

Применение магнийсодержащих удобрений способом праймирования для регуляции физиологических процессов у озимой пшеницы

РЕЗЮМЕ

В работе изучена эффективность применения нового магнийсодержащего удобрения «АктиМакс» для праймирования семян мягкой озимой пшеницы сорта Скипетр. Эффект удобрения сравнивали с отрицательным (без удобрения) и положительным («Новосил») контролем. В ходе работы была найдена оптимальная концентрация раствора для обработки выбранным методом, составляющая 2,6 мл/л, что эквивалентно 20% от рекомендованной производителем (13 мл/л). При обработке раствором данной концентрации наблюдалось незначительное уменьшение всхожести семян, а проведенные через 7 дней учеты параметров роста показали увеличение длины листа на 15–20%. Наблюдается незначительное уменьшение количества корней (на 10%) и разветвления корневой системы, что предположительно связано с доступностью компонентов, входящих в состав удобрения. Исследовано влияние препарата на фотосинтетический аппарат, ассимиляцию углекислого газа и интенсивность транспирации при применении в диапазоне концентраций (100%, 20%, 0%). В среднем интенсивность дыхания усиливалась в 2 раза в варианте с рабочей концентрацией и в 1,8 раза в варианте с 1/5 от рабочей концентрации. Выявлено небольшое увеличение эффективности нефотохимического тушения флуоресценции у растений с добавлением «АктиМакс». Показана эффективность использования метода праймирования семян для стимулирования скорости развития озимой пшеницы, что уменьшает риски неблагоприятных исходов.

Ключевые слова: физиологические процессы, праймирование, озимая пшеница, магниевые удобрения, флуоресценция хлорофилла, транспирация

Для цитирования: Захаров Д.А., Степанова Е.В., Иваночкин И.А. Применение магнийсодержащих удобрений способом праймирования для регуляции физиологических процессов у озимой пшеницы. *Аграрная наука*. 2024; 387(10): 122–127.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-122-127>

Application of magnesium-containing fertilizers by priming method for regulation of physiological processes in winter wheat

ABSTRACT

The studying the efficiency of new magnesium-containing fertilizer “AktiMax” use for priming soft winter wheat seeds of the “SkipeTr” variety. The effect of the fertilizer is compared with the negative (no fertilizer) and positive (“Novosil”) controls. During the study, the optimal concentration 2.6 ml/l of the solution for processing by the selected method is found, which is equivalent to 20% of the recommended by the manufacturer (13 ml/l). At treating with a solution of this concentration, a slight decrease in seed germination is observed, and growth parameter records taken after 7 days showed an increase in leaf length by 15–20%. A slight decrease in the number of roots (by 10%) and branching of the root system is observed, which is presumably due to the availability of the fertilizer components. The effect fertilizer on the photosynthetic apparatus, carbon dioxide assimilation and transpiration rate when use in a range of concentrations is studied. On average, the transpiration activity increased by 2 times in the variant with the working concentration and by 1.8 times in the variant with one fifth of the working concentration. A slight increase in the efficiency of non-photochemical fluorescence quenching is revealed in plants at the “AktiMax” application. The efficiency of seed priming method use to stimulate the rate of winter wheat development is demonstrated that leads to reduction of unfavorable outcomes risks.

Key words: physiological processes, priming, winter wheat, magnesium fertilizers, chlorophyll fluorescence, transpiration

For citation: Zakharov D.A., Stepanova E.V. Ivanochkin I.A. Application of magnesium-containing fertilizers by priming method for regulation of physiological processes in winter wheat. *Agrarian science*. 2024; 387(10): 122–127 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-122-127>

Введение/Introduction

Магний играет решающую роль во многих метаболических процессах растений, включая фотосинтез, поглощение и транспорт фосфора, синтез аминокислот и белков, повышает их стрессоустойчивость [1]. Ионная форма этого элемента (Mg^{2+}) присоединяется к коллоидным частицам в почве и доступна для усвоения корнями растений. При его недостатке на листьях могут появиться хлоротичные или некротические пятна. Эти пожелтевшие листья развиваются в пятнистые участки отмершей ткани, вследствие которых края листьев скручиваются. Магний сравнительно хорошо реутилизируется, поэтому первые признаки его недостатка появляются на нижних или старых листьях [2]. Один из методов устранения дефицита Mg — внесение удобрений, его содержащих.

В сельскохозяйственной практике используются два основных способа внесения магниевых удобрений:

первый (классический метод) — внесение в почву удобрений с использованием извести (оксида или карбоната) для кислых почв и сульфатной формы (кизерита) для почв с оптимальным pH. Поглощение магния растениями не является проблемой при условии содержания его доступной формы в почве, по крайней мере среднего класса [3];

второй — внекорневая подкормка. Нанесение жидкого удобрения при помощи распыления на листья — широко используемый метод во всем мире. Особенно эффективен при использовании удобрений в наноформе [4].

Ключевой задачей для фермеров, использующих растворимые удобрения Mg (в форме сульфатов или хлоридов), является определение нормы, методов и времени — стадии роста растений при внесении удобрений для повышения усвояемости растениями.

Эффективная система применения магниевых удобрений должна быть ориентирована на повышение эффективности использования азота (N). С развитием технологий возделывания сельскохозяйственных культур и изучением механизма поглощения элементов питания исследователи начали подробнее изучать потенциал способа применения удобрений — замачивание или праймирование посевного материала перед посевом. Так, применение этого способа с сульфатами магния достоверно повышает всхожесть и длину проростков различных культур [5]. Всхожесть ячменя повышалась на 5–7% при выдерживании в 1%-ном растворе [6].

Применение магниевых удобрений в зависимости от метода внесения и концентрации может давать как положительный эффект, так и вызывать стресс у растений [7]. Например, использование наночастиц Mg оказывает различное воздействие (окислительный стресс, изменения pH ингибирования синтеза фитогормонов) на многие культуры, повышая всхожесть и скорость роста при одних дозировках и вызывая ингибирование ростовых процессов при других [8].

В настоящее время опубликовано ограниченное число работ, посвященных изучению действия магниевых удобрений на озимую пшеницу [9, 10]. Здесь впервые исследуется воздействие жидкого удобрения «АктиМакс» на озимую пшеницу *Triticum aestivum* L. Данный выбор обусловлен тем, что удобрение создано на основе экологичного природного сырья — брусита, имеет высокое содержание магния (33%) и уже показало свою эффективность при проведении внекорневых подкормок яровой пшеницы [11].

На момент написания публикации существуют две формы выпуска удобрения «АктиМакс» — гранулированная и суспензионная¹. Гранулированная форма используется для внесения в почву перед посадкой, и, по данным производителя, попадая в кислые почвы, гранулы начинают растворяться и снабжать растения питательными веществами на протяжении всего сезона.

Суспензионная форма разработана для приготовления растворов и применения в качестве внекорневых подкормок. По рекомендации производителя, удобрение лучше всего применять после появления первых всходов (фаза кущения, 3–4-й лист, фаза бутонизации и т. д.).

Помимо внекорневого внесения, суспензионная форма может быть применена для замачивания семян перед посевом. Замачивание или праймирование имеет ряд преимуществ перед другими типами использования удобрений: низкий расход, увеличение всхожести, повышение начальной энергии роста, повышение устойчивости к различным стрессовым факторам [12, 13].

Цель работы — оценить влияние магниесодержащего удобрения «АктиМакс» на физиологические параметры озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Скипетр.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Лабораторный опыт проводился в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва, Россия) в 2023 году.

В качестве исследуемого объекта выступала мягкая озимая пшеница *Triticum aestivum* L. сорта Скипетр (код сорта: 9553093). Данный сорт является среднеспелым, устойчив к полеганию, засухе, грибковым заболеваниям.

В качестве магниесодержащего удобрения для праймирования использовали «АктиМакс» (Brucite+, Россия) в суспензионной форме. По данным производителя, это удобрение содержит следующие элементы и их концентрации: магний (Mg) — 20,9% (в пересчете на MgO — 33%), азот (N) — 3,8%, кальций (Ca) — не более 1,3%, железо (Fe) — не более 0,06%.

Для сравнения результатов использовали отрицательный контроль (вода) и биологический регулятор роста «Новосил» (ООО «ТерраМастер», Россия) как широко используемый и хорошо зарекомендовавший себя препарат [14].

Для выявления морфологических параметров использовали метод проращивания в рулонах по ГОСТ 12038-84². Метод использовался ранее в опубликованном исследовании Д.А. Захарова, С.В. Извекова [15].

Для проращивания семян нарезали полоски фильтровальной бумаги шириной 15 см и длиной 52 см. Полоски складывали пополам, затем разворачивали, увлажняли, и рядами раскладывали зерна зародышем вниз (5 см от края бумаги). На каждый лист помещали семена одной повторности (по три повторности на каждый вариант) — 25 зерен на каждую повторность. Их предварительно обрабатывали 1%-ным раствором $KMnO_4$ в течение 10 минут. Семена покрывали второй частью полоски, полоски аккуратно сворачивали в рулон, который вертикально ставили в сосуд объемом 500 мл, на дно сосуда наливали 10 мл раствора необходимой концентрации. Сосуд закрывали крышкой, оставляя отверстие для терморегуляции и сохранения общей влажности. Проращивали в условиях температурного цикла 24/14 °C (день/ночь). Первые пять суток опытные

¹ <https://brucite.plus/catalog/agromag/>

² ГОСТ Р 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартинформ. 2011; 29.

сосуды выдерживали в темном помещении, в последующие — при тех же температурных условиях с естественным освещением.

Схема опыта представлена в таблице 1. Приведенные концентрации растворяли в подготовленной воде (система очистки воды Milli-Q, Millipore).

Спустя 7 дней опыт завершили и произвели подсчет результатов. Морфометрический учет проводился с помощью сканера и программного обеспечения Digimizer (MedCalc, Бельгия).

Для определения статистически значимых различий между группами растений был проведен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с использованием критерия Стьюдента (t-тест) для независимых вариантов. Разница считалась статистически значимой, если $p \leq 0,05$.

Эксперимент проводился в трехкратной повторности в разное время (цикл — месяц) с сохранением всех условий культивирования для репрезентативности выборки.

Измерение транспирации, ассимиляции и параметров флуоресценции хлорофилла измеряли на газоанализаторе GFS-3000 (Waltz, Eichenring, Effeltrich, Германия) с модулем DUAL-PAM-100 [16]. Измерения проводили в измерительной кювете на листьях при температуре 25 °C и влажности 65% в ламинарном потоке CO₂ — 400 μmol с концентрацией 200 ppm.

Перед измерениями испытуемые растения проходили темновую адаптацию в течение часа. Растения помещали (на 1 час) в полностью темную комнату с поддерживаемой температурой 25 °C и влажностью 60–65%. После адаптации листья растения помещали в кювету GFS-3000 на 15 мин. для обеспечения полной релаксации всех фотоиндуцированных процессов и стабилизации параметров внутри кюветы. Данную процедуру проделывали для растений у всех вариантов опыта.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты морфометрического анализа (рис. 1, 2) показали положительную реакцию культуры на праймирование семян препаратом «АктиМакс». Наибольшее влияние оказало использование 20% от рекомендуемой производителем концентрации.

На рисунке 1 представлен график влияния концентрации удобрения на длину листа. Стимулятор роста «Новосил» в двух концентрациях (100% и 200%) не оказал существенного влияния на изучаемый параметр, что подтверждается рядом исследований [17, 18].

Использование малых концентраций удобрения «АктиМакс» (5%, 10% 15%) несущественно повышало длину листа — на 3–6%. Варианты 100%, 25%, 20% показали увеличение длины листа в среднем на 13%.

Показатели длины корневой системы представлены на рисунке 2. Использование стимулятора роста «Новосил» (в концентрациях 100% и 200%) и «АктиМакс» (в малых концентрациях — 5%, 10%) существенно не повлияло на длину корневой системы.

Увеличение концентраций исследуемого удобрения (15%, 20%, 25%, 100%) позволило наблюдать достоверное уменьшение длины корневой системы на 15%, 17%, 20% и 30% соответственно, что может служить индикатором достаточного питания [19].

Длина coleoptили достоверно не изменилась у всех исследуемых вариантов (табл. 2). Количество корешков достоверно уменьшилось на 30% у варианта с использованием рабочей концентрации (100%). В остальных случаях различия статистически несущественны.

Таблица 1. Схема опыта

Table 1. Experimental scheme

Концентрация, мл/л	Название варианта, %
<i>H₂O</i>	
10 мл	Контроль
«АктиМакс»	
13*	100
3,25	25
2,6	20
1,95	15
1,3	10
0,65	5
«Новосил»	
0,3*	100
0,6	200

Примечание: * рабочая концентрация от производителей согласно инструкции.

Рис. 1. Зависимость длины листовой части озимой пшеницы от концентрации удобрения «АктиМакс» и стимулятора роста «Новосил» спустя неделю вегетации ($n = 3, X \pm SE$)
Примечание: * показаны статистически значимые результаты $p \leq 0,05$.

Fig. 1. Dependence of the length of the leaf part of winter wheat on the concentration of the fertilizer "Actimax" and the growth stimulant "Novosil" after a week of vegetation ($n = 3, X \pm SE$)
Note: * Statistically significant results $p \leq 0.05$ are shown.

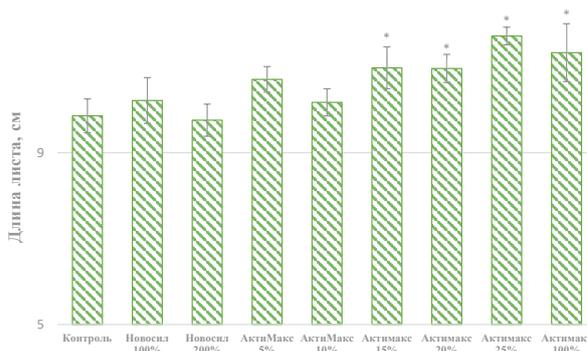
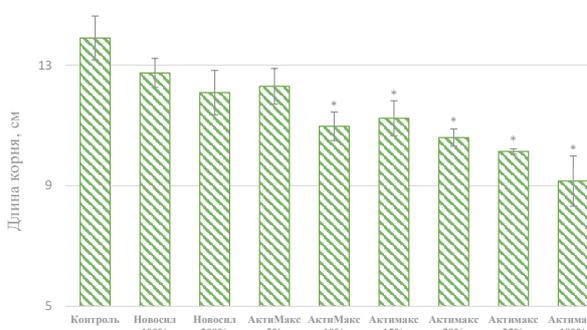


Рис. 2. Зависимость длины корневой части озимой пшеницы от концентрации удобрения «АктиМакс» и стимулятора роста «Новосил» спустя неделю вегетации ($n = 3, X \pm SE$)
Примечание: * показаны статистически значимые результаты $p \leq 0,05$.

Fig. 2. Dependence of the length of the root part of winter wheat on the concentration of the fertilizer "Actimax" and the growth stimulant "Novosil" after a week of vegetation ($n = 3, X \pm SE$)
Note: * Statistically significant results $p \leq 0.05$ are shown.



Семена используемого сорта «Скипетр» имели начальную всхожесть на уровне 86%. Обработка семян препаратом «АктиМакс» не способствовала повышению всхожести, немного снижая ее (до 80–85%), однако (по результатам t-теста) полученные данные не являются статистически значимыми.

Таблица 2. Результаты исследования влияния различных концентраций препаратов на морфометрические параметры пшеницы ($n = 3, X \pm SE$)

Table 2. Results of the study of the different concentrations effect of preparations on wheat morphometric parameters ($n = 3, X \pm SE$)

Название концентрации	Контроль, %	«Новосил», %		«АктиМакс», %					
	0	100	200	100	25	20	15	10	5
Длина coleoptilia, см	4,3±0,07	4,3±0,1	4,2±0,2	4,3±0,4	4,3±0,4	4,6±0,4	4,4±0,3	4,1±0,1	4,2±0,3
Всхожесть, %	86,6±5	81,3±5,3	76±4,6	85,3±4,8	80±2,3	86,6±4,8	80,0±2,3	84±7,0	81,3±2
Количество корешков, шт.	4,4±0,5	4,1±0,4	3,9±0,4	3,1±0,4	4,0±0,5	4,9±0,5	3,9±0,51	3,8±0,5	3,9±0,7

Рис. 3. А) эффективный квантовый выход ФС I; Б) эффективность нефотохимического тушения флуоресценции; В) эффективный квантовый выход фотохимии ФС II; Г) скорость линейного переноса электрона в фотосистеме II

Примечание: * показаны статистически значимые результаты $p \leq 0.05$.

Fig. 3. A) the effective quantum yield of FS I; B) the efficiency of non-photochemical fluorescence quenching; C) the effective quantum yield of photochemistry of FS II; D) the rate of linear electron transfer in photosystem II

Note: * Statistically significant results $p \leq 0.05$ are shown.

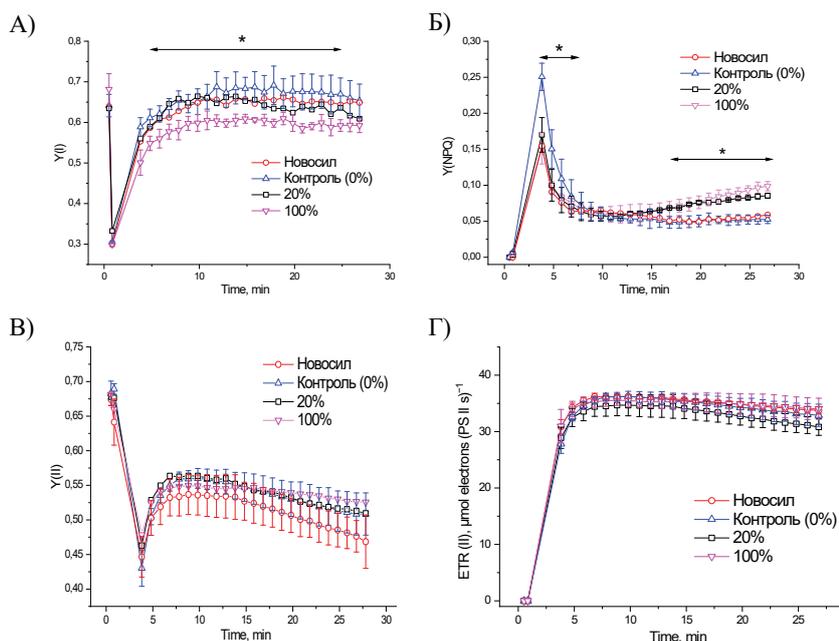


Таблица 3. Результаты измерения газообмена в листьях озимой пшеницы:

А — ассимиляция углекислого газа; Е — интенсивность транспирации ($n = 3, X \pm SE$)

Table 3. The results of measuring gas exchange in winter wheat leaves: A — carbon dioxide assimilation; E — transpiration intensity ($n = 3, X \pm SE$)

Показатель	Время	Контроль	«Новосил»	«АктиМакс», 100%	«АктиМакс», 20%
A, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0 мин.	-1,302 ± 0,040	-0,856 ± 0,005	-0,628 ± 0,004	-0,839 ± 0,042
	20 мин.	1,261 ± 0,008	1,610 ± 0,009	1,615 ± 0,005	1,668 ± 0,012
E, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0 мин.	0,825 ± 0,001	0,485 ± 0,020	0,583 ± 0,060	0,573 ± 0,011
	20 мин.	2,800 ± 0,060	2,354 ± 0,080	2,441 ± 0,060	2,511 ± 0,071

Увеличение длины первого листа позволило продолжить исследование в направлении возможного повышения активности фотосинтетического аппарата, так как в составе удобрения содержится Mg, а при его добавлении происходит повышение содержания хлорофилла и эффективности фотосинтеза [20].

В дальнейших обсуждениях будут использованы 4 варианта, имеющие значимые отклонения от контрольного варианта опыта: эталон — «Новосил», H₂O — контроль, 100% — рабочая концентрация удобрения, 20% от рабочей концентрации.

Использование ПАМ-флюориметрии позволяет оценить некоторые процессы, протекающие в фотосинтетическом аппарате. В данном исследовании измерялась часть параметров, позволяющих подтвердить повышение или понижение продуктивности фотосинтеза (рис. 3).

Максимальный фотохимический квантовый выход фотосистемы II (ФС II) адаптированных к темноте листьев (Fv/Fm) у всех вариантов опыта составлял 0,64, что является достаточно низким значением и указывает на недоразвитость фотосинтетического аппарата. Возможным объяснением этому результату могут служить долгое нахождение растений в темном боксе и малое время нахождения при световом дне, что послужило низкому синтезу компонентов ФС.

Эффективный квантовый выход ФС II (Y(II)), ФС I (Y(I)) и скорость электронов на транспортной цепи на Y(II) (Electron Transport Rate, ETR II) снижены и не имеют статистических различий между вариантами. Однако квантовый выход фотоиндуцированного нефотохимического тушения флуоресценции (Y(NPQ)), направленный на защиту фотосинтетического аппарата от света высокой интенсивности, между вариантами различен. Контроль показал лучший результат защитной реакции на воздействие интенсивным светом в моменте (до 5 мин.), но при долгом воздействии света (от 15 мин.) обработка удобрением показала значимый положительный результат.

По результатам исследования фотосистем проростков пшеницы было установлено, что на эффективность фотосинтеза большого значимого эффекта использованные в опыте препараты не оказали. Однако за счет улучшений в работе

комплекса, отвечающего за нефотохимическое тушение, повышается устойчивость к высокой интенсивности света.

Измерения газообмена в листьях пшеницы проводили на растениях, адаптированных в темноте в течение часа ($\lambda = 625 \text{ nm}$, $200 \mu\text{mol}$ фотонов $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), в течение 20 мин. Цель — выявить интенсивность поглощения CO₂ (A) и интенсивность транспирации (E). Результаты представлены в таблице 3.

Выбирались две точки для учета параметров — в первую минуту включения света (0 мин.) и спустя время адаптации к свету в течение 20 мин.

Интенсивность ассимиляции углекислого газа в листьях пшеницы в вариантах с обработкой удобрениями достоверно выше, чем в контроле. Как в начале, так и в конце измерения.

Вариант с использованием рабочей концентрации «АктиМакс» (100%) показал наибольший результат ($-0,62 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), что в два раза выше, чем в контрольном варианте. Это говорит об ослаблении интенсивности дыхания в темновой фазе (0 мин.). В световой фазе (20 мин.) интенсивность ассимиляции CO_2 в вариантах с добавлением удобрения достоверно увеличивается (на 30–35%) по сравнению с контролем.

Интенсивность транспирации у контрольных растений составляет $0,825 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, что на 80% выше, чем в других вариантах опыта в начале измерений (0 мин.). По прошествии 20 мин. интенсивность транспирации контрольного варианта опыта становится выше на 20–25%, что коррелирует с интенсивностью обмена CO_2 .

Выводы/Conclusions

В ходе анализа результатов эксперимента выявлено, что исследуемое магниесодержащее удобрение при

использовании его методом праймирования улучшает ростовые показатели проростков озимой пшеницы в среднем на 15–20% по сравнению с контрольным вариантом без обработки. Удобрение при использовании средних концентраций ($20 \pm 5\%$ от рабочей) оказывает положительное влияние на развитие озимой пшеницы.

Достоверно показано, что при использовании исследуемого удобрения методом праймирования в рабочей концентрации (100%) и в концентрации 20% виден существенный положительный эффект на увеличение длины листа, развитие фотосистемы и размер корневой системы.

Исследование фотосинтетического аппарата показало, что использование удобрения позволяет незначительно уменьшить фотоингибирование, дополнительно оказывая положительное влияние на газообмен в листьях, усиливая дневную ассимиляцию углекислого газа на 20–25%.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ahmed N. *et al.* The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14: 1285512. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1285512>
- Alnaass N.S., Agil H.K., Ibrahim H.K. Use of fertilizers or importance of fertilizers in agriculture. *International Journal of Advanced Academic Studies*. 2021; 3(2-A): 52–57. <https://doi.org/10.33545/27068919.2021.v3.i2a.770>
- Potarzycki J., Grzebisz W., Szczepaniak W. Magnesium Fertilization Increases Nitrogen Use Efficiency in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*. 2022; 11(19): 2600. <https://doi.org/10.3390/plants11192600>
- Semenova N.A., Burmistrov D.E., Shumeyko S.A., Gudkov S.V. Fertilizers Based on Nanoparticles as Sources of Macro- and Microelements for Plant Crop Growth: A Review. *Agronomy*. 2024; 14(8): 1646. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081646>
- Неверов А.А. Стимулирующий эффект сульфата магния на стадии прорастания семян сельскохозяйственных культур. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021; (1): 74–78. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-74-78>
- Прокина Л.В., Пугаев С.П. Использование макро- и микроудобрений в посевах ячменя в полевом севообороте на черноземе выщелоченном. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023; 24(3): 440–447. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.440-447>
- Khalid U. *et al.* Comparative effects of conventional and nano-enabled fertilizers on morphological and physiological attributes of *Caesalpinia bonducella* plants. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2022; 21(1): 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.06.011>
- Salas-Leiva J.S., Luna-Velasco A., Salas-Leiva D.E. Use of magnesium nanomaterials in plants and crop pathogens. *Journal of Nanoparticle Research*. 2021; 23: 267. <https://doi.org/10.1007/s11051-021-05337-8>
- Аканова Н.И., Козлова А.В., Мухина М.Т. Роль магния в системе питания растений. *Агрохимический вестник*. 2021; (6): 66–72. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-014>
- Пшеничная Е.А. Технология возделывания пшеницы с применением стимулятора роста на примере ООО «Силач». *Вестник Омского государственного университета*. 2021; (1–2): 408–413. https://doi.org/10.52754/16947452_2021_1_2_408
- Аканова Н.И., Аканов Э.Н., Козлова А.В. Эффективность магниесодержащих удобрений на продуктивность яровой пшеницы. *Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса юга России. Материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием)*. Майкоп. 2020; 204–209. <https://www.elibrary.ru/yvixnv>
- Choudhary S.K. *et al.* Seed Priming with $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ and ZnSO_4 Salts Triggers the Germination and Growth Attributes Synergistically in Wheat Varieties. *Agronomy*. 2021; 11(11): 2110. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112110>
- Srivastava A.K., Siddique A., Sharma M.K., Bose B. Seed Priming with Salts of Nitrate Enhances Nitrogen use Efficiency in Rice. *Vegetos*. 2017; 30(4): 99–104. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2017.00199.9>
- Izvekov S. *et al.* Research on nature-like and high-tech means to enhance winter wheat growth and development. *E3S Web of Conferences*. 2023; 462: 02045. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346202045>

REFERENCES

- Ahmed N. *et al.* The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14: 1285512. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1285512>
- Alnaass N.S., Agil H.K., Ibrahim H.K. Use of fertilizers or importance of fertilizers in agriculture. *International Journal of Advanced Academic Studies*. 2021; 3(2-A): 52–57. <https://doi.org/10.33545/27068919.2021.v3.i2a.770>
- Potarzycki J., Grzebisz W., Szczepaniak W. Magnesium Fertilization Increases Nitrogen Use Efficiency in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*. 2022; 11(19): 2600. <https://doi.org/10.3390/plants11192600>
- Semenova N.A., Burmistrov D.E., Shumeyko S.A., Gudkov S.V. Fertilizers Based on Nanoparticles as Sources of Macro- and Microelements for Plant Crop Growth: A Review. *Agronomy*. 2024; 14(8): 1646. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081646>
- Neverov A.A. The stimulating effect of magnesium sulfate at the stage of seed germination of agricultural crops. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; (1): 74–78 (in Russian). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-87-1-74-78>
- Prokina L.N., Pugaev S.V. The use of macro and micro fertilizers in barley crops in field crop rotation on leached chernozem. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023; 24(3): 440–447 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.440-447>
- Khalid U. *et al.* Comparative effects of conventional and nano-enabled fertilizers on morphological and physiological attributes of *Caesalpinia bonducella* plants. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2022; 21(1): 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.06.011>
- Salas-Leiva J.S., Luna-Velasco A., Salas-Leiva D.E. Use of magnesium nanomaterials in plants and crop pathogens. *Journal of Nanoparticle Research*. 2021; 23: 267. <https://doi.org/10.1007/s11051-021-05337-8>
- Akanova N.I., Kozlova A.V., Mukhina M.T. Magnesium role in plant nutrition system. *Agrochemical Herald*. 2021; (6): 66–72 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-014>
- Pshenichnaya E.A. Technology of wheat cultivation with the use of a growth stimulator on the example of LLC "Silach". *Bulletin of Osh State University*. 2021; (1–2): 408–413 (in Russian). https://doi.org/10.52754/16947452_2021_1_2_408
- Akanova N.I., Akanov E.N., Kozlova A.V. Efficiency of magnesium-containing fertilizers on the productivity of spring wheat. *State and development prospects of the agro-industrial complex of the South of Russia. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference (with international participation)*. Maykop. 2020; 204–209 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yvixnv>
- Choudhary S.K. *et al.* Seed Priming with $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ and ZnSO_4 Salts Triggers the Germination and Growth Attributes Synergistically in Wheat Varieties. *Agronomy*. 2021; 11(11): 2110. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112110>
- Srivastava A.K., Siddique A., Sharma M.K., Bose B. Seed Priming with Salts of Nitrate Enhances Nitrogen use Efficiency in Rice. *Vegetos*. 2017; 30(4): 99–104. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2017.00199.9>
- Izvekov S. *et al.* Research on nature-like and high-tech means to enhance winter wheat growth and development. *E3S Web of Conferences*. 2023; 462: 02045. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346202045>

15. Zakharov D. *et al.* Research into the influence of organic and inorganic compounds on the development of winter wheat. *E3S Web of Conferences*. 2023; 462: 02042.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346202042>

16. Paskhin M.O. *et al.* Ruby Nanoparticles for Greenhouse Farming: Synthesis, Features and Application. *Journal of Composites Science*. 2024; 8(1): 7.
<https://doi.org/10.3390/jcs8010007>

17. Кошеляев В.В., Кошеляева И.П., Кудин С.М. Селекционно-семеноводческие аспекты защиты агрофитоценозов пшеницы и ячменя в условиях лесостепи Среднего Поволжья. Монография. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2018; 248.
 ISBN 978-5-94338-932-0
<https://www.elibrary.ru/yinnvr>

18. Князева Т.В. Регуляторы роста растений в Краснодарском крае. Монография. Краснодар: ЭДВИ. 2013; 128.
 ISBN 978-5-901957-94-3

19. Шилова И.И. Корневые системы многолетних злаковых растений в условиях шламowego отвала Уральского алюминиевого завода. *Растения и промышленная среда*. Свердловск: УрГУ. 1970; 2: 129–152.

20. Pathak A., Kaur R., Thakur N. Germination studies and biochemical profile in seeds of wheat exposed to magnesium nanoparticles. *International Journal Of Pharmaceutical Sciences And Research*. 2021; 12(12): 6638–6641.
[https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.12\(12\).6638-41](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.12(12).6638-41)

15. Zakharov D. *et al.* Research into the influence of organic and inorganic compounds on the development of winter wheat. *E3S Web of Conferences*. 2023; 462: 02042.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346202042>

16. Paskhin M.O. *et al.* Ruby Nanoparticles for Greenhouse Farming: Synthesis, Features and Application. *Journal of Composites Science*. 2024; 8(1): 7.
<https://doi.org/10.3390/jcs8010007>

17. Koshelyayev V.V., Koshelyaeva I.P., Kudin S.M. Breeding and seed production aspects of protecting wheat and barley agrophytocenoses in the forest-steppe conditions of the Middle Volga region. Monograph. Penza: Penza State Agrarian University. 2018; 248 (in Russian).
 ISBN 978-5-94338-932-0
<https://www.elibrary.ru/yinnvr>

18. Knyazeva T.V. Plant growth regulators in Krasnodar Krai. Monograph. Krasnodar: EDVI. 2013; 128 (in Russian).
 ISBN 978-5-901957-94-3

19. Shilova I.I. Root systems of perennial cereal plants in the conditions of the sludge dump of the Ural Aluminum Plant. *Plants and industrial environment*. Sverdlovsk: Ural State University. 1970; 2: 129–152 (in Russian).

20. Pathak A., Kaur R., Thakur N. Germination studies and biochemical profile in seeds of wheat exposed to magnesium nanoparticles. *International Journal Of Pharmaceutical Sciences And Research*. 2021; 12(12): 6638–6641.
[https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.12\(12\).6638-41](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.12(12).6638-41)

ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Алексеевич Захаров

младший научный сотрудник
 zaharov121221@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-7584-0295>

Евгения Вячеславовна Степанова

кандидат физико-математических наук
 jacky-st@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3508-8642>

Илья Алексеевич Иваночкин

младший научный сотрудник
 ivanochkin_2005@mail.ru

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
 ул. им. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Dmitry Alekseevich Zakharov

Junior Research Assistant
 zaharov121221@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-7584-0295>

Evgeniya Vyacheslavovna Stepanova

Candidate of Physical and Mathematical Sciences
 jacky-st@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3508-8642>

Ilya Alekseevich Ivanochkin

Junior Researcher
 ivanochkin_2005@mail.ru

Prokhorov General Physics Institute,
 38 Vavilov Str., Moscow, 119991, Russia



Достойное вознаграждение за привлеченную рекламу от ИД «Аграрная наука»

Вы



- общительны и активны
- владеете связями в сфере АПК
- есть время и желание
- хотите заработать

Мы гарантируем

- интересную работу по привлечению рекламы в проекты ИД
- свободный, удобный график
- официальное оформление
- щедрый % за принесенную вами рекламу

Звоните +7 (916) 616-05-31

Реклама

АГРОНОМИЯ