяйства” [34]. Согласно недавним оценкам, глобальное увеличение ЭИА при использовании таких агросистем (зерновые и бобовые) снижает потребности в минеральных азотных удобрениях примерно на 26% [35]. Однако для этих агросистем нужно решать вопросы механизации посева культур, борьбы с сорняками и сбора урожая.

РАЗРАБОТКА ПРИЕМОВ УВЕЛИЧЕНИЯ БФА: МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ И ГЕННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В настоящее время наблюдается рост интереса к разработке эффективной ассоциативной фиксации N для зерновых культур, особенно кукурузы, риса и пшеницы [36–38], а также для многолетних кормовых и биоэнергетических трав [39, 40]. Эти разработки варьируются от простого выделения, тестирования и внедрения наиболее эффективных природных диазотрофов, связанных с растениями, целевых видов растений, основанных в первую очередь на стимулировании роста растений [41], до попыток отредактировать геномы таких бактерий, чтобы удалить генетический контроль, который предотвращает фиксацию N и высвобождение NH_3 в сельскохозяйственных почвах, содержащих потенциально высокие запасы минерального и органического азота [42, 43]. Десятилетия генетических, геномных и биохимических исследований и разработок технологий обеспечивают основу для возможного редактирования или генной инженерии диазотрофов для оптимальной ассоциации с не бобовыми видами [43]. Однако инструментально трудно оценить небольшие объемы БФА в полевых условиях, и не исключено, что заявления о значительной фиксации азота злаковыми культурами является результатом неправильно применения методов измерения [44].

Необходимы дальнейшие исследования для понимания и минимизации результирующих процессов между фиксацией N и улетучиванием NH_3 , и как это связано с ростом диазотрофов. После этого возможно представление, что нужно сделать для понимания, управления и оптимизации симбиотических взаимодействий, а также и обмена питательными веществами между диазотрофами и растениями. Это может дать ключ для понимания взаимодействия между диазотрофами и микробиомом в целом.

Например, арбускулярные микоризные грибы могут способствовать переносу NH_3 между диазотрофами и растением [45–49]. Параллели между

азотфиксирующими симбиозами бобовых и симбиозами арбускулярной микоризы (АМ), которые имеются у большинства видов растений, включая общие сигнальные системы/гены, участвующие в создании различных полезных симбиозов, подстегнули усилия генных инженеров для создания микориз и БФА в форме симбиоза растений, включая основные зерновые культуры [50, 51]. В настоящее время усилия сосредоточены на привлечении сигнальных компонентов арбускулярных микоризных грибов злаков для распознавания ризобийных сигналов и преобразования этих сигналов в измененную экспрессию генов, способствующую делению клеток растений и образованию клубеньков, что может позволить бактериям проникать в ткани растений [52]. Эти процессы сложны, и известно, что для создания и поддержания эффективной БФА в бобовых культурах требуется более 200 генов [53]. Однако последние данные свидетельствуют о том, что эволюции одного или нескольких генов было достаточно, чтобы предки современных бобовых перешли к эффективной БФА [54], поэтому есть надежда, что одни и те же ключевые гены могут заложить основу для разработки эффективной БФА в злаках [50, 51]. Дальнейшие инвестиции в это направление стратегических и прикладных исследований, по крайней мере, позволят проверить нынешнее понимание разработки и поддержания процессов БФА, в то время как дальнейшие фундаментальные исследования в области генетики, клеточной биологии и биохимии БФА бобовых будут способствовать расширению знаний и продолжат интенсифицировать усилия по разработке БФА в не бобовых культурах.

Наиболее смелым подходом к решению двусторонней проблемы N является непосредственная его фиксация в растениях путем переноса генов, ответственных за БФА, в геномы растений и экспрессии активных ферментов нитрогеназы в соответствующем растительном компартменте [55, 56]. Существует множество особенностей нитрогеназы, которые делают этот процесс весьма затруднительным, включая координацию экспрессии многочисленных генов, участвующих в сборке уникальных металлических кофакторов, а также чрезвычайную чувствительность к кислороду и высокую потребность в энергии для активации ферментного комплекса [55–57]. Приведенные особенности могут объяснить, почему этот процесс никогда не был кооптирован микробами во время эволюции растений. Тем не менее, в достижении данной цели уже отмечен определенный прогресс [55, 57–60], и такие исследования будут расширять понимание БФА.

Управление микробами, ответственными за круговорот азота в почве, может стать плодотворной целью для будущих исследований. Только сейчас начинается изучение функциональной значимости множества растительно-микробных ассоциаций, которые формируют микробиом растения, и новые доказательства того, что растения могут стимулировать в ризосфере микробы, ответственные за окисление углерода в почве [61]. Предполагают, что могут быть также выведены и/или разработаны биоинженерными способами растения, в ризосфере которых будет развиваться микробиом для мобилизации азота из почвенного органического вещества. Или как вариант, микробиом может быть целевым образом сформирован таким образом, чтобы включать микробы, способные минерализовать органический азот почвы, когда это вызвано потребностью растений в азоте. Кроме того, могут быть созданы удобрения с медленным высвобождением N или даже покровные культуры с повышенной способностью высвобождать органический N при запуске самих растений.

Учитывая современное состояние знаний и технологий, наибольшим препятствием для решения основных проблем сельского хозяйства посредством азотфиксации может оказаться возможность общественного понимания и признания таких технологических решений, а не способность ученых их предлагать. На данном этапе, однако, описанные технологии все еще остаются в категории с высоким риском и высокой прибылью.

СЕЛЕКЦИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭИА

Сравнение между сортами сельскохозяйственных культур, представляющими исторические и современные материалы, часто показывают сопутствующее увеличение массы урожая, но не величины выноса N [62]. Это указывает на то, что увеличение ЭИА на основе урожайности зерна — не то же самое, что увеличение этой величины на основе выноса азота. Однако отбор, основанный на урожайности, может иметь проблемы с эффективным преодолением возможных препятствий для улучшения селекции на основе признаков [63]. Следовательно, селекция идеотипов [64], сосредоточенная на выявлении и отборе признаков, влияющих на ЭИА, может стать возможностью для выявления важности процессов, а не на рассмотрении их как черного ящика, как это делается при отборе на основе урожайности. Эта возможность особенно привлекательна сейчас, потому что развитие геномики и дешевого секвенирования ДНК, функциональной феноменологии и высокопроизводи-

тельного фенотипирования позволяет одновременно идентифицировать фенотипические вариации, генетическое картирование и идентификацию маркеров, а также понимание основных физиологических процессов [65, 66].

Естественную изменчивость для величин ЭИА наблюдали среди и внутри многих видов сельскохозяйственных культур, включая кукурузу, рис, пшеницу и соевые бобы. Эта вариация подразумевает, что программы выведения могут быть способны отбирать те признаки, что отвечают за увеличение эффективности использования азота, хотя такие признаки могут быть многочисленными, и все они находятся под сложным генетическим контролем. Для соответствия селекции сельскохозяйственных культур в работе [67] предложили использовать оценку эффективности поглощения N (nitrogen uptake efficiency, NU_pE), как долю азота, поглощенного созревшей биомассой растения, к его внесенному количеству, а также оценку величины массы зерна на единицу поглощенного азота (nitrogen utilization efficiency NU_eE). Признаки, что определяют величины ЭИА растениями, ранжируются от поглощения N, ассимиляции, процессов разделения и временного хранения до ремобилизации и утилизации азота в органах источника и поглотителя [68–70].

Можно предложить синергетические селекционные исследования для улучшения основных признаков в функциональной иерархии ЭИА. Величина NU_pE может быть разделена на корневые и побеговые процессы, в то время как величины NU_eE должны быть связаны с процессами в стеблях и с процессами, регулирующими формирование зерна. Хотя эти меры эффективности использования азота особенно актуальны для зерновых культур, другие могут быть более актуальными для кормовых культур, где можно ожидать высоких величин ЭИА из-за большей синхронизации роста урожая и доступности N.

Корни растений отвечают за поглощение азота из почвы. Эффективность поглощения корневой системы была определена в терминах количества N, полученного на единицу поглощения углерода в корневую систему [71]. Архитектура корневой системы определяет пространственное расположение корней даже при заданном поглощении углерода. Архитектурные особенности, которые увеличивают поглощение из верхнего слоя почвы, могут быть полезными в начале вегетационного сезона, когда применяют N, в то время как предполагается, что глубокое укоренение полезно для улавливания N до его вымывания [62]. Повышение эффективности поглощения может быть за счет оценки функций корня, которые снижают метаболическую на-

грузку на отдельные сегменты корня или на всю корневую систему [65, 72].

Например, распределение между классами корней может быть оптимизировано за счет увеличения количества боковых корней, которые тоньше и требуют меньше затрат на их формирование, чем осевые корни. Исследования кукурузы показали, что увеличение бокового по отношению к осевому укоренения может улучшить усвоение азота и рост побегов в почвах с его дефицитом [73, 74]. Помимо затрат на формирование, необходимо также учитывать затраты на жизнедеятельность, такие как дыхание. Анатомические особенности, включая увеличенную аэренхиму или уменьшенную площадь кортикальных клеток, уменьшают дыхание и, как было показано, улучшают усвоение N, а в некоторых случаях обеспечивают ремобилизацию N из стареющей корневой ткани [75, 76]. В последнее время N-чувствительные различия в прорастании, дыхании и созревании растений риса были связаны с величинами ЭИА [77]. Удельная скорость поглощения может быть определена как мгновенная потенциальная скорость поглощения N отдельным корневым сегментом, но редко рассматривалась как селекционный признак корня [78]. Однако различия между сортами кукурузы [79] и классами корней кукурузы [80] по показателям поглощения нитратов указывают на то, что может существовать генетическая основа, которую можно использовать для селекции растений. Недавние разработки в области высокопроизводительного фенотипирования множественного поглощения питательных веществ корнями кукурузы подчеркивают эту возможность [81]. Молекулярные биологи выявили множество генов, участвующих в архитектуре корневой системы или транспорте различных типов соединений N, и нацелили некоторые из них на генетические манипуляции для улучшения NU_pE , хотя и с переменным успехом [65, 68]. Существует множество подходов для повышения эффективности поглощения корневой системой, которые могут быть включены в программы предварительной селекции при скрининге на генетическую изменчивость.

Итак, если N поглощается растением, физиологические процессы в исходных органах, которые ассимилируют азот и углерод, а также в органах, что аккумулируют и запасают ассимиляты, будет определять функция, насколько хорошо растение можно развиваться и поглощать дополнительный азот. Фотосинтез отвечает за поглощение углерода из воздуха и уже разработано, хотя бы на уровне рабочих гипотез, как можно уменьшить потребности этого процесса в азоте.

В частности, архитектура побегов определяет общее расположение листьев, что оказывает существенное влияние на эффективность поглощения света [82]. На поверхности листа эффективность использования фотосинтетического азота может быть связана с размером хлоропласта [83] и энергией ранних проростков [84]. Недавняя работа продемонстрировала важность снижения фотодыхания [85] и ускорения индукции фотосинтеза после изменения освещенности [86] для повышения общей эффективности фотосинтеза. Этапы, связанные с усвоением N, включая восстановление нитратов до нитрита, затем до аммония с его усвоением в аминокислоты, могут быть направлены на увеличение показателя NU_lE . Учитывая зависимость метаболизма растений от ферментов, состоящих из N-содержащих аминокислот, можно было бы провести существенную работу по общей физиологической эффективности N-анаболизма и катаболизма. Однако было высказано предположение, что такие стратегии могут быть успешными только в том случае, если процессы метаболизма и переноса азота, включая количественное фракционирование при переходе от источника к поглотителю, координируются или модифицируются, чтобы избежать ингибирования конечного продукта или ограничения субстрата [87].

В течение многих лет селекционеры фокусировались на повышении индекса урожая сельскохозяйственных культур (HI), который отражает отношение собранного зерна к общему сухому веществу [88]. Однако увеличение HI на массовой основе может не обязательно увеличивать NU_lE (т.е. выход N зерна относительно общего содержания N), на что указывает соотношение между массой зерна и концентрацией азота [89]. Величина HI также может достигать теоретического максимума, потому что остальная часть растения, включая листья, необходима для поддержки производства зерна [90]. Однако было показано, что изменение ремобилизации и транслокации N из органов вегетативных побегов в зерно влияет на NU_lE [68, 91, 92]. Замедленное старение листьев может быть важным для продления наполнения зерна, а также поглощения азота из почвы, но это также может препятствовать транслокации ремобилизованного азота из листьев в семена [93]. Необходимы дополнительные исследования о сроках и взаимосвязи этих различных особенностей и о том, как они могут быть совместно оптимизированы для увеличения показателя NU_lE .

Взаимодействия между растениями и микробами, влияющие на биологическую фиксацию

азота, минерализацию азота в почве и нитрификацию, также могут быть целями селекции растений. В наибольшей степени бобовые культуры образуют клубеньки с симбиотическими бактериями-ризобиями, которые фиксируют N, чтобы делиться с растением в обмен на C-соединения. Более эффективная фиксация (т.е. больше N фиксируется на поставляемый C) может существенно улучшить общую величину ЭИА. Бобовые обладают способностью “авторегулировать” образование клубеньков и БФА, уменьшая их при наличии большого количества азота в почве, что предотвращает излишнюю фиксацию. Выбор или селекция сортов бобовых, которые продолжают фиксировать N, несмотря на его присутствие в почве, потенциально может привести к усиленному высвобождению биологически закрепленного N в сельскохозяйственные почвы, тем самым увеличивая доступные запасы N в почве для последующих культур [94]. Взаимодействие между растениями и микробами, которое определяет фиксацию N, мобилизацию органического азота, его вымывание и газообразные потери в атмосферу, является еще одной возможностью улучшить азотное питание растений. Такие знания о взаимодействии генотипа культуры и микробов приобретают все большее значение в селекции растений, например, там, где полезные бактериальные сообщества связаны с определенным генотипом культуры и азотными процессами [95]. Следовательно, целесообразно выбирать растения, способствующие ассоциативной фиксации N в ризосфере. Другой привлекательной, хотя пока и неосуществимой альтернативой, является выделение ингибиторов нитрификации культур непосредственно из корней [96, 97].

За последние 70 лет селекция сельскохозяйственных культур в основном была направлена на выращивание растений при высоком содержании азота, что может привести к ограниченному увеличению ЭИА. В некоторых случаях ЭИА современных генотипов выше как на почвах с высоким, так и низким содержанием N [98]. Однако множество признаков влияют на величины ЭИА, что, скорее всего, приведет к значительным различиям в величинах ЭИА между генотипами. Можно рассматривать программы селекции, которые отбирают генотипы при неоптимальном обеспечении N как способ увеличения ЭИА в этих условиях и существенного снижения потерь N в окружающую среду [99]. Генетические достижения могут быть ускорены при селекции с помощью маркеров, геномной селекции и технологий редактирования генов [65, 69].

Также необходимо будет внедрить новые технологии фенотипирования, чтобы увеличить количество оцениваемых линий и повысить точность измерений для максимального давления отбора. Перспективным методом в контексте N было бы использование беспилотных летательных аппаратов (квадрокоптеров, БЛА), которые могут оценивать биомассу, высоту, содержание хлорофилла и урожайность в течение всего сезона вегетации. Использование высокопроизводительного фенотипирования с помощью БЛА для отбора как по статусу, так и по массе растений в значительно расширенных популяциях, размножаемых с низкими затратами, имеет существенные перспективы для быстрого получения прибыли.

Границы селекции растений для ЭИА будут включать многолетние севообороты, смешанные культуры и многолетние виды растений. Многолетнее выращивание зерновых культур с промежуточными подсевами пырея (известная как *Kernza*[®]), как было показано, существенно снижает выщелачивание N по сравнению с кукурузой [100], потому что корни уже развиты, когда при прогреве почвы весной начинается минерализация N.

Интрогрессия признаков дикой многолетности может быть возможна за счет создания межвидовых гибридов, таких как сорго [101]. Посев летних однолетних растений, например, кукурузы, в многолетние покровы может иметь аналогичные эффекты, но при этом агрономическое управление затруднено. Синхронизация спроса на урожай с наличием азота в почве (обсуждали выше) может быть частично достигнута за счет фенологии растений, такой как сохранение зелени, а также увеличения энергии раннего роста даже в жарких или холодных условиях посева (посадки). Следовательно, достижения в селекции многолетних культур или поликультур однолетних культур в многолетних системах могут оказать существенное влияние на эффективность систем земледелия.

ИНТЕГРАЦИЯ ЗНАНИЙ С МОДЕЛЯМИ ВЫРАЩИВАНИЯ КУЛЬТУР

Вычислительные платформы следующего поколения могут изучать сложные взаимодействия N в системах сельскохозяйственных культур для информирования руководства, определения приоритетов исследований и улучшения понимания сложностей. Эти вычислительные структуры включают статистические модели, модели механистического моделирования на основе процессов и их гибриды [102, 103]. Такие инструменты

поддержки принятия решений исследуют все аспекты N в интерфейсе почва—культура — от экспрессии генов, физиологии сельскохозяйственных культур и фенологии до процессов в почве и прогнозирования поведения. Например, в рамках такого моделирования (модели APSIM, DSSAT и пр.) рассматривают критическую концентрацию азота для роста сельскохозяйственных культур в контексте генетических, экологических и управленческих факторов ($G \times E \times M$), которые контролируют взаимодействие между доступностью азота в почве, фенологией сельскохозяйственных культур, распределением азота и урожайностью [104], включая БФА [105]. Модели систем земледелия представляют собой интегрированные сборки моделей отдельных компонентов, которые учитывают конкретные биофизические компоненты (например, водный баланс, рост сельскохозяйственных культур и минерализацию органического вещества почвы). Они могут использоваться для разработки гипотез, их проверки и создания инструментов поддержки принятия решений, ориентированных на управление, которые повышают производительность, прибыльность и качество окружающей среды. Хотя статистические модели относительно просты в использовании и хорошо подходят для инструментов поддержки принятия решений, в отличие от моделей, основанных на процессах, они не могут экстраполироваться за пределы контекста ($G \times E \times M$), в котором они были разработаны. Следовательно, они не могут предсказать изменение величин ЭИА в зависимости от незапрограммированных комбинаций ($G \times E \times M$). Тем не менее, их потенциал может быть существенным по двум причинам. Во-первых, одних экспериментов недостаточно для решения многих потенциальных комбинаций ($G \times E \times M$), возникающих в результате взаимодействия решений фермеров и погоды. В данном поле и в данном году результаты систем земледелия являются результатом миллиардов потенциальных комбинаций сотен переменных. Некоторые из них выбираются фермером (например, сорт, дата посадки, использование почвы и удобрений), в то время как другие зависят от погодных условий и климата. Во-вторых, в теории могут быть рассмотрены новые стратегии управления системами удобрения и посевов для повышения эффективности полевых экспериментов и определения приоритетов исследований на основе анализа чувствительности, который выявляет сценарии с серьезными последствиями. Одновременно полевые эксперименты позволяют выявить и восполнить пробелы в знаниях моделей.

ЗНАЧИМЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исторически сложилось так, что величины ЭИА в сельскохозяйственных системах трансформировались от высоких показателей в системах с низким уровнем затрат и низкой производительностью через низкие показатели в системах с высоким уровнем затрат и высокой производительностью до умеренных показателей в системах с умеренным уровнем затрат и высокой производительностью [106].

Фактически, некоторые существующие системы с низким уровнем затрат и низкой производительностью, например, в Бенине, демонстрируют ЭИА > 1 , что означает чистое использование почвенного азота и снижение плодородия почвы [107]. Хотя во многих странах наблюдается резкое снижение величин ЭИА в сельском хозяйстве по мере внедрения и чрезмерного использования N-удобрений (например, ЭИА в Китае упал < 0.3), считается, что это не является неизбежным, и что страны, испытывающие тенденцию к снижению рассматриваемых величин, могли бы поучиться у тех, кто смог “согнуть” свои кривые изменения показателей ЭИА в сторону более высоких (> 0.6 в США и Франции) благодаря государственной политике, образованию, тщательному управлению и т.п. [106].

Как показывает историческая траектория, простого увеличения ЭИА само по себе будет недостаточно, если это приведет к системам с низким уровнем производства и отсутствию продовольственной безопасности среди растущего населения мира. Таким образом, мы сталкиваемся со сложной, многоцелевой проблемой, которая еще более усложняется динамичными экономическими и экологическими факторами. Рентабельность может быть относительно нечувствительной к дозам N-удобрений. Например, на Среднем Западе США при выращивании кукурузы бюджеты расходов, показывающие рентабельность инвестиций в азотные удобрения (например, соотношение стоимости азотных удобрений и рентабельности зерна) показывают, что экономически оптимальные дозы азота изменятся на целых 50 кг N/га, основываясь только на реальных различиях соотношения “азотные удобрения : цены на зерно” (например, 0.05–0.20) [108]. Доза 50 кг N/га составляет $\approx 30\%$ от средней экономической оптимальной дозы N для этих систем. Следовательно, при наличии экономических стимулов для оптимизации дозы внесения азота сильно зависят от рынков зерна и удобрений.

В совокупности эти проблемы требуют надежного междисциплинарного подхода к повышению ЭИА с использованием многоцелевой опти-



Рис. 1. Схема возможностей увеличения сельскохозяйственной эффективности использования азота за счет исследований и разработок технологий в различных областях.

мизации, учитывающей социальные и биофизические науки. Многоцелевая оптимизация — это вычислительная структура, которая ищет оптимальные решения и учитывает компромиссы между потенциально конфликтующими целями, такими как минимизация данных по поступлению N при максимизации данных по выходу с урожаем. Такие компромиссы улавливаются моделированием сельскохозяйственных систем, которые являются мощными интеграторами для использования методов многоцелевой оптимизации. В то время как моделирование может быть использовано только для максимизации коэффициента ЭИА, вместо этого можно максимизировать доходность и экономичность и одновременно минимизировать потери N. Многоцелевые методы использовали для оптимизации параметров моделирования системы выращивания кукурузы в соответствии с эмпирическими результатами [109], но также они могут быть применены для оптимизации целей, направленных на показатели ЭИА. В региональном масштабе эти методы оптимизации использовали для распределения богарных и орошаемых площадей с целью максимального повышения урожайности и минимизации воздействия на окружающую среду [110], поэтому аналогичные концепции можно было бы использовать для максимизации ЭИА в разных регионах или по всему миру. Компромиссы в целях также были выявлены в селекции сельскохозяйственных культур, например, между общим

урожаем зерна и концентрацией N в зерне, но недавняя работа с геномной селекцией по нескольким признакам открывает значимые перспективы [111]. Поэтому можно предложить, что четкое рассмотрение множества целей в рамках оптимизации будет иметь решающее значение для будущего прогресса в увеличении ЭИА при одновременном достижении продовольственной безопасности и оптимизации экономических показателей [112].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, улучшенные варианты управления для сельскохозяйственных производителей помогут быстрее изменить кривую величин эффективности использования азота (ЭИА) по направлению к более высоким ее показателям, имея целью ответственное использование N в сельском хозяйстве. Показаны возможности увеличения сельскохозяйственной ЭИА за счет исследований и разработок в нескольких областях: агрономии, селекции растений, биологической фиксации азота и круговорота азота в почве. Исследования и разработки с максимальной отдачей, скорее всего, будут связаны с достижениями во всех этих областях, хотя можно ожидать, что в краткосрочном плане (в течение 5–10 лет) оптимальные результаты будут достигнуты в агрономии, с применением инструментов поддержки принятия решений и более широкого использования существующих сор-

тов бобовых; в среднесрочной перспективе (10–20 лет) за ними последуют улучшенные сорта зерновых и других культур, отобранные специально для высоких показателей ЭИА и более эффективных микробов; и в долгосрочной перспективе (>20 лет) с помощью совершенно новых N-фиксирующих симбиозов в растениях или растений, сконструированных для фиксации N без бактериальных партнеров (рис. 1).

Конечно, риски, связанные с некоторыми из описанных выше долгосрочных возможностей в области НИОКР, относительно высоки, как и потенциальная отдача. Эта исследовательская дорожная карта для улучшения ЭИА вместе с матрицей “риск–вознаграждение” будут полезны директивным органам при принятии решения о том, как решать эти насущные глобальные проблемы для устранения барьеров на пути ответственного использования азота в сельском хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прянишников Д.Н. Агрохимия. М.: Сельхозиздат, 1940, 664 с.
2. Мишустин Е.Н., Емцев В.Т. Почвенные азотфиксирующие бактерии рода *Clostridium*. М.: Наука, 1974. 251 с.
3. Мишустин Е.Н., Кудяров В.Н., Башкин В.Н. Круговорот азота на территории СССР // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1983. № 2. С. 165–178.
4. Bottomley P.J., Myrold D.D. Biological N inputs. Boston: Academic Press, 2015. 453 p.
5. Vadakattu G., Paterson J. Free-living bacteria lift soil nitrogen supply // Farm. Ahead. 2006. V. 169. P. 40.
6. Ladha J.K., Reddy P.M. Nitrogen fixation in rice systems: state of knowledge and future prospects // Plant Soil. 2003. V. 252. P. 151–167. <https://doi.org/10.1023/A:1024175307238>
7. Martins D.S., Reis V.M., Schultz N., Alves B.J.R., Urquiaga S., Pereira W. Both the contribution of soil nitrogen and of biological N₂ fixation to sugarcane can increase with the inoculation of diazotrophic bacteria // Plant Soil. 2020. V. 35. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04621-1>
8. Giller K.E., Chalk P., Dobermann A., Hammond L., Heffer P., Ladha J.K. Emerging technologies to increase the efficiency of use of fertilizer nitrogen // Agriculture and the Nitrogen Cycle / Eds/ A.R. Mosier, J.K. Syers, and J.R. Freney. Washington, DC: Island Press, 2004. P. 35–51.
9. Peoples M.B., Brockwell J., Herridge D.F., Rochester I.J., Alves B.J.R., Urquiaga S. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems // Symbiosis. 2009. V. 48. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/BF03179980>
10. Cafaro La Menza N., Monzon J.P., Lindquist J.L., Arkebauer T.J., Knops J.M., Unkovich M. Insufficient nitrogen supply from symbiotic fixation reduces seasonal crop growth and nitrogen mobilization to seed in highly productive soybean crops // Plant Cell Environ. 2020. V. 43. P. 1958–1972. <https://doi.org/10.1111/pce.13804>
11. Udvardi M., Poole P.S. Transport and metabolism in legume-rhizobia symbioses // Annu. Rev. Plant Biol. 2013. V. 64. P. 781–805. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120235>
12. Santi C., Bogusz D., Franche C. Biological nitrogen fixation in non-legume plants // Ann. Bot. 2013. V. 111. P. 743–767. <https://doi.org/10.1093/aob/mct048>
13. Beatty P.H., Good A.G. Future prospects for cereals that fix nitrogen // Science/ 2011. V. 333. P. 416–417. <https://doi.org/10.1126/science.1209467>
14. Rogers C., Oldroyd G.E.D. Synthetic biology approaches to engineering the nitrogen symbiosis in cereals // J. Exp. Bot. 2014. V. 65. P. 1939–1946. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru098>
15. Raghuram N. Zeroing in on farm budgets or zero budget natural farming? A perspective from India // Perspectives 37. Nairobi: UN Environment Programme, 2020.
16. Franke A.C., van den Brand G.J., Vanlauwe B., Giller K.E. Sustainable intensification through rotations with grain legumes in sub-Saharan Africa: A review // Agric. Ecosyst. Environ. 2018. V. 261. P. 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.029>
17. Liu J., Yu X., Qin Q., Dinkins R.D., Zhu H. The impacts of domestication and breeding on nitrogen fixation symbiosis in legumes // Front. Genet. 2020. V. 11. P. 973. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00973>
18. Meghvasi M.K., Prasad K., Mahna S.K. Symbiotic potential, competitiveness and compatibility of indigenous *Bradyrhizobium japonicum* isolates to three soybean genotypes of two distinct agro-climatic regions of Rajasthan, India // Saudi J. Biol. Sci. 2010. V. 17. P. 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2010.06.002>
19. Koskey G., Mburu S.W., Njeru E.M., Kimiti J.M., Ombori O., Maingi J.M. Potential of native rhizobia in enhancing nitrogen fixation and yields of climbing beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in contrasting environments of Eastern Kenya // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. P. 443. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00443>
20. Santos M.S., Nogueira M.A., Hungria M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture // AMB Express. 2019. V. 9. P. 205. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>
21. Giller K.E. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. Wallingford: CABI Publishing, 2001. 245 p.
22. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. М.: РАН, 2019. 252 с.
23. Алферов А.А., Чернова Л.С. Потоки азота и изменение режима функционирования агроэкосистемы в посевах яровой пшеницы // Плодородие. 2021. № 6. С. 69–71. <https://doi.org/10.25680/s19948603.2021.123.19>
24. Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Соколов О.А. Потоки ¹⁵N, почвенного и симбиотического азота в дерново-подзолистой эродированной почве // Агрохи-

- мия. 2020. № 6. С. 22–32.
<https://doi.org/10.31857/s0002188120060149>
25. Алферов А.А., Завалин А.А., Кожемяков А.П. Влияние удобрения и ризоагрина на урожайность и качество зерна яровой пшеницы, потоки азота в системе удобрение–почва–растение // Достиж. науки и техн. АПК. 2019. Т. 33. № 9. С. 10–15.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10902>
 26. Завалин А.А., Алферов А.А., Чернова Л.С. Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2019. № 8. С. 83–96.
<https://doi.org/10.1134/s0002188119080143>
 27. Конончук В.В., Штырхунов В.Д., Благовещенский Г.В., Тимошенко С.М., Назарова Т.О., Соболев С.В. Влияние удобрений и микробного препарата на урожайность современных многолетних мультитравосмесей и их способность к усвоению атмосферного азота в центральном Нечерноземье // Агрохимия. 2019. № 7. С. 35–44.
<https://doi.org/10.1134/s0002188119070068>
 28. Новиков М.Н. Биологические приемы эффективного использования азота почвы, удобрений, симбиотической азотфиксации в полевых агроценозах // Агрохимия. 2020. № 8. С. 60–69.
<https://doi.org/10.31857/s0002188120080086>
 29. Кишикаткина А.Н., Аленин П.Г., Галиуллин А.А., Кишикаткин С.А. Биологическая азотфиксация клевера паннонского (*Trifolium pannonicum* Jacq.) в условиях среднего Поволжья // Изв. Самар. НЦ РАН. 2018. Т. 20. № 5 (2). С. 226–232.
 30. Кублановская А.А., Ханчаева С.А., Зотов В.С., Зайцев П.А., Лобакова Е.С., Соловченко А.Е. Влияние суспензии клеток микроводоросли *Chlorella vulgaris* iррas c-1 (Chlorophyceae) на биологическую активность и микробиом почвы при возделывании фасоли // Вестн. МГУ. Сер. 16. Биол. 2019. Т. 74. № 4. С. 284–293.
 31. Курсакова В.С. Эффективность применения препаратов корневых diaзотрофов в посевах яровой пшеницы при минимальной обработке почвы // Вестн. Алтай. ГАУ, 2018. № 10 (168). С. 5–12.
 32. FAO. World fertilizer trends and outlook to 2022. Rome, 2019.
 33. Vanlauwe B., Hungria M., Kanampiu F., Giller K.E. The role of legumes in the sustainable intensification of African smallholder agriculture: lessons learnt and challenges for the future // Agric. Ecosyst. Environ. 2019. V. 284. P. 106583.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106583>
 34. Brooker R.W., Bennett A.E., Cong W.F., Daniell T.J., George T.S., Hallett P.D. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology // New Phytol. 2015. V. 206. P. 107–117.
<https://doi.org/10.1111/nph.13132>
 35. Jensen E.S., Carlsson G., Hauggaard-Nielsen H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: a global-scale analysis // Agron. Sustain. Dev. 2020. V. 40. P. 5.
<https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>
 36. Mus F., Crook M.B., Garcia K., Costas A.G., Geddes B.A., Kouri E.D. Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to nonlegumes // Appl. Environ. Microbiol. 2016. V. 82. P. 3698–3710.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01055-16>
 37. Bloch S.E., Ryu M.H., Ozaydin B., Broglie R. Harnessing atmospheric nitrogen for cereal crop production // Curr. Opin. Biotechnol. 2020. V. 62. P. 181–188.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.09.024>
 38. Mahmud K., Makaju S., Ibrahim R., Missaoui A. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research // Plants. 2020. V. 9. P. 97.
<https://doi.org/10.3390/plants9010097>
 39. Roley S.S., Xue C., Hamilton S.K., Tiedje J.M., Robertson G.P. Isotopic evidence for episodic nitrogen fixation in switchgrass (*Panicum virgatum* L.) // Soil Biol. Biochem. 2019. V. 129. P. 90–98.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.006>
 40. Bahulikar R.A., Chaluvadi S.R., Torres-Jerez I., Mosali J., Bennetzen J.L., Udvardi M. Nitrogen fertilization reduces nitrogen fixation activity of diverse diazotrophs in switchgrass roots // Phytobio. J. 2020. V. 5.
<https://doi.org/10.1094/PBIOMES-09-19-0050-FI>
 41. Fox A.R., Soto G., Valverde C., Russo D., Lagares Jr A., Zorreguieta Á. Major cereal crops benefit from biological nitrogen fixation when inoculated with the nitrogen-fixing bacterium *Pseudomonas protegens* Pf-5 X940 // Environ. Microbiol. 2016. V. 18. P. 3522–3534.
<https://doi.org/10.1111/1462-2920.13376>
 42. Barney B.M., Plunkett M.H., Natarajan V., Mus F., Knutson C.M., Peters J.W. Transcriptional analysis of an ammonium-excreting strain of *Azotobacter vinelandii* deregulated for nitrogen fixation // Appl. Environ. Microbiol. 2017. V. 83 P. 20.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01534-17>
 43. Bueno Batista M., Dixon R. Manipulating nitrogen regulation in diazotrophic bacteria for agronomic benefit // Biochem. Soc. Trans. 2019. V. 47. P. 603–614.
<https://doi.org/10.1042/BST20180342>
 44. Unkovich M., Herridge D., James E.K., Giller K.E., Peoples M.B. Reliable quantification of N₂ fixation by non-legumes remains problematic // Nut. Cycl. Agroecosyst. 2020. V. 35. P. 1–3.
<https://doi.org/10.1007/s10705-020-10083-9>
 45. El-Shanshoury A., Hassan M., Abdel-Ghaffar B. Synergistic effect of vesicular-arbuscular mycorrhizas and *Azotobacter chroococcum* on the growth and the nutrient contents of tomato plants // Phytol. 1989. V. 29. P. 203–212.
 46. Frey-Klett P., Garbaye J., Tarkka M. The mycorrhiza helper bacteria revisited // New Phytol. 2007. V. 176. P. 22–36. DOI: . 02191.x
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007>
 47. Guether M., Neuhauser B., Balestrini R., Dynowski M., Ludewig U., Bonfante P. A mycorrhizal-specific ammonium transporter from *Lotus japonicus* acquires nitrogen released by arbuscular mycorrhizal fungi // Plant Physiol. 2009. V. 150. P. 73–83.
<https://doi.org/10.1104/pp.109.136390>
 48. Meenakshisundaram M., Santhaguru K. Studies on association of arbuscular mycorrhizal fungi with *Glucanacetobacter diazotrophicus* and its effect on improve-

- ment of *Sorghum bicolor* (L.) // Inter. J. Sci. Res. (IJCSR). 2011. V. 1. P. 23–30.
49. Sabannavar S.J., Lakshman H. Synergistic interactions among *Azotobacter*, *Pseudomonas*, and arbuscular mycorrhizal fungi on two varieties of *Sesamum indicum* L. // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2011. V. 42. P. 2122–2133. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.596241>
 50. Rogers C., Oldroyd G.E.D. Synthetic biology approaches to engineering the nitrogen symbiosis in cereals // J. Exp. Bot. 2014. V. 65. P. 1939–1946. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru098>
 51. Bailey-Serres J., Parker J.E., Ainsworth E.A., Oldroyd G.E., Schroeder J.I. Genetic strategies for improving crop yields // Nature. 2019. V. 575. P. 109–118. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1679-0>
 52. Radhakrishnan G.V., Keller J., Rich M.K., Vernié T., Mbadinga D.L.M., Vigneron N. An ancestral signalling pathway is conserved in intracellular symbioses-forming plant lineages // Nat. Plants. 2020. V. 6. P. 280–289. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0613-7>
 53. Roy S., Liu W., Nandety R.S., Crook A., Mysore K.S., Pislariu C.I. Celebrating 20 years of genetic discoveries in legume nodulation and symbiotic nitrogen fixation // Plant Cell. 2020. V. 32. P. 15–41. <https://doi.org/10.1105/tpc.19.00279>
 54. van Velzen R., Holmer R., Bu F., Rutten L., van Zeijl A., Liu W. Comparative genomics of the nonlegume *Parasponia* reveals insights into evolution of nitrogen-fixing rhizobium symbioses // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2018. V. 115. P. E4700–E4709. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721395115>
 55. Burén S., Jiang X., López-Torrejón G., Echavarri-Erasun C., Rubio, L.M. Purification and in vitro activity of mitochondria targeted nitrogenase cofactor maturase NifB // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. P. 1567. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01567>
 56. Yang J., Xie X., Xiang N., Tian Z.X., Dixon R., Wang Y.P. Polyprotein strategy for stoichiometric assembly of nitrogen fixation components for synthetic biology // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2018. V. 115. P. E8509–E8517. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804992115>
 57. Rubio L.M., Ludden P.W. Biosynthesis of the iron molybdenum cofactor of nitrogenase // Annu. Rev. Microbiol. 2008. V. 62. P. 93–111. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi-cro.62.081307.162737>
 58. Burén S., Rubio L.M. State of the art in eukaryotic nitrogenase engineering // FEMS Microbiol. Lett. 2018. V. 365. P. 274. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx274>
 59. Eseverri Á., López-Torrejón G., Jiang X., Burén S., Rubio L.M., Caro E. Use of synthetic biology tools to optimize the production of active nitrogenase Fe protein in chloroplasts of tobacco leaf cells // Plant Biotechnol. J. 2020. V. 27. P. 1–15. <https://doi.org/10.1111/pbi.13347>
 60. Xiang N., Guo C., Liu J., Xu H., Dixon R., Yang J. Using synthetic biology to overcome barriers to stable expression of nitrogenase in eukaryotic organelles // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2020. V. 117. P. 16537–16545. <https://doi.org/10.1073/pnas.2002307117>
 61. Kumar A., Kuzyakov Y., Pausch J. Maize rhizosphere priming: field estimates using ¹³C natural abundance // Plant Soil. 2016. V. 409. P. 87–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2958-2>
 62. Duvick D.N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.) // Adv. Agron. 2005. V. 86. P. 83–145. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)86002-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)86002-X)
 63. Messina C.D., Podlich D., Dong Z., Samples M., Cooper M. Yield trait performance landscapes: from theory to application in breeding maize for drought tolerance // J. Exp. Bot. 2011. V. 62. P. 855–868. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq329>
 64. Donald C.M. The breeding of crop ideotypes // Euphytica. 1968. V. 17. P. 385–403. <https://doi.org/10.1007/BF00056241>
 65. Mandal V., Sharma N., Raghuram N. Molecular targets for improvement of crop nitrogen-use efficiency: current and emerging options // Engineering Nitrogen Utilization in Crop Plants / Eds. A.K. Shrawat, A. Zayed & D.A. Lightfoot. Springer, 2018. P. 77–93. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92958-3_5
 66. York L.M. Functional phenomics: An emerging field integrating high throughput phenotyping, physiology, and bioinformatics // J. Exp. Bot. 2019. V. 70. P. 379–386. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery379>
 67. Moll R.H., Kamprath E.J., Jackson W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization // Agron. J. 1982. V. 74. P. 562–564. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030037x>
 68. Tegeder M., Masclaux-Daubresse C. Source and sink mechanisms of nitrogen transport and use // New Phytol. 2018. V. 217. P. 5–53. <https://doi.org/10.1111/nph.14876>
 69. Raghuram N., Sharma N. Improving crop nitrogen use efficiency // Comprehensive Biotechnology / Ed. M. Moo-Young. Elsevier: Pergamon, 2019. P. 211–220. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00222-6>
 70. The S.V., Snyder R., Tegeder M. Targeting nitrogen metabolism and transport processes to improve plant nitrogen use efficiency // Front. Plant Sci. 2021. V. 11. P. 628366. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.628366>
 71. Nielsen K.L., Lynch J.P., Jablonsky A.G., Curtis P.S. Carbon cost of root systems: an architectural approach // Plant Soil. 1994. V. 165. P. 161–169. <https://doi.org/10.1007/BF00009972>
 72. Lynch J.P. Root phenes that reduce the metabolic costs of soil exploration: opportunities for 21st century agriculture // Plant Cell Environ. 2015. V. 38. P. 1775–1784. <https://doi.org/10.1111/pce.12451>
 73. Zhan A., Lynch J.P. Reduced frequency of lateral root branching improves N capture from low N soils in maize // J. Exp. Bot. 2015. V. 66. P. 2055–2065. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv007>

74. Guo H., York L.M. Maize with fewer nodal roots allocates mass to more lateral and deep roots that improve nitrogen uptake and shoot growth // *J. Exp. Bot.* 2019. V. 70. P. 5299–5309.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erz258>
75. Chimungu J.G., Brown K.M., Lynch J.P. Reduced root cortical cell file number improves drought tolerance in maize // *Plant Physiol.* 2014. V. 166. P. 1943–1955.
<https://doi.org/10.1104/pp.114.249037>
76. Saengwilai P., Nord E.A., Chimungu J., Brown K.M., Lynch, J.P. Root cortical aerenchyma enhances nitrogen acquisition from low nitrogen soils in maize (*Zea mays* L.) // *Plant Physiol.* 2014. V. 166. P. 726–735.
<https://doi.org/10.1104/pp.114.241711>
77. Sharma N., Sinha V.B., Gupta N., Rajpal S., Kuchi S., Sitaramam V. Phenotyping for nitrogen use efficiency: rice genotypes differ in N-responsive germination, oxygen consumption, seed urease activities, root growth, crop duration, and yield at low N // *Front. Plant Sci.* 2018. V. 9. P. 1452.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01452>
78. Griffiths M.G., York L.M. Targeting root uptake kinetics for increasing plant productivity and nutrient use efficiency // *Plant Physiol.* 2020. V. P. 182. P. 1854–1868.
<https://doi.org/10.1104/pp.19.01496>
79. Pace G.M., McClure P.R. Comparison of nitrate uptake kinetics parameters across maize inbred lines // *J. Plant Nutr.* 1986. V. 9. P. 1095–1112.
<https://doi.org/10.1080/01904168609363512>
80. York L.M., Silberbush M., Lynch J.P. Spatiotemporal variation of nitrate uptake kinetics within the maize (*Zea mays* L.) root system is associated with greater nitrate uptake and interactions with architectural phenes // *J. Exp. Bot.* 2016. V. 67. P. 3763–3775.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erw133>
81. Griffiths M., Roy S., Guo H., Seethepalli A., Huhman D., Ge Y. A multiple ion-uptake phenotyping platform reveals shared mechanisms affecting nutrient uptake by roots // *Plant Physiol.* 2021. V. 185. P. 781–795
<https://doi.org/10.1093/plphys/kiab080>
82. Wang B., Smith S.M., Li J. Genetic regulation of shoot architecture // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2018. V. 69. P. 437–468.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040422>
83. Li Y., Ren B., Ding L., Shen Q., Peng S., Guo S. Does chloroplast size influence photosynthetic nitrogen use efficiency? // *PLoS ONE.* 2013. V. 8. e62036.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062036>
84. Pang J., Palta J.A., Rebetzke G.J., Milroy S.P. Wheat genotypes with high early vigour accumulate more nitrogen and have higher photosynthetic nitrogen use efficiency during early growth // *Funct. Plant Biol.* 2014. V. 41. P. 215–222.
<https://doi.org/10.1071/FP13143>
85. South P.F., Cavanagh A.P., Liu H.W., Ort D.R. Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field // *Science.* 2019. V. 363. P. 6422.
<https://doi.org/10.1126/science.aat9077>
86. Acevedo-Siaca L.G., Coe R., Wang Y., Kromdijk J., Quick W.P., Long S.P. Variation in photosynthetic induction between rice accessions and its potential for improving productivity // *New Phytol.* 2020. V. 227. P. 1097–1108.
<https://doi.org/10.1111/nph.16454>
87. Fernie A.R., Bachem C.W.B., Helariutta Y., Neuhaus H.-E., Pratt S., Ruan Y.-L. Synchronization of developmental, molecular and metabolic aspects of source–sink interactions // *Nat. Plants.* 2020. V. 6. P. 55–66.
<https://doi.org/10.1038/s41477-020-0590-x>
88. Donald C.M., Hamblin J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria // *Adv. Agron.* 1976. V. 28. P. 361–405.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60559-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60559-3)
89. Oury F.X., Godin C. Yield and grain protein concentration in bread wheat: how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes? // *Euphytica.* 2007. V. 157. P. 45–57.
<https://doi.org/10.1007/s10681-007-9395-5>
90. Hütsch B.W., Schubert S. Harvest index of maize (*Zea mays* L.): Are there possibilities for improvement? // *Adv. Agron.* 2017. V. 146. P. 37–82.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.004>
91. Perchlik M., Tegeder M. Improving plant nitrogen use efficiency through alteration of amino acid transport processes // *Plant Physiol.* 2017. V. 175. P. 235–247.
<https://doi.org/10.1104/pp.17.00608>
92. Tegeder M., Perchlik M. The importance of organic nitrogen transport processes for plant productivity and nitrogen use efficiency // *Engineering nitrogen utilization in crop plants* / Eds. A.K. Shrawat, A. Zayed, D.A. Lightfoot. N.Y.: Springer, 2018. P. 233–253.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-92958-3_13
93. Koskey G., Mburu S.W., Njeru E.M., Kimiti J.M., Omboiri O., Maingi J.M. Potential of native rhizobia in enhancing nitrogen fixation and yields of climbing beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in contrasting environments of Eastern Kenya // *Front. Plant Sci.* 2017. V. 8. P. 443.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00443>
94. Santachiara G., Salvagiotti F., Gerde J.A., Rotundo J.L. Does biological nitrogen fixation modify soybean nitrogen dilution curves? // *Field Crops Res.* 2018. V. 223. P. 171–178.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.04.001>
95. Zhang J., Liu Y.X., Zhang N., Hu B., Jin T., Xu H. NRT1.1B is associated with root microbiota composition and nitrogen use in field-grown rice // *Nat. Biotechnol.* 2019. V. 37. P. 676–684.
<https://doi.org/10.1038/s41587-019-0104-4>
96. Subbarao G.V., Yoshihashi T., Worthington M., Nakahara K., Ando Y., Sahrawat K.L. Suppression of soil nitrification by plants // *Plant Sci.* 2015. V. 233. P. 155–164.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.01.012>
97. Sun L., Lu Y., Yu F., Kronzucker H.J., Shi W. Biological nitrification inhibition by rice root exudates and its relationship with nitrogen use efficiency // *New Phytol.* 2016. V. 212. P. 646–656.
<https://doi.org/10.1111/nph.14057>
98. York L.M., Silberbush M., Lynch J.P. Spatiotemporal variation of nitrate uptake kinetics within the maize (*Zea mays* L.) root system is associated with greater nitrate uptake and interactions with architectural phenes // *J. Exp.*

- Bot. 2016. V. 67. P. 3763–3775.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erw133>
99. *Perchlik M., Tegeder M.* AAP2 amino acid transporter function in photosynthetic and plant nitrogen use efficiency in *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* 2018. V. 178. P. 174–188.
<https://doi.org/10.1104/pp.18.00597>
 100. *Jungers J.M., DeHaan L.H., Mulla D.J., Sheaffer C.C., Wyse D.L.* Reduced nitrate leaching in a perennial grain crop compared to maize in the Upper Midwest, USA // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2019. V. 272. P. 63–73.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.11.007>
 101. *Foster T.L., Baldi H.D., Shen X., Burson B.L., Klein R.R., Murray S.C.* Development of novel perennial *S. bicolor* × *S. propinquum* hybrids // *Crop Sci.* 2020. V. 60. P. 863–872.
<https://doi.org/10.1002/csc2.20136>
 102. *Jones J.W., Antle J.M., Basso B., Boote K.J., Conant R.T., Foster I.* Brief history of agricultural systems modeling // *Agric. Syst.* 2017. V. 155. P. 240–254.
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.05.014>
 103. *Morris T.F., Murrell T.S., Beegle D.B., Camberato J.J., Ferguson R.B.* Strengths and limitations of nitrogen rate recommendations for corn and opportunities for improvement // *Agron. J.* 2018. V. 110. P. 1–37.
<https://doi.org/10.2134/agronj2017.02.0112>
 104. *Holworth D.P., Huht N.I., deVoil P.G., Zurcher E.J., Herrmann N.I., McLean G.* APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation // *Environ. Model Soft.* 2014. V. 62. P. 327–350.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
 105. *Chen X., Cui Z., Fan M., Vitousek P., Zhao M., Ma W.* Producing more grain with lower environmental costs // *Nature.* 2014. V. 514. P. 486–489.
<https://doi.org/10.1038/nature13609>
 106. *Zhang X., Davidson E.A., Mauzerall D.L., Searchinger T.D., Dumas P., Shen Y.* Managing nitrogen for sustainable development // *Nature.* 2015. V. 528. P. 51–59.
<https://doi.org/10.1038/nature15743>
 107. *Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J.* 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9. Iss. 105011.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105011>
 108. *Camberato J., Nielsen R., Joern B.* Nitrogen management guidelines for corn in Indiana. Purdue nitrogen management update // Available online at: www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/nitrogenmgmt.pdf, 2017.
 109. *Harrison M.T., Roggero P.P., Zavattaro L.* Simple, efficient and robust techniques for automatic multi-objective function parameterisation: Case studies of local and global optimisation using APSIM // *Environ. Model Soft.* 2019. V. 117. P. 109–133.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.010>
 110. *Galán-Martín Á., Vaskan P., Antón A., Esteller L.J., Guillén-Gosálbez G.* Multi-objective optimization of rainfed and irrigated agricultural areas considering production and environmental criteria: a case study of wheat production in Spain // *J. Clean. Prod.* 2017. V. 140. P. 816–830.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.099>
 111. *Moeiniazade S., Kusmec A., Hu G., Wang L., Schnable P.S.* Multitrait genomic selection methods for crop improvement // *Genetics* 2020. V. 215. P. 931–945.
<https://doi.org/10.1534/genetics.120.303305>
 112. *Udvardi M., Below F.E., Castellano M.J., Eagle A.J., Giller K.E., Ladha J.K., Liu X., Maaz T.M., Nova-Franco B., Raghuram N., Robertson G.P., Roy S., Saha M., Schmidt S., Tegeder M., York L.M., Peters J.W.* A Research road map for responsible use of agricultural nitrogen // *Front. Sustain. Food Syst.* 2021. V. 5. Iss. 660155.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.660155>

Improving the Efficiency of Nitrogen Use: Problems and Solutions. Part 2. Biological Approaches

V. N. Bashkin^{a,#} and R. A. Galiulina^{b,##}

^a*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the RAS
 Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b*Institute of Basic Biological Problems of the Russian Academy of Sciences
 Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

[#]*E-mail: bashkin@issp.serpukhov.su*

^{##}*E-mail: rosa_g@rambler.ru*

Biological methods of increasing the efficiency of nitrogen use can be considered as improved farming methods that synchronize the need for nitrogen for agricultural crops with its availability in the soil. It is shown that they are the most achievable ways to solve this problem. Crop breeding aimed at the physiological processes of roots and shoots is likely to increase nitrogen uptake and use of its soil forms, while breeding aimed at increasing the efficiency of biological nitrogen fixation by legumes will increase the overall efficiency of the system. The article also demonstrates that the development of new N-fixing symbioses in non-legume crops can reduce the need for chemical fertilizers in agroecosystems, but is a much longer-term goal.

Key words: efficiency of nitrogen use, biological nitrogen fixation, breeding, microbiome, roots, soil health.