

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-1-1102

EDN: WLFQBO

УДК 633:631.86



Научная статья

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОЗЫ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Fe, Mn, Zn И Cu В ОРГАНАХ РАСТЕНИЙ РАПСА

*О.А. Дубровина, Т.В. Зубкова, Д.В. Виноградов,
В.А. Кравченко, В.Л. Захаров*

Аннотация

Обоснование. Взаимодействие между питательными веществами растений может приводить к антагонистическим или синергетическим результатам, влияющим на эффективность использования питательных веществ. Знание взаимодействия питательных веществ может служить руководством при разработке удобрений и оптимизации стратегий внесения удобрений для получения высоких урожаев и высокой эффективности использования питательных веществ.

Цель. Изучить влияние применения органических удобрений отдельно или в сочетании с химическими на накопление и распределение Fe, Mn, Zn, и Cu в органах растений рапса в фазу зеленого стручка.

Материалы и методы. Исследование проводилось в 2022–2023 годах на учебно-опытном участке ЕГУ им. И.А. Бунина в Липецкой области. Почвенный покров земледелия представлен черноземом выщелоченным, среднесуглинистого гранулометрического состава. Схема опыта представлена четырьмя вариантами: 1. Контроль; 2. Грибной грунт 30т/га (28 кг N); 3. Грибной грунт 30т/га + N₇₀ (80 кг N); 4. Грибной грунт 30т/га + N₁₄₀ (130 кг N). Минерализацию проб проводили методом сухого озоления по ГОСТ 26657-85. Подвижные формы металлов экстрагировали с помощью 1% HNO₃. Математическая обработка и интерпретация первичных данных проводились классическими статистическими методами с использованием пакета программ Statistica.

Результаты. Корневая система рапса стала концентратором Fe. Стабильный метаболизм железа, в корневой системе, объясняется выработкой растениями эффективных механизмов усвоения железа и жестким его регулированием.

Установлено, что увеличение поступающего азота более эффективно для повышения концентрации цинка в вегетативной и генеративной системе растения, чем в корне. Медь в рапсе регулируется азотным балансом и изучаемыми в опыте дозами удобрений, которые являются оптимальными и не проявляют антагонизм ионов. Представленные в опыте значения указывают на способность растения накапливать биодоступный Mn в наземных тканях растения.

Заключение. В ходе представленного исследования выявлено, что рекомендуемые в опыте удобрения и их дозы положительно влияют на синергизм и распределение жизненно важных микроэлементов в органах рапса. Их концентрация не достигает токсических значений.

Ключевые слова: медь; цинк; железо; марганец; рапс; удобрения

Для цитирования. Дубровина, О. А., Зубкова, Т. В., Виноградов, Д. В., Кравченко, В. А., & Захаров, В. Л. (2025). Изучение влияния дозы органоминеральных удобрений на накопление и распределение Fe, Mn, Zn и Cu в органах растений рапса. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 164-181. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1102>

Original article

TO STUDY THE EFFECT OF THE DOSE OF ORGANOMINERAL FERTILIZERS ON THE ACCUMULATION AND DISTRIBUTION OF FE, MN, ZN AND CU IN THE ORGANS OF RAPESEED PLANTS

*O.A. Dubrovina, T.V. Zubkova, D.V. Vinogradov,
V.A. Kravchenko, V.L. Zakharov*

Abstract

Background. The interaction between plant nutrients can lead to antagonistic or synergistic results that affect the effectiveness of nutrient use. Knowledge of nutrient interactions can guide the development of fertilizers and optimize fertilizer application strategies to achieve high yields and high nutrient efficiency.

Purpose. To study the effect of the use of organic fertilizers alone or in combination with chemical fertilizers on the accumulation and distribution of Fe, Mn, Zn, and Cu in the organs of rapeseed plants during the green pod phase.

Materials and methods. The study was conducted in 2022-2023 at the educational and experimental site of I.A. Bunin YSU in the Lipetsk region. The soil cover

of land use is represented by leached chernozem of medium loamy granulometric composition. The scheme of the experience is represented by four options: 1. Control; 2. Mushroom soil 30t/ha (28 kg N); 3. Mushroom soil 30t/ha + N_{70} (80 kg N); 4. Mushroom soil 30t/ha + N_{140} (130 kg N). The mineralization of the samples was carried out by dry salinization according to GOST 26657-85. The mobile forms of metals were extracted using 1% HNO_3 . The mathematical processing and interpretation of the primary data were carried out using classical statistical methods using the Statistica software package.

Results. The rapeseed root system has become a Fe hub. Stable iron metabolism in the root system is explained by the development of effective mechanisms of iron absorption by plants and its strict regulation. It was found that increasing the incoming nitrogen is more effective for increasing the concentration of zinc in the vegetative and generative system of the plant than in the root. Copper in rapeseed is regulated by the nitrogen balance and the doses of fertilizers studied in the experiment, which are optimal and do not show ion antagonism. The values presented in the experiment indicate the plant's ability to accumulate bioavailable Mn in terrestrial plant tissues.

Conclusion. In the course of the presented study, it was revealed that the fertilizers recommended in the experiment and their doses positively affect the synergy and distribution of vital trace elements in rapeseed organs. Their concentration does not reach toxic values.

Keywords: copper; zinc; iron; manganese; rapeseed; fertilizers

For citation. Dubrovina, O. A., Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., Kravchenko, V. A., & Zakharov, V. L. (2025). To study the effect of the dose of organomineral fertilizers on the accumulation and distribution of Fe, Mn, Zn and Cu in the organs of rapeseed plants. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 164–181. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1102>

Введение

Рапс является ценной масличной культурой. Посевная площадь в России в 2023 году составила около 2,4 млн. га. [26]. Устойчивое расширение культуры связано с хорошей адаптацией рапса к умеренному климату, возросшим спросом на растительное масло, достижениями агропроизводителей, делающих производство более эффективным и прибыльным. Поэтому увеличение производства высококачественных семян ярового рапса является важнейшей задачей, стоящей перед сельхозпроизводителями.

Для того чтобы получать ежегодно стабильную урожайность маслосемян рапса на уровне 27-30 ц/га необходимо реализовать весь биологический потенциал культурного растения. Достижение максимальной

продуктивности невозможно без применения интенсивных технологий, основанных на грамотном подборе сортов и гибридов, рациональном питательном режиме и защите растений.

Питательные вещества имеют решающее значение для повышения урожайности рапса. Наиболее значимым источником их поступления в почву являются минеральные и органические удобрения, которые ускоряют рост растений и максимизируют урожайность культуры [4]. Потребление питательных веществ рапсом происходит с фазы розетки до окончания цветения [2]. На формирование 1 т семян рапса потребляется 80-100 кг N, 20-40 кг P₂O₅ и примерно 60-70 кг K₂O [22-25].

Азотные удобрения играют центральную роль в повышении урожайности и качестве семян рапса, во всех формах интенсивного земледелия [19-21]. Азотное удобрение, вносимое в почву, в основном существует в форме нитрата-N (NO₃-N), но в высоких дозах NO₃ может двусторонне воздействовать на биодоступность ключевых микроэлементов и привести к антагонистическим или синергетическим результатам, влияющих на эффективность использования питательных веществ.

Кроме основных макроэлементов, для нормальной вегетации рапса крайне желательны микроэлементы. Наиболее важные из них – Fe, Cu, Zn, Mn, B, наряду с белками, липидами и углеводами они составляют основу растений, участвуя в ключевых ферментативных процессах [9; 10].

Целый ряд научных исследований констатирует, что недостаток микроэлементов снижает ферментативную активность и метаболические процессы в растениях, а сверхдопустимое содержание может вызывать их цитотоксичность и повреждение за счет выработки АФК и последующего окислительного повреждения [15; 17; 18].

Очевидно, что взаимосвязь между поступлением азота при различных режимах управления N-питательными веществами и накоплением микроэлементов в тканях растений рапса в полевых условиях требует специального исследования, особенно в фазу зеленого стручка. Эта фаза характеризуется масштабными изменениями во взаимоотношениях источник-приемник, так как во время цветения вегетативные сегменты растения переходят из органов-поглотителей в органы-источники, что приводит к соответствующим изменениям в химическом составе растений [7; 8].

Цель исследования – изучение влияния азота при применении органических удобрений, как отдельно, так и в комплексе с химическими на накопление и распределение Fe, Mn, Zn, и Cu в органах растений рапса в фазу зеленого стручка.

Научная новизна. В ходе представленного исследования впервые выявлено, что рекомендуемые в опыте удобрения (грибной грунт 30т/га, грибной грунт 30т/га+ N₇₀, грибной грунт 30т/га + N₁₄₀) положительно влияют на синергизм и распределение жизненно важных микроэлементов (Fe, Mn, Zn, и Cu) в органах рапса. Их концентрация не достигает токсических значений в таких частях рапса, как листья, стебель, стручок и корни.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в 2022–2023 годах на учебно-опытном участке ЕГУ им. И.А. Бунина в Липецкой области. Почвенный покров землепользования представлен черноземом выщелоченным, среднесуглинистого гранулометрического состава. Реакция почвенного раствора в верхних горизонтах слабокислая (рН = 5,5). Содержание гумуса составляет от 5,6% до 5,8%, общий азот составляет от 0,220% до 0,228%. Запасы подвижного фосфора в среднем составляют 197,2 мг/кг, калия - 124,7 мг/кг. Погодные условия в годы исследований складывались благоприятно для развития ярового рапса, ГТК в 2022 г. составил 1,64 и в 2023 г. – 1,30. За вегетационный период 2022 г. осадков выпало в основном выше нормы, исключением стал июнь (69% к норме), в 2023 г. исключением стали такие месяцы, как май (92,4 % к норме) и июнь (38,8 % к норме). Температурный режим в исследуемые годы находился практически по всем месяцам в пределах нормы.

Агротехника выращивания культуры проводилась по классической технологии для данной зоны. Предшественник рапса - яровая пшеница. Вслед за уборкой предшественника проводилось дискование стерни (Lemken Rubin 10) на глубину 2-5 см. Пахота проводилась трактором John Deere 7930 на глубину 27 см. Весной, перед предпосевной культивацией, согласно схеме опыта вносились удобрения. Органические удобрения в виде полуперепревшего грибного грунта и минеральные удобрения в виде аммиачной селитры.

Полевой опыт закладывали по общепринятым методикам. По схеме рендомизированного блока в 4-х кратной повторности. Площадь учётной делянки 25м².

Дозы внесения удобрений рассчитаны согласно рекомендациям. Схема опыта представлена четырьмя вариантами: 1.Контроль; 2. Грибной грунт 30т/га (28 кг N); 3. Грибной грунт 30т/га+ N₇₀ (80 кг N); 4 Грибной грунт 30т/га+ N₁₄₀ (130 кг N).

Семена высевались рядовым способом, норма высева 2,5 млн. шт./га (6 кг/га). Посев проводился в оптимальные сроки, исходя из климатических особенностей года. В качестве объекта исследований использовался сорт ярового рапса Риф.

Защита растений проводилась механизировано, с помощью опрыскивателя John Deere 4730. Первая обработка была проведена в фазу 3-4-х настоящих листьев баковой смесью гербицида Нопасаран 1,2 л/га с прилипателем Даш 1,2 л/га. + инсектицидом Брейк 0,15 л/га.

Вторую обработку проводили в период стеблевания и в фазу начала бутонизации, которая была направлена на уничтожение вредителей рапса. Для этого применяли инсектицид Борея Нео, СК, 0,15 л/га.

В фазу цветения рапса была проведена третья химическая обработка, направленная на борьбу с рапсовым цветоедом и крестоцветными блошками с этой целью применяется инсектицид Маврик, ВЭ, 0,2 л/га.

Вариации распределения микроэлементов в органах растений рапса были оценены в фазу развития зеленый стручок. Исследованию подлежала вегетативная масса (стебель + лист), генеративная часть (стручок) и корневая система.

Обработка проб и химические анализы проводились в агрохимической лаборатории ЕГУ имени И.А. Бунина.

Минерализацию проб проводили методом сухого озоления по ГОСТ 26657-85. Подвижные формы металлов экстрагировали с помощью 1% HNO_3 . Математическая обработка и интерпретация первичных данных проводились классическими статистическими методами с использованием пакета программ Statistica.

Результаты исследования

Железо - один из ключевых элементов в биохимических процессах. Оно действует как окислительно-восстановительный катализатор при дыхании, фотосинтезе и ассимиляции азота. Среднее содержание железа в растениях составляет 0,02-0,08% (20-80 мг/кг сухой массы) [2]. Растения усваивают железо из почвы (метаболически). В силу своих химических свойств, в почвопоглощающем комплексе оно представлено в виде комплексных соединений, в двух - и трехвалентной форме, меняя ее в зависимости от условий почвенной среды (в щелочной среде оно осаждается, в кислой – растворяется) [3]. Представленные в таблице 1 результаты исследования показывают, что корневая система рапса стала концентратором металла. Содержание элемента в ней не значительно различалось по вариантам, с 25,502 на контроле до 28,729 мг /кг сухого вещества в варианте 4.

Таблица 1.

Распределение Fe, Zn, Cu, Mn в органах ярового рапса в зависимости от вариантов опыта

Вариант		Fe	Zn	Cu	Mn
Контроль	стебель-лист	15,504	18,451	12,975	12,975
	стручок-семена	9,2150	18,252	10,136	10,136
	корень	25,502	12,109	14,781	14,781
Грибной грунт 30т/га	стебель-лист	20,868	19,679	15,206	15,206
	стручок-семена	11,464	19,464	13,029	13,029
	корень	25,607	12,296	13,067	13,067
Грибной грунт 30т+ N ₇₀ (80 кг N)	стебель-лист	21,491	22,961	16,348	16,348
	стручок-семена	11,822	21,645	14,034	14,034
	корень	27,096	14,295	11,447	11,447
Грибной грунт 30т+ N ₁₄₀ (130 кг N)	стебель-лист	23,617	26,537	16,997	16,997
	стручок-семена	11,910	23,234	14,282	14,282
	корень	28,729	15,252	11,831	11,831

Стабильный метаболизм железа, в корневой системе, объясняется выработкой растениями эффективных механизмов усвоения железа и жестким его регулированием [13]. После поглощения корнями, железо транспортируется в вегетативную часть растения [16]. Локализация железа в стебле и листьях рапса достоверно увеличивалась и зависела от дозы внесения азота. При внесении 30 тонн грибного грунта в почву вносится 28 кг N (с учетом коэффициента использования) [6]. Эта доза увеличила содержание железа в вегетативной части растения до 20,868 мг/кг сухого вещества, что на 25 % выше, чем на контрольном - 15,504 мг/кг. Повышение общего азота за счет внесения аммиачной селитры (NH₄NO₃) в дозе 70 кг/га д.в. увеличило накопление железа в вегетативной части до 21,491мг/кг сухого вещества, а его доведение до 130кг/га в варианте 4 выявило 23,617мг/кг Fe.

В генеративную часть (стручок) переносилось 55% всего Fe, накопленного в побегах и листьях, в случае высокого поступления азота (варианты 2-4), в то время как при низком поступлении азота (контроль) это значение составляло 40% (9,215 мг/кг). Поступления N в опыте оказало положительное влияние на усвоение и распределение Fe в стебле и листьях и стручках растений рапса.

Цинк является важным питательным микроэлементом для роста и развития растений. Он активно участвует в ряде физиологических процессов растений, таких как гормональная регуляция, процессы репара-

ции комплекса PSII при фотоингибировании, поддержание концентрации CO_2 в мезофилле. Это единственный металл, присутствующий во всех шести классах ферментов (оксидоредуктаза, трансфераза, гидролазы, лиазы, изомеразы и лигазы). Для получения максимального урожая многим культурным растениям требуется концентрация цинка в листьях 15-30 мг/кг-сухого вещества [24]. Накопление цинка в органах растений зависит от генетической и видовой принадлежности растения, содержания Zn в почве, влажности почвы, ее pH, фазы культуры, биомассы корневой системы и наземной массы растения [23].

Цинк поглощается корнями растений в основном в виде двухвалентного катиона (Zn^{2+}), посредством массового потока и механизмов диффузии корнями. Метод атомно-абсорбционной спектроскопии позволил выявить локализацию Zn в органах рапса в стадии зеленого стручка. В корневой системе концентрация металла составляла 12,109; 12,296; 14,295; 15,252 мг/кг сухого вещества в соответствии с вариантами опыта. Увеличение дозы азота не значительно влияло на количество элемента и его накопление было идентично с накоплением Fe, поскольку ионы обоих металлов имеют общие белки-переносчики, необходимые для их поглощения [11].

Установлено, что увеличение поступающего азота более эффективно для повышения концентрации цинка в вегетативной и генеративной системе растения, чем в корне. В образце листья+ стебель на контрольном варианте выявлено 18,451 мг/кг сухого вещества, в образце стручок 18,252 мг/кг сухого вещества. При внесении 30т/га органического удобрения количество Zn увеличилось до 19,679 и 19,464 мг/кг сухого вещества соответственно. Поступление азота в дозе 80кг/га д.в. увеличило концентрацию элемента в вегетативной части до 22,961 и 21,645 мг/кг сухого вещества в стручке. Увеличение поступления N с низкого до высокого уровня (вариант 4) в 1,5 раза увеличило и содержание цинка в вегетативной массе (до 26,537 мг/кг) и в 1,3 раза в генеративной (до 23,234 мг/кг). Этот результат согласуется с предыдущими исследованиями, в которых сообщалось о положительном влиянии азотного удобрения на концентрацию Zn в репродуктивных органах [14]. Биоаккумуляция цинка на уровне органов рапса стоит в следующем ряду: листья> стебель> стручок > корни.

Медь является важным питательным микроэлементом, необходимым растениям в качестве кофактора ферментов, участвующих в дыхании и фотосинтезе. Оптимальное содержание меди в растениях от 3 до 15 мг/кг сухого вещества при повышении элемента более 20 мг/кг сухой массы проявляются симптомы медной токсичности [1].

В почвенно-поглощающем комплексе медь является антагонистом ряда необходимых элементов - цинк, железо, кальций и может вызвать их недостаточность [5].

Внесение органоминеральных удобрений в опыте поднимало содержание Cu, в анализируемых частях растений. Концентрации Cu, наблюдаемые в рапсе, варьировали от 6,948 до 9,135 мг/кг сухого вещества для корней, в то время как вариация в вегетативной массе составляла от 2,761 до 4,658 мг/кг сухого вещества. В зеленом стручке наблюдаемая концентрация Cu не существенно различалась между вариантами 1 и 2 (при внесении азота до 30 кг/га д.в) и не существенно коррелировала между вариантами 3 и 4 ($R=0,35$, $P=0,26$).

Результаты настоящего исследования показывают, что независимо от дозы внесения органоминеральных удобрений применяемых в опыте, рапс накапливает медь в корнях и переносит ее в побеговую систему. Накопление меди в стручке способствует обогащению микроэлементного состава зерна. Основываясь на приведенных результатах, Cu в рапсе регулируется азотным балансом и изучаемые в опыте дозы удобрений являются оптимальными и не проявляют антагонизм йонов.

Марганец играет роль в таких процессах жизненного цикла растения, как фотосинтез, дыхание, поглощение активных форм кислорода (АФК), защита от патогенов, гормональная сигнализация и структурирование генеративных органов. Он катализирует не только различные реакции расщепления углеводов и метаболизма органических кислот, но и ряд существенных превращений, участвующих в обмене азота и фосфора. Среднее содержание элемента в растениях разных семейств находится в пределах 10-400 мг/кг [12].

В нашем исследовании с яровым рапсом продемонстрирована высокая корреляция между содержанием Mn и дозой N удобрений во всех тестируемых частях растений. В корневой системе при внесении *30 т/га грибного грунта (вариант 2)*, содержалось 10,076 мг/кг сухого вещества, а на контроле 10,781 мг/кг. Изменение накопления Mn в меньшую сторону связано с повышением pH почвы при внесении органического удобрения. С увеличением нормы внесения азотных удобрений, включающих аммиачную селитру накопление элемента увеличилось до 11,447 и 11,831 мг/кг соответственно. Усиление биоаккумуляции корневой системой Mn рапсом при увеличении N, вероятно, связано с хелатированием N некоторыми переходными элементами и снижением реакции почвенной среды [12]. Представленные в опыте значения указывают на способность растения

накапливать биодоступный металл в наземных тканях растения. Содержание марганца в стеблях и листьях капустной культуры было значительно выше соответствующих значений, чем на контрольном варианте, для N_{28} , N_{80} и N_{130} соответственно на 17,2%, 26,0% и 31,0%.

Во время формирования семян в стручке, у растений, получавших азот в виде органических и органоминеральных удобрений увеличилось содержание Mn в вариантах: от 10,136 мг/кг сухого вещества на контроле до 13,029 мг/кг сухого вещества на варианте с применением грибного грунта, 14,034 в варианте 3 и 14,282 мг/кг сухого вещества на варианте 4.

Для практического применения удобрений важно выявить связь между Fe и Mn, так как функции этих микроэлементов связаны с процессами поглощения и с ферментативскими реакциями. Оптимальное соотношение Fe к Mn должно составлять 2:1 [1]. В условиях экспериментального исследования выявлено, что по мере увеличения поступления N, увеличивается количество поступающего железа (Fe) в органы рапса, при этом идет снижение концентрации Mn в зеленой части и корнях, но не выявлено такого эффекта в зеленом стручке. Соотношение Fe к Mn в вегетативных органах при всех уровнях поступления N составляло 1,3:1, в стручке доля марганца была выше, чем железа. В вариантах 1-2 это соотношение равнялось 1:1,1, в вариантах с дозой общего азота 80 и 130 кг /га д.в. 1:1,2. В корневой системе это соотношение составило в среднем 2,4:1.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что внесение органических и минеральных удобрений под рапс является важным фактором, для понимания роли азота в технологии выращивания рапса, распределении и накоплении жизненно важных для растения микроэлементов в частях растения.

Корневая система рапса стала концентратором Fe. Содержание элемента в ней не значительно различалось по вариантам опыта. Стабильный метаболизм железа, в корневой системе, объясняется выработкой растениями эффективных механизмов усвоения железа и жестким его регулированием при этом поступления N в опыте оказало положительное влияние на усвоение и распределение Fe в стебле и листьях и стручках растений рапса.

Установлено, что увеличение поступающего азота более эффективно для повышения концентрации цинка в вегетативной и генеративной системе растения, чем в корне. Биоаккумуляция цинка на уровне органов рапса стоит в следующем ряду: листья>стебель>стручок>корни.

Медь в рапсе регулируется азотным балансом и изучаемыми в опыте дозами удобрений, которые являются оптимальными и не проявляют антагонизм ионов. Внесение органоминеральных удобрений в опыте поднимало содержание Cu в анализируемых частях растений. Максимальное накопление меди обнаружено в корневой системе.

Представленные в опыте значения указывают на способность растения накапливать биодоступный Mn в наземных тканях растения. В условиях экспериментального исследования выявлено, что по мере увеличения поступления N , увеличивается количество поступающего железа (Fe) в органы рапса, при этом идет снижение концентрации Mn в зеленой части и корнях, но не выявлено такого эффекта в зеленом стручке.

Список литературы

1. Дабахов, М. В., Дабахова, Е. В., & Титова, В. И. (2005). *Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования*. Нижний Новгород: Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия.
2. Дубровина, О. А., Зубкова, Т. В., & Виноградов, Д. В. (2020). Накопление микроэлементов растениями ярового рапса при использовании куриного помёта и цеолита. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева*, (48), 17–23. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.48.4.003>
3. Иванищев, В. В. (2019). Доступность железа в почве и его влияние на рост и развитие растений. *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*, (3), 127–138.
4. Иванов, А. И., Корягин, Ю. В., & Анохин, Р. В. (2015). Использование отработанного субстрата в качестве органического удобрения — важнейшее звено безотходной технологии выращивания грибов. *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*, (27), 120–128.
5. Спицына, С. Ф., Томаровский, А. А., & Оствальд, Г. В. (2014). Проявление синергизма и антагонизма между ионами меди, цинка и марганца при поступлении их в растения. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, (120), 29–32.
6. Фомин, И. В., & Кшникаткин, С. А. (2017). Обоснование использования отработанного субстрата вешенки в качестве органического удобрения. В сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных «Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса России» (23–24 марта 2017, Пенза), Том I (с. 86–89). Пенза: Пензенский государственный аграрный университет.

7. Bushe, A. S., et al. (2016). Efficiency of nitrogen use in rapeseed. Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0371-0>
8. Byshov, N. V., Uspenskiy, I. A., Yukhin, I. A., & Limarenko, N. V. (2020). Ecological and technological criteria for the efficient utilization of liquid manure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 422, 012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012069>
9. Gulidova, V. A., Zubkova, T. V., Kravchenko, V. A., & Dubrovina, O. A. (2019). On the ways of improving photosynthesis productivity in spring rape plants in the crops. *Ecology, Environment and Conservation*, 25(2), 577–581.
10. Gulidova, V. A., Zubkova, T. V., Kravchenko, V. A., & Dubrovina, O. A. (2017). The dependence of photosynthetic indices and the yield of spring rape on foliar fertilization with microfertilizers. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 17(4), 404–407. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2017.404.407>
11. Gupta, N., Ram, H., & Kumar, B. (2016). Mechanism of zinc uptake in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15, 89–109. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9390-1>
12. Joardar Mukhopadhyay, M., & Sharma, A. (1991). Manganese in the cellular metabolism of higher plants. *Botanical Review*, 57, 117–149. <https://doi.org/10.1007/BF02858767>
13. Kobayashi, T., Nozoe, T., & Nishizawa, N. K. (2019). Iron transport and its regulation in plants. *Biology of Free Radicals and Medicine*, 133, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.10.439>
14. Kutman, U. B., Yildiz, B., & Cakmak, I. (2011). Влияние азота на поглощение, ремобилизацию и распределение цинка и железа на протяжении развития твёрдой пшеницы. *Plants and Soil*, 342, 149–164.
15. Li, Y., et al. (2019). Accumulation of manganese and physiological behavior of Camellia oleifera plants in response to different levels of nitrogen fertilizers. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109603. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109603>
16. Mori, S. (1998). Transport of iron in cereal plants. *Metallic Ion Biology*, 35, 215–238.
17. Lupova, E. I., Sazonkin, K. D., & Vinogradov, D. V. (2021). Yield of winter rape in Ryazan region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723(2), 022031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022031>
18. Ushakov, R. N., Ruchkina, A. V., Levin, V. I., Zakharova, O. A., Kostin, Y. V., & Golovina, N. A. (2018). Sustainability of Agro-gray soil to pollution and

- acidification, and its bio-diagnostics. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.36), 92910.
19. Vinogradov, D., Lupova, E., Khromtsev, D., & Vasileva, V. (2018). The influence of bio-stimulants on productivity of coriander in the Non-Chernozem Zone of Russia. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(6), 1078–1084.
 20. Vinogradov, D. V., Naumtseva, K. V., & Lupova, E. I. (2019). Use of biological fertilizers in white mustard crops in the Non-Chernozem Zone of Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 341(1), 012204. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012204>
 21. Vinogradov, D. V., Makarova, M. P., & Zubkova, T. V. (2023). The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses. *Theoretical and Applied Ecology*, (1), 93–100. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-093-100>
 22. Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., & Zakharov, V. L. (2022). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 979(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012094>
 23. Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., & Dubrovina, O. A. (2022). Effect of zeolite on the micromorphological and biochemical features of spring rapeseed (*Brassica napus* L.). *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 54(1), 153–164. <https://doi.org/10.54910/SABRAO2022.54.1.14>
 24. Zubkova, T., Motyleva, S., Dubrovina, O., & Brindza, J. (2021). The study of rapeseeds ash composition in the conditions of the agroecological experiment. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 15, 156–161. <https://doi.org/10.5219/1356>
 25. Zubkova, T., Motyleva, S., Vinogradov, D., Gulidova, V., & Dubrovina, O. (2022). Organic fertilizer and natural zeolite effects on morphometric traits of *Brassica napus* L. pollen grains. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 54(2), 397–406. <https://doi.org/10.54910/sabrao2022.54.2.15>
 26. Рынок рапса в 2023 году: тенденции и прогнозы. (18 сентября 2023). Получено с <https://agrovesti.net/lib/industries/oilseeds/rynok-rapsa-v-2023-godu-tendentsii-i-prognozy.html>

References

1. Dabakhov, M. V., Dabakhova, E. V., & Titova, V. I. (2005). Heavy metals: ecotoxicology and standardization issues. Nizhni Novgorod: Nizhny Novgorod State Agricultural Academy.
2. Dubrovina, O. A., Zubkova, T. V., & Vinogradov, D. V. (2020). Accumulation of micronutrients by spring rape plants when applying chicken manure and ze-

- olite. *Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*, (48), 17–23. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.48.4.003>
3. Ivanishev, V. V. (2019). Iron availability in soil and its effect on plant growth and development. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Estestvennye Nauki*, (3), 127–138.
 4. Ivanov, A. I., Koryagin, Y. V., & Anokhin, R. V. (2015). Spent substrate use as organic fertilizer—a key component of waste-free mushroom growing technology. *XXI Century: Lessons Learned and Present-day Challenges Plus*, (27), 120–128.
 5. Spitsyna, S. F., Tomarovskiy, A. A., & Ostvald, G. V. (2014). Synergy and antagonism manifestations between copper, zinc, and manganese ions upon their uptake by plants. *Bulletin of Altay State Agrarian University*, (120), 29–32.
 6. Fomin, I. V., & Kshnikatkin, S. A. (2017). Rationalizing spent *Pleurotus ostreatus* substrate usage as organic fertilizer. In Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference of Young Scientists ‘Innovative Ideas of Young Researchers for the Russian Agro-industrial Complex’ (Penza, March 23–24, 2017), Volume I, pp. 86–89. Penza: Penza State Agrarian University.
 7. Bushe, A. S., et al. (2016). Efficiency of nitrogen use in rapeseed. Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0371-0>
 8. Byshov, N. V., Uspenskiy, I. A., Yukhin, I. A., & Limarenko, N. V. (2020). Ecological and technological criteria for the efficient utilization of liquid manure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 422, 012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012069>
 9. Gulidova, V. A., Zubkova, T. V., Kravchenko, V. A., & Dubrovina, O. A. (2019). On the ways of improving photosynthesis productivity in spring rape plants in the crops. *Ecology, Environment and Conservation*, 25(2), 577–581.
 10. Gulidova, V. A., Zubkova, T. V., Kravchenko, V. A., & Dubrovina, O. A. (2017). The dependence of photosynthetic indices and the yield of spring rape on foliar fertilization with microfertilizers. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 17(4), 404–407. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2017.404.407>
 11. Gupta, N., Ram, H., & Kumar, B. (2016). Mechanism of zinc uptake in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15, 89–109. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9390-1>
 12. Joardar Mukhopadhyay, M., & Sharma, A. (1991). Manganese in the cellular metabolism of higher plants. *Botanical Review*, 57, 117–149. <https://doi.org/10.1007/BF02858767>

13. Kobayashi, T., Nozoe, T., & Nishizawa, N. K. (2019). Iron transport and its regulation in plants. *Biology of Free Radicals and Medicine*, 133, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.10.439>
14. Kutman, U. B., Yıldız, B., & Çakmak, İ. (2011). Effect of nitrogen on zinc and iron acquisition, remobilization and partitioning during durum wheat development. *Plant and Soil*, 342, 149–164.
15. Li, Y., et al. (2019). Accumulation of manganese and physiological behavior of *Camellia oleifera* plants in response to different levels of nitrogen fertilizers. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109603. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109603>
16. Mori, S. (1998). Transport of iron in cereal plants. *Metallic Ion Biology*, 35, 215–238.
17. Lupova, E. I., Sazonkin, K. D., & Vinogradov, D. V. (2021). Yield of winter rape in Ryazan region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723(2), 022031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022031>
18. Ushakov, R. N., Ruchkina, A. V., Levin, V. I., Zakharova, O. A., Kostin, Y. V., & Golovina, N. A. (2018). Sustainability of Agro-gray soil to pollution and acidification, and its bio-diagnostics. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.36), 92910.
19. Vinogradov, D., Lupova, E., Khromtsev, D., & Vasileva, V. (2018). The influence of bio-stimulants on productivity of coriander in the Non-Chernozem Zone of Russia. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(6), 1078–1084.
20. Vinogradov, D. V., Naumtseva, K. V., & Lupova, E. I. (2019). Use of biological fertilizers in white mustard crops in the Non-Chernozem Zone of Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 341(1), 012204. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012204>
21. Vinogradov, D. V., Makarova, M. P., & Zubkova, T. V. (2023). The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses. *Theoretical and Applied Ecology*, (1), 93–100. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-093-100>
22. Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., & Zakharov, V. L. (2022). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 979(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012094>
23. Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., & Dubrovina, O. A. (2022). Effect of zeolite on the micromorphological and biochemical features of spring rapeseed (*Brassica napus* L.). *Sabao Journal of Breeding and Genetics*, 54(1), 153–164. <https://doi.org/10.54910/SABRAO2022.54.1.14>
24. Zubkova, T., Motyleva, S., Dubrovina, O., & Brindza, J. (2021). The study of rapeseeds ash composition in the conditions of the agroecological experi-

- ment. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 15, 156–161. <https://doi.org/10.5219/1356>
25. Zubkova, T., Motyleva, S., Vinogradov, D., Gulidova, V., & Dubrovina, O. (2022). Organic fertilizer and natural zeolite effects on morphometric traits of *Brassica napus* L. pollen grains. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 54(2), 397–406. <https://doi.org/10.54910/sabrao2022.54.2.15>
26. Rapseed Market in 2023: Trends and Forecasts. (September 18, 2023). Retrieved from <https://agrovesti.net/lib/industries/oilseeds/rynok-rapsa-v-2023-godu-tendentsii-i-prognozy.html>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Дубровина Ольга Алексеевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции

*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
laboratoria101@mail.ru*

Зубкова Татьяна Владимировна, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая кафедрой агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции

*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
ZubkovaTanua@yandex.ru*

Виноградов Дмитрий Валериевич, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой агрономии; профессор кафедры общего земледелия и агроэкологии

Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

*ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Российская Федерация; Ленинские горы, 1, стр. 12, 119234, г. Москва, Российская Федерация
vdvrzn@mail.ru*

Кравченко Владимир Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции

*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
agrosoil@yandex.ru*

Захаров Вячеслав Леонидович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции

*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
zaxarov7979@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Olga A. Dubrovina, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Agrotechnology, Storage and Processing of Agricultural Products

*Yelets State University Named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation
laboratoria101@mail.ru*

Tatyana V. Zubkova, Head of the Department of Agrotechnologies, Agricultural Products Storage and Processing, Candidate of Agricultural Sciences

*Yelets State University Named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation
ZubkovaTanua@yandex.ru*

Dmitry V. Vinogradov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Agronomy and Agrotechnologies; Professor of the Department of General Agriculture and Agroecology

*Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev;
M.V. Lomonosov Moscow State University
1, Kostychev Str., Ryazan, 390044, Russian Federation; 1/12, Leninskie Gory, 119234, Moscow, Russian Federation
vdvrzn@mail.ru*

Vladimir A. Kravchenko, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agrotechnology, Storage and Processing of Agricultural Products

Yelets State University Named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation

agrosoil@yandex.ru

Vyacheslav L. Zakharov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Agrotechnology, Storage and Processing of Agricultural Products

Yelets State University Named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation

zaxarov7979@mail.ru

Поступила 05.07.2024

После рецензирования 25.07.2024

Принята 07.08.2024

Received 05.07.2024

Revised 25.07.2024

Accepted 07.08.2024