

ВЛИЯНИЕ ФОРМ И КОНЦЕНТРАЦИЙ НА ВЫМЫВАЕМОСТЬ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Н. Е. Сосновская, О. Г. Красноберская, В. А. Ракович

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Изучено влияние форм и концентраций микроэлементов в составе гранулированных органоминеральных удобрений на их переход из гранул в водный экстракт и его биологическую (ростстимулирующую) активность для обоснования составов и технологии получения новых видов органоминеральных удобрений. Показаны существенное различие в величине перехода микроэлементов из солевой и хелатной формы гранул комплексных гранулированных удобрений (КГУ) в водорастворимую, доступную для растений форму и влияние на нее температурной обработки гранул.

Обнаружено, что при использовании меди и цинка в виде неорганической соли максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечена для их низких концентраций при температуре сушки гранул КГУ 90–125 °С, для высоких концентраций – при 110 °С. При использовании меди в виде хелата максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечена для низкой и высокой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 25 °С, для средних концентраций – при 90–110 °С. При использовании хелата цинка максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечена для низкой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 125 °С, для высокой концентрации – при 110 °С.

Ключевые слова: гранулированные органоминеральные удобрения; микроэлементы; вымываемость; биологическая (ростстимулирующая) активность.

Для цитирования. Сосновская Н. Е., Красноберская О. Г., Ракович В. А. Влияние форм и концентраций на вымываемость микроэлементов и биологическую активность гранулированных органоминеральных удобрений // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 154–163.

THE EFFECT OF FORMS AND CONCENTRATIONS ON THE WATER RESISTANCE OF THE MICROELEMENTS AND BIOLOGIC ACTIVITY OF GRANULATED ORGANOMINERAL FERTILIZERS

N. E. Sosnovskaya, O. G. Krasnoberskaya, V. A. Rakovich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The influence of forms and concentrations of trace elements in the composition of granulated organomineral fertilizers on their transition from granules to aqueous extract and its biological (growth-stimulating) activity was studied to substantiate the compositions and technology for new types of organomineral fertilizers obtaining. A significant difference in the value of the transition of microelements for the salt and chelated forms from granular organomineral fertilizers to the water-soluble form available for plants and the effect of temperature treatment of granules are shown.

It was found that when copper and zinc were used in the form of inorganic salt, the maximum biological (growth-stimulating) activity was observed for low concentrations at the drying temperature of granular organomineral fertilizers at 90–125 °С, for high concentrations – at 110 °С. When using copper in chelate form, the maximum biological (growth-stimulating) activity was observed for low and high concentrations at the drying temperature of granular organomineral fertilizers at 25 °С, for medium concentrations – at 90–110 °С. When using zinc chelate, the maximum biological (growth-stimulating) activity was observed for low concentration at the drying temperature of granular organomineral fertilizers at 125 °С, for high concentration – at 110 °С.

Keywords: granular organomineral fertilizers; microelements; water resistance; biologic (growth-stimulating) activity.

For citation. Sosnovskaya N. E., Krasnoberskaya O. G., Rakovich V. A. The effect of forms and concentrations on the water resistance of the microelements and biologic activity of granulated organomineral fertilizers. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 154–163.

Введение. Все живые организмы нуждаются в микроэлементах для выживания, правильного роста и развития. Микроэлементы необходимы для правильного протекания важнейших физиологических и биохимических процессов развития растений, входят в состав ферментов и витаминов, активируют процессы синтеза углеводов, белкового и жирового обмена веществ, влияют на проницаемость клеточных мембран и повышение эффективности азота, фосфора и калия [1]. В условиях дефицита микроэлементов нарушаются процессы обмена веществ в растениях, задерживается их развитие, снижается устойчивость к неблагоприятным условиям внешней среды и болезням. Микроэлементы влияют не только на растения, но и на некоторые заболевания человека и животных, связанные с недостатком их в продуктах питания и кормах.

Все более широкое применение интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур усиливает важность сбалансированного питания растений макро- и микроэлементами.

Корневое питание удовлетворяет до 90 % потребности в основных элементах, но практически не обеспечивает растение микроэлементами. Причинами этого являются антагонизм элементов, низкое содержание микроэлементов в почве и удобрениях, а также неблагоприятная кислотность почвы. Многие элементы питания доступны для растений в диапазоне значений pH от 5,5 до 7,0. Возрастающая роль микроэлементов в современном сельском хозяйстве Беларуси объясняется также снижением их подвижных форм в почве в связи с отрицательным балансом, обусловленным снижением почвенной кислотности, постоянным выносом урожаями и невнесением микроудобрений в почву.

Содержание ряда микроэлементов в почвах Беларуси не соответствует потребности растений для их нормального роста и развития. Отмечено увеличение площади пашни с низким содержанием меди с 42,2 до 50,9 %, цинка – с 59,7 до 68,4 %. Доля пахотных почв 1-й и 2-й групп обеспеченности, где необходимо применение микроудобрений, высокая и по бору составляет 68,5 %, по меди – 92,3, по цинку – 93,0 % [1].

Критериями потребности растений в микроэлементах являются их содержание в растениях и уровень их содержания в почве. При этом имеет значение не общее (валовое) количество микроэлементов в почве, а наличие подвижных форм, которые в определенной степени определяют доступность для растений. Чаще всего содержание микроэлементов в подвижной форме для меди, молибдена, кобальта и цинка составляет 10–15 % от валового содержания в почве, для бора – 2–4 % [1].

Степень подвижности микроэлементов в почве зависит от реакции среды, состава материнской породы, растительности, микробиологической активности, карбонатности, окислительно-восстановительных свойств, гранулометрического и минералогического состава, содержания гумуса, полуторных окислов, применения комплекса агротехнических мероприятий, особенно водной и химической мелиорации почвы, применения органических и минеральных удобрений.

В число важнейших микроэлементов входят медь и цинк.

Медь участвует в процессах фотосинтеза, углеводном и белковом обмене, способствует лучшему использованию растениями азота, фосфора и калия, повышает устойчивость растений к грибковым и бактериальным заболеваниям [2]. Медь также входит в окислительные ферменты, например, в полифенолоксидазу, активирует синтез витаминов группы B [3].

Недостаток меди снижает синтез белков, нарушает процессы превращения азота, что приводит к резкому снижению урожая и качества зерна. Характерными симптомами заболевания при недостатке меди у злаковых культур являются бледно-зеленая окраска, скручивание листьев, пустозерность и щуплость. На картофеле при дефиците меди листья скручиваются и засыхают, а на томате лист начинает белеть с нижней стороны. У бобовых и крестоцветных культур наблюдается суховершинность. При устранении дефицита меди увеличивается содержание белка в зерне, крахмалов в клубнях, сахара в корнеплодах, жиров в масличных культурах. Улучшаются показатели засухо- и морозоустойчивости, а также устойчивости к полеганию. При скармливании растительных кормов, содержащих малое количество меди, у животных появляются малокровие, рахит, наблюдается выпадение шерсти [4].

Дефицит меди часто совпадает с недостатком цинка и магния, а применение высоких доз азотных удобрений усиливает этот дефицит. Особо требовательны к меди зерновые культуры, рапс, сахарная свекла, лен, кукуруза [2].

Содержание меди в растениях достигает 2–12 мг/кг сухого вещества, вынос урожаями – 10–170 г/га. В почве медь аккумулируется в гумусовом слое и находится в виде органоминеральных комплексов, а частично – в обменно-поглощенном состоянии. Валовое ее содержание в минеральных почвах составляет 0,15–3 мг/100 г, в том числе в дерново-подзолистых почвах – 0,005–0,5 мг/100 г [3]. Безусловно необходимо вносить медные микроудобрения на большинстве торфянистых почв.

По данным агрохимических обследований почв пахотных земель средневзвешенное содержание меди в среднем по республике составляет 1,84 мг/кг, что соответствует оптимальному содержанию, однако доля площади почв, где необходимо применение медьсодержащих удобрений, составляет 86,2–97,8 % [2].

Цинк является составной частью ферментов, например, карбоангидразы, участвует в окислительно-восстановительных процессах, синтезе хлорофилла, углеводном обмене и синтезе белковых веществ в растениях, стимулирует образование ауксинов [2], а также участвует в процессе дыхания и фотосинтеза, повышает водоудерживающую способность клеток.

Недостаток цинка вызывает существенные нарушения белкового и жирового обмена веществ, что приводит к задержке роста растений и уменьшению количества хлорофилла в листьях. Хлороз, вызываемый недостатком цинка, обычно проявляется в виде мелких желтых пятен. У плодовых деревьев появляются белые пятна на листьях, розеточность и мелколистность, укороченность междоузлий, позднее – отмирание ветвей. Плоды либо не образуются, либо имеют уродливую форму [4]. При устранении дефицита отмечается снижение поражения растений грибковыми заболеваниями, повышается сахаристость плодов. Из других культур наиболее чувствительны к недостатку цинка кукуруза и лен.

Потребность растений в цинке усиливается с повышением интенсивности освещения.

Содержание цинка в растениях достигает 15–22 мг/кг сухого вещества, вынос урожаями – 0,075–2,25 кг/га. В почве валовое содержание цинка составляет 2,5–6,5 мг/100 г, в том числе в дерново-подзолистых почвах – 0,012–2 мг/кг [3].

Содержание цинка в пахотных почвах по республике в последнее время снизилось с 3,13 до 2,85 мг/кг, а доля площади пахотных почв, где необходимо внесение цинксодержащих удобрений, составляет 89,4–96,0 % [2].

Дефицит цинка чаще наблюдается на переизвесткованных почвах, а при систематическом применении навоза снижается, так как содержание цинка в нем достигает 96 мг/кг [3].

Необходимо иметь в виду, что медь и цинк относятся к группе тяжелых металлов, поэтому повышение их содержания в почвах не должно превышать соответствующих пороговых значений загрязнения. В связи с этим дозировки микроудобрений и равномерность их внесения по площади поля имеют первостепенное значение, а оптимизация содержания микроэлементов в растениях является актуальной агрономической задачей [5–7].

В настоящее время производство микроудобрений развивается в двух направлениях, таких как производство односторонних микроудобрений в виде индивидуальных солей, хелатов, фриттов и производство комплексных и односторонних макроудобрений, обогащенных микроэлементами.

Односторонние микроудобрения применяют под культуры с сильной недостаточностью какого-либо микроэлемента. Недостатком применения односторонних микроудобрений является трудность внесения в малых дозах, особенно в почву, когда сложно добиться равномерного распределения по поверхности. Односторонние микроудобрения используются в виде хелатов и фриттов, что особенно важно при внесении бора, так как этим исключается воздействие локально высоких концентраций бора на чувствительные культуры.

В связи с вышеизложенным более рациональным является использование основных удобрений, обогащенных микроэлементами. Обогащенные макроудобрения сокращают затраты на внесение, имеют меньшую опасность токсического действия при внесении избыточных доз удобрений, уменьшают загрязнение окружающей среды.

Традиционное применение микроэлементов в виде неорганических солей недостаточно эффективно и менее технологично по сравнению с хелатной формой, которая обладает высокой биологической активностью и обеспечивает лучшую доступность микроэлементов для растений [8]. Одним из способов повышения эффективности микроэлементов в обоих видах является их введение в состав жидких и гранулированных гуминовых удобрений.

Цель работы – исследовать влияние форм и концентраций микроэлементов в составе гранулированных органоминеральных удобрений на их переход из гранул в водный раствор и его биологическую (ростстимулирующую) активность для обоснования составов и технологии получения новых видов органоминеральных удобрений, обеспечивающих экономию питательных веществ за счет уменьшения их вымывания и охрану окружающей среды.

Материалы и методы исследований. С целью создания гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия на основе торфа с содержанием микроэлементов (медь, цинк) в хелатной и солевых формах использовали низинный торф торфяного месторождения Гало-Ковалевское (влажность – 55 %, степень разложения – 35 %). В качестве источника меди и цинка были выбраны соли $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, которые вносили в виде водного раствора в торф. В качестве хелатообразующего агента использовали динатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (Трилон Б). Его вводили в раствор в эквивалентном количестве по отношению к микроэлементу. Содержание Cu^{2+} и Zn^{2+} варьировалось в диапазоне 0,5–3,5 г/кг на сухое вещество гранул комплексных гранулированных удобрений (КГУ). Минеральные компоненты NPK вводили в соотношении 1,5 : 1,0 : 1,5. Полученные смеси тщательно перемешивали и подвергали грануляции. Затем приготовленные гранулы разделяли

на четыре образца, которые сушили до постоянного веса в термостатируемом шкафу при разных температурах: 25 °С, 90 °С, 110 °С и 125 °С.

Для оценки эффективности пролонгированного действия КГУ из полученных удобрений готовили серию растворов в динамическом (промывном режиме), моделирующем вымывание водорастворимых веществ.

Приготовление серии растворов: в колбы на 250 мл помещали навески КГУ, заливали дистиллированной водой с гидромодулем в соотношении 1 : 10 и оставляли настаиваться. Через 24 ч фильтровали через фильтр белая лента, полученный фильтрат использовали для определения pH, оптической плотности (D440) и содержания растворенного микроэлемента. Концентрацию меди и цинка в растворах определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре ZEEnet P методом абсолютных калибровок для соответствующих элементов. После измерения всех показателей снова добавляли к гранулам дистиллированную воду в том же соотношении, оставляли настаиваться на 72 ч. Затем фильтровали и определяли показатели, повторяли аналогично с промежутком настаивания еще 168 ч. Общее время оценки перехода микроэлемента в водный раствор составляло 432 ч. Вымываемость микроэлемента (%) рассчитывали по формуле

$$C_p / C_{исх} \cdot 100,$$

где C_p – концентрация микроэлемента в водном растворе за время экспозиции, мг/л; $C_{исх}$ – концентрация микроэлемента в гранулах КГУ, г/кг.

Для определения биологической активности гранул КГУ семена озимой ржи сорта Паўлінка в чашках Петри обрабатывали 10 мл разбавленных растворов и помещали в термостат при температуре 25 °С. Повторность опыта – трехкратная. Контрольный вариант обрабатывали 10 мл дистиллированной воды. На 3-й день эксперимента определяли энергию прорастания семян, на 7-й день – всхожесть.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования показали (рис. 1, а), что минимальная вымываемость ионов меди в солевой форме из гранул КГУ за 432 ч экспозиции в промывном режиме для всех диапазонов концентрации наблюдается при температуре сушки гранул 25 °С и колеблется в пределах 2,5–3,1 %. Увеличение температуры сушки гранул до 90 °С повышает величину перехода ионов меди в водорастворимую форму до 8,7–10,6 % для всех диапазонов содержания микроэлемента в КГУ. Наблюдается некоторое снижение вымываемости ионов меди из гранул, полученных при температуре сушки 125 °С, которая составляет 8,4–8,8 %. Это может быть связано с более прочным закреплением меди в гранулах КГУ с ростом температуры термической обработки. Максимальный переход ионов меди в водные экстракты отмечен при ее содержании 1,5 мг/г КГУ, температуре сушки 110 °С и составляет 11,6 %. Полученная зависимость перехода ионов меди в водные экстракты свидетельствует о том, что через 18 сут в динамическом режиме промывки около 90 % ионов меди остается в гранулах КГУ. Таким образом, подтверждается пролонгированность процесса перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты в доступной для растений форме.

Результаты исследования показали (рис. 1, б), что вымываемость иона меди из гранул КГУ в хелатной форме в 7–25 раз выше, чем для солевой, что свидетельствует о переходе микроэлемента в водорастворимую форму и доступности его для растений. Минимальная вымываемость за 432 ч экспозиции наблюдается при температуре сушки 125 °С и увеличивается от 57,3 до 73,5 % с ростом содержания микроэлемента в гранулах КГУ. Это может быть связано с более прочным закреплением меди в гранулах КГУ при более высокой температуре термической обработки.

Уменьшение температуры сушки гранул до 90 °С повышает величину перехода меди в водорастворимую форму до 74,0–86,0 % для диапазона содержания микроэлемента 0,5–2,5 мг/г в КГУ. При содержании меди в хелатной форме 3,5 мг/г в КГУ наблюдается некоторое снижение вымываемости ионов меди из гранул, полученных при всех температурах сушки, которая составляет 73,5–76,4 %. Максимальный переход ионов меди в водные экстракты отмечен при ее содержании 0,5 мг/г КГУ, температуре сушки 90 °С и составляет 86,0 %. Полученная зависимость перехода ионов меди в водные экстракты свидетельствует о том, что через 18 сут в динамическом режиме промывки около 75–86 % ионов меди вымывается из КГУ. Таким образом, эффект пролонгированности процесса перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты для хелатной формы меди значительно ниже, чем для солевой формы меди.

На рис. 2, а представлена зависимость вымываемости ионов цинка от содержания цинка в гранулах КГУ, высушенных при температурах 25 °С, 90 °С, 110 °С и 125 °С. Результаты исследования показали, что минимальная вымываемость за 432 ч экспозиции для всех диапазонов концентрации наблюдается при температуре сушки 90–125 °С и колеблется в пределах 1,5–2,3 %. Это может быть связано с прочным закреплением цинка в гранулах КГУ с ростом температуры термической обработки.

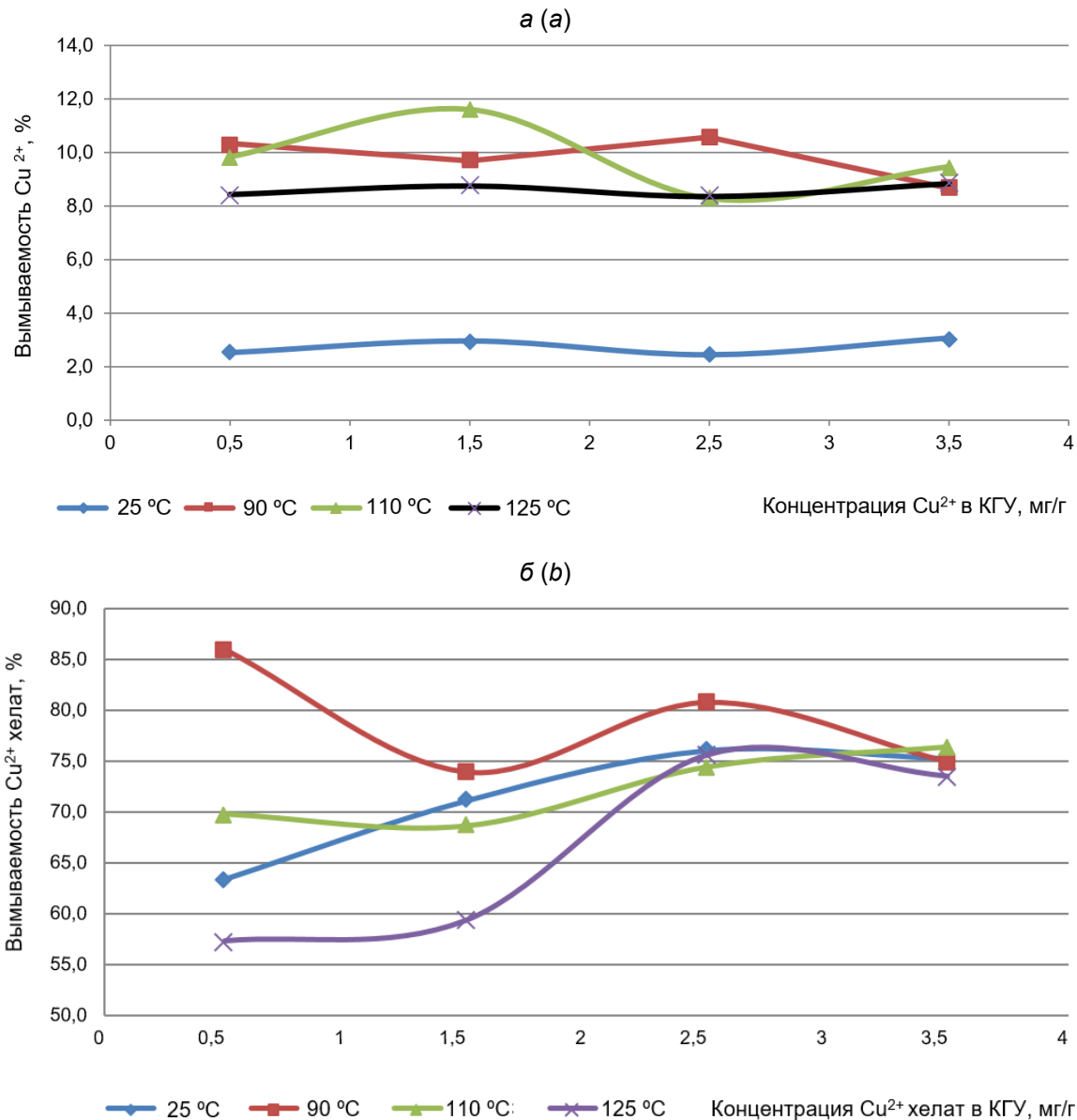


Рис. 1. Зависимость вымываемости ионов меди в солевой (а) и хелатной (б) фориз гранул КГУ от содержания меди в них при температуре сушки 25 °С, 90 °С, 110 °С и 125 °С за время экспозиции 432 ч

Fig. 1. Dependence of copper ions extraction in salt (a) and chelate (b) forms from CGF granules on the copper content in them at drying temperatures of 25 °C, 90 °C, 110 °C and 125 °C during an exposure time of 432 hours

Уменьшение температуры сушки гранул до 25 °С повышает величину перехода ионов цинка в водорастворимую форму до 8,9; 12,2; 16,3 и 19,5 % для содержания микроэлемента в КГУ 0,5; 1,5; 2,5 и 3,5 мг/г соответственно. Максимальный переход ионов цинка в водные экстракты отмечен при его содержании 3,5 мг/г КГУ, температуре сушки 25 °С и составляет 19,5 %. Полученная зависимость перехода Zn^{2+} в водные экстракты свидетельствует о том, что через 18 сут в динамическом режиме промывки около 80 % ионов цинка остается в гранулах КГУ, полученных при температуре сушки 25 °С, и до 98 % ионов цинка остается в гранулах КГУ, полученных при температуре сушки 90–125 °С. Таким образом, наблюдается пролонгированность процесса перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты, но его количество в водорастворимой, доступной для растений форме снижается.

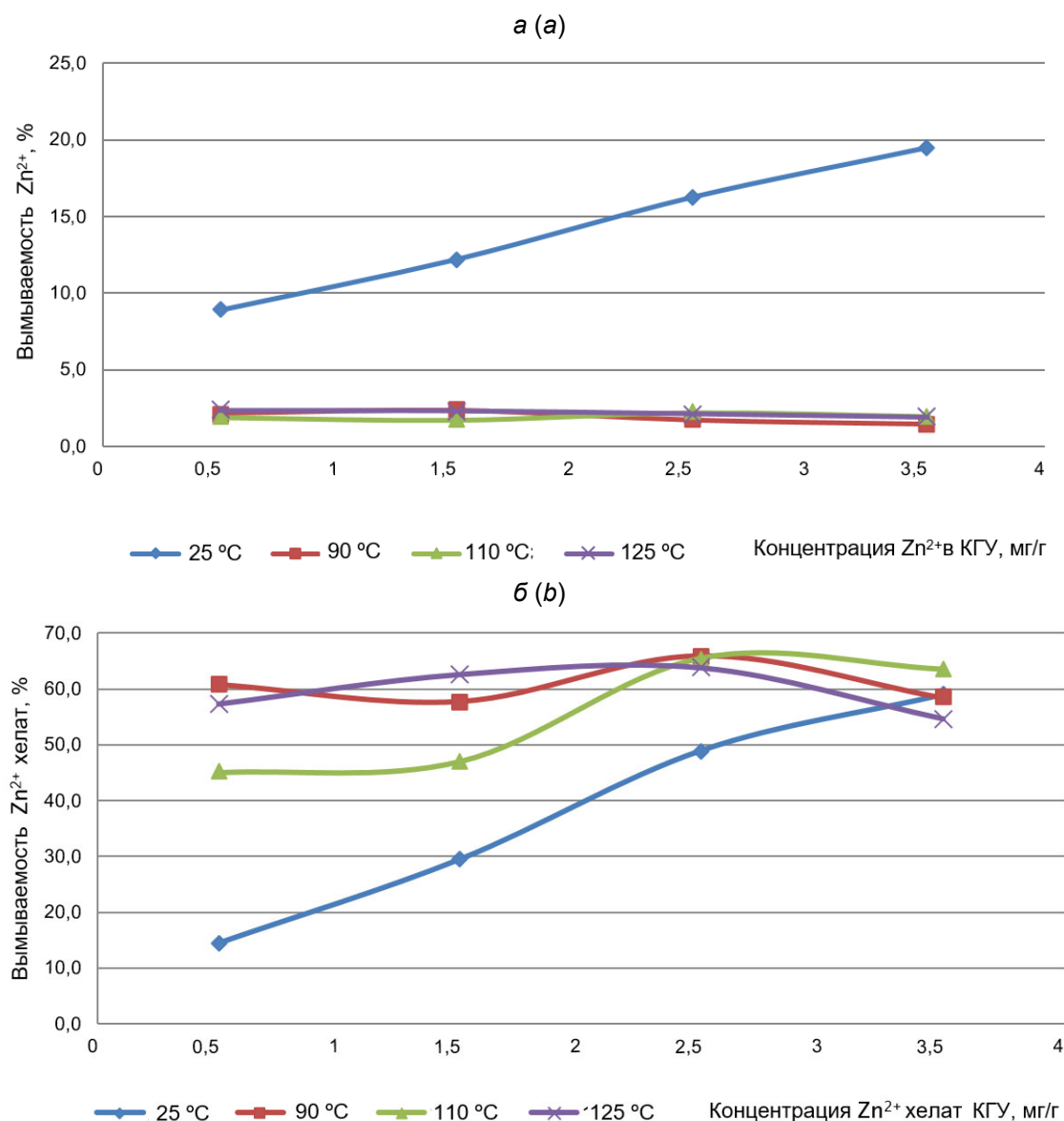


Рис. 2. Зависимость вымываемости ионов цинка в солевой (а) и хелатной (б) формах из гранул КГУ от содержания цинка в них при температуре сушки 25 °С, 90 °С, 110 °С и 125 °С за время экспозиции 432 ч

Fig. 2. Dependence of zinc ions extraction in salt (a) and chelate (b) forms from CGF granules on the zinc content in them at drying temperatures of 25 °C, 90 °C, 110 °C and 125 °C during an exposure time of 432 hours

Результаты исследования показали (рис. 2, б), что вымываемость иона цинка из гранул КГУ в хелатной форме в 1,5–3,0 раза выше, чем для солевой, при температуре сушки гранул 25 °С и в 18–25 раз выше при температуре сушки гранул 90–125 °С, что свидетельствует о высокой степени перехода микроэлемента в водорастворимую форму и доступности его для растений. Минимальная вымываемость за 432 ч экспозиции наблюдается при температуре сушки 25 °С и увеличивается от 14,7 до 58,4 % с ростом содержания микроэлемента в гранулах КГУ с 0,5 до 3,5 мг/г.

Вымываемость Zn²⁺ в хелатной форме для образцов, полученных при температуре сушки 90 °С и 125 °С, практически не зависит от содержания цинка в КГУ и колеблется в диапазоне 54,6–65,5 % для всех исследованных концентраций. Максимальный переход ионов цинка в водные экстракты отмечен при его содержании 2,5 мг/г КГУ, температуре сушки 90 °С и составляет 65,5 %. Полученная зависимость перехода ионов цинка в хелатной форме в водные экстракты свидетельствует о том, что через

18 сут в динамическом режиме промывки около 55–65 % Zn^{2+} вымывается из КГУ. Таким образом, процесс перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты для хелатной формы цинка значительно ниже, чем для солевой формы цинка.

Результаты исследований биологической активности водных экстрактов из гранул КГУ показали (табл. 1, 2), что энергия прорастания максимальна при следующих концентрациях $CuSO_4$: 0,5–2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °С; 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная энергия прорастания наблюдалась для каждого варианта опыта при разных концентрациях $CuSO_4$ и температурах сушки гранул, но ниже контрольной она была только в варианте с концентрацией 3,5 мг/кг и температурой сушки гранул 25 °С.

Таблица 1. Влияние меди на энергию прорастания и всхожесть растений (озимая рожь) в зависимости от ее формы и концентрации

Table 1. The effect of the copper on the germination and germination power of plants (winter rye) in dependence upon its form and concentration

Концентрация Cu^{2+} , мг/кг КГУ	Температура сушки, °С	$CuSO_4$		Cu-хелат	
		Энергия прорастания	Всхожесть	Энергия прорастания	Всхожесть
		% к контролю			
0,5	25	108,9	109,4	133,3	119,8
	90	104,4	110,3	123,3	113,6
	110	110,4	103,8	128,8	112,3
	125	117,5	110,0	109,1	104,9
1,5	25	114,9	110,3	133,3	113,6
	90	114,1	109,4	130,3	115,3
	110	118,3	110,3	128,2	109,4
	125	117,5	111,5	110,6	108,6
2,5	25	101,0	98,3	122,1	106,4
	90	101,8	103,1	127,3	113,6
	110	100,5	100,7	114,2	104,4
	125	107,0	101,9	93,9	88,9
3,5	25	98,4	99,8	134,8	117,3
	90	105,7	99,5	131,8	116,0
	110	114,9	112,7	135,5	114,3
	125	111,5	107,9	124,2	114,8
Контроль	–	100	100	100	100

Всхожесть максимальна при концентрациях 0,5–1,5 мг/кг $CuSO_4$ для гранул, высушенных при температуре 125 °С, при концентрациях $CuSO_4$ 2,5–3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная всхожесть отмечена при концентрациях 0,5 и 2,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 110 °С, при концентрациях 1,5 и 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С. Ниже контрольной всхожесть была в вариантах с концентрацией 2,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, и с концентрацией 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температурах 25 °С и 90 °С.

При использовании меди в виде хелата максимальная энергия прорастания отмечена при концентрациях 0,5–1,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрации 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С, а при концентрации 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная энергия прорастания наблюдалась на всех вариантах опыта для гранул, высушенных при температуре 125 °С, но ниже контрольной она была только в варианте с концентрацией 2,5 мг/кг.

Всхожесть максимальна при концентрациях хелата меди 0,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрациях 1,5 и 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С. Минимальная всхожесть отмечена при концентрациях 0,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрациях 1,5 и 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С. Ниже контрольной всхожесть была только в варианте с концентрацией 2,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °С.

Таблица 2. Влияние цинка на энергию прорастания и всхожесть растений (озимая рожь) в зависимости от его формы и концентрации**Table 2. The effect of the zinc on the germination and germination power of plants (winter rye) in dependence upon its form and concentration**

Концентрация Zn ²⁺ , мг/кг КГУ	Температура сушки, °С	ZnSO ₄		Zn-хелат	
		Энергия прорастания	Всхожесть	Энергия прорастания	Всхожесть
		% к контролю			
0,5	25	91,8	93,8	113,1	104,2
	90	133,2	116,6	111,6	105,2
	110	103,6	104,7	127,8	123,4
	125	132,1	115,6	134,4	126,1
1,5	25	108,9	100,0	130,8	119,3
	90	121,4	118,8	105,7	100,8
	110	118,9	110,3	103,1	100,8
	125	96,4	84,4	117,9	109,2
2,5	25	121,4	106,3	111,6	106,6
	90	126,1	111,6	123,4	112,6
	110	120,4	111,6	124,1	115,3
	125	66,1	78,1	81,0	73,9
3,5	25	114,3	106,3	110,5	101,8
	90	108,9	114,1	114,2	107,6
	110	121,4	117,7	135,2	126,7
	125	82,1	81,3	89,0	82,4
Контроль	–	100	100	100	100

В вариантах опыта с цинком (см. табл. 2) энергия прорастания максимальна при концентрациях 0,5–2,5 мг/кг ZnSO₄ для гранул, высушенных при температуре 90 °С, при концентрации ZnSO₄ 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная энергия прорастания наблюдалась при концентрации 0,5 мг/кг ZnSO₄ для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрации ZnSO₄ 1,5–3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °С. В этих вариантах энергия прорастания была ниже контрольной.

Минимальные и максимальные значения всхожести были аналогичными. Ниже контрольной всхожесть была в вариантах с концентрацией 0,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, и с концентрациями 1,5–3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °С. По-видимому, при высокой температуре сушки гранулы с цинком дают в водных растворах слишком высокую концентрацию Zn²⁺, оказывающую на зерна угнетающее действие.

При использовании цинка в виде хелата энергия прорастания максимальна при концентрациях 0,5 мг/кг Zn-хелата для гранул, высушенных при температуре 125 °С, при концентрации 1,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрациях Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная энергия прорастания наблюдалась при концентрации 0,5 мг/кг Zn-хелата для гранул, высушенных при температуре 90 °С, при концентрации 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С, при концентрациях Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °С. В двух последних вариантах энергия прорастания была ниже контрольной.

Всхожесть максимальна при концентрации Zn-хелата 0,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °С, при концентрации 1,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрации 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С, и при концентрации Zn-хелата 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная всхожесть отмечена при концентрациях 2,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °С, при концентрации 0,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрации Zn-хелата 1,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90–110 °С. Ниже контрольной всхожесть, как и энергия прорастания, была в вариантах с концентрациями Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °С.

По-видимому, концентрации Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг в сочетании с высокой температурой сушки гранул дают в водных растворах слишком высокую концентрацию Zn²⁺, оказывающую на зерна угнетающее действие.

Также следует отметить более быстрое ростстимулирующее воздействие хелата цинка: разница между энергией прорастания и всхожестью не превышает 4 %, в то время как для хелата меди эта разница может достигать 11 %.

Таким образом, при использовании меди и цинка в виде неорганической соли максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низких их концентраций при температуре сушки гранул КГУ 90–125 °С, для высоких концентраций – при 110 °С.

При использовании меди в виде хелата максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой и высокой концентраций при температуре сушки гранул КГУ 25 °С, для средних концентраций – при 90–110 °С.

При использовании хелата цинка максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 125 °С, для высокой концентрации – при 110 °С.

Заключение. Проведенные исследования по изучению влияния исходного содержания в солевой и хелатной формах микроэлементов (медь, цинк) в составе КГУ на переход микроэлемента в водный раствор показали, что за 432 ч наблюдения максимальная величина вымываемости ионов меди в солевой форме составляет 11,6 % при ее содержании 1,5 мг/г КГУ и температуре сушки 110 °С, что подтверждает пролонгированность перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты в доступной для растений форме. Процесс перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты для хелатной формы меди значительно выше, чем для солевой формы меди, и вымываемость составляет 57,3–86,0 % для всех исследованных концентраций и температур. Минимальная вымываемость наблюдается при температуре сушки 125 °С и увеличивается от 57,3 до 73,5 % с ростом содержания микроэлемента в гранулах КГУ.

Температурная обработка гранул КГУ при 90–125 °С препятствует растворимости ионов цинка в солевой форме и приводит к резкому снижению концентрации микроэлементов в водных экстрактах для всех исследованных диапазонов его содержания, и величина вымываемости колеблется в пределах 1,5–2,3 %. При содержании цинка в хелатной форме 0,5 мг/г КГУ вымываемость ионов Zn^{2+} увеличивается с повышением температуры сушки и составляет 14,6; 45,0; 57,3 и 60,3 % для образцов с температурой 25 °С, 110 °С, 125 °С и 90 °С соответственно за 432 ч экспозиции. Переход микроэлемента из гранул КГУ в водные экстракты для хелатной формы цинка значительно выше, чем для солевой формы цинка.

При использовании меди и цинка в виде неорганической соли максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низких их концентраций при температуре сушки гранул КГУ 90–125 °С, для высоких концентраций – при 110 °С. При использовании меди в виде хелата максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой и высокой концентраций при температуре сушки гранул КГУ 25 °С, для средних концентраций – при 90–110 °С. При использовании хелата цинка максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 125 °С, для высокой концентрации – при 110 °С.

Замедление вымываемости микроэлементов имеет большое значение с точки зрения минимизации их поступления в окружающую среду, что позволит существенно снизить загрязнение поверхностных и подземных вод сельскохозяйственных районов компонентами, содержащимися в минеральных удобрениях.

Список использованных источников

1. Багдевич, И. М. Обеспеченность пахотных и луговых почв подвижными формами цинка в зависимости от уровня интенсификации земледелия по районам Беларуси / И. М. Багдевич, О. Л. Ломонос // Весці НАН Беларусі. Сер. агр. навук. – 2015. – № 1. – С. 41–52.
2. Применение комплексных гуминовых удобрений «ЭлеГум»: рекомендации / М. В. Рак [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2013. – 28 с.
3. Клечковский, В. М. Агрохимия / В. М. Клечковский, А. В. Петербургский. – М. : Колас, 1967. – 584 с.
4. Радов, А. С. Практикум по агрохимии : учеб пособие / А. С. Радов, И. В. Пустовой, А. В. Корольков ; под ред. А. С. Радова. – М. : Колас, 1978. – 258 с.
5. Минеев, В. Г. Особенности динамики соединений меди в агроценозах на дерново-подзолистых почвах при длительном применении удобрений / В. Г. Минеев, Н. А. Едемская, Е. А. Карпова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2015. – № 4. – С. 3–19.
6. Рекомендации по допустимому содержанию цинка и меди в почве при возделывании зерновых культур и многолетних трав / С. Е. Головатый [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2006. – 43 с.

7. Кайгородов, Р. В. Накопление цинка и меди у злаков в условиях повышенного поступления микроэлементов в агроэкосистеме Нижней Саксонии (Германия) / Р. В. Кайгородов // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 2. – С. 51–52.
8. Мишура, О. И. Эффективность применения микроудобрений в хелатной форме при возделывании кукурузы / О. И. Мишура // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 1 (46). – С. 231–236.

References

1. Bagdevich I. M., Lomonos O. L. *Obespechennost' pahotnyh i lugovyh poch v podvizhnyimi formami cinka v zavisimosti ot urovnya intensivizatsii zemledeliya po rayonam Belarusi* [Provide with mobile forms of zinc of arable and meadow soils in dependence upon level of agriculture intensification in regions of Belarus]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. agr. navuk = Vesti NAS of Belarus. Series of Agricultural Sciences*, 2015, pp. 41–52. (in Russian)
2. Rak M. V., Lapa V. V., Sokolov G. A. *Primenenie kompleksnyh guminovyh udobreniy "EleGum"* [Use of complexhumic fertilizers "EleGum"]. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Nature Management, Institute for Soil Science and Agrochemistry. 2013, 28 p. (in Russian)
3. Klechkovskij V. M., Peterburgskij A. V. *Agrokimiya* [Agrochemistry]. Moscow, Kolas Publ., 1967, 584 p. (in Russian)
4. Radov A. S., Pustovoj I. V., Korol'kov A. V. *Praktikum po agrokhimii* [The workshop of agrochemistry]. Moscow, Kolas Publ., 1978, 258 p. (in Russian)
5. Mineev V. G., Edemskaya N. A., Karpova E. A. *Osobennosti dinamiki soedinenij medi v agrocenozah na dernovo-podzolistykh pochvah pri dlitel'nom primenenii udobrenij* [Features of the dynamics of copper compounds in agrocenoses on sod-podzolic soils with long-term use of fertilizers]. *Problems of Agrochemistry and Ecology = Problems of Agrochemistry and Ecology*, 2015, no. 4, pp. 3–19. (in Russian)
6. Golovaty S. E., Bogdevich I. M., Kovalevich Z. S., Slobodnitskaya G. V. *Rekomendacii po dopustimomu sodержaniyu cinka i medi v pochve pri vozdelevanii zernovykh kul'tur i mnogoletnih trav* [Recommendations on the permissible content of zinc and copper in the soil when cultivating grain crops and perennial grasses]. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Minsk, 2006, 43 p. (in Russian)
7. Kaygorodov R. V. *Nakoplenie cinka i medi u злаков v usloviyah povyshennogo postupleniya mikroelementov v agroekosistemy Nizhnej Saksonii (Germaniya)* [Accumulation of zinc and copper in cereals under conditions of increased supply of microelements to the agroecosystems of Lower Saxony (Germany)]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2006, no. 2, pp. 51–52. (in Russian)
8. Mishura O. I. *Effektivnost' primeneniya mikroudobrenij v helatnoj forme pri vozdelevanii kukuruzy* [Efficiency of using microfertilizers in chelated form when cultivating corn]. *Pochvovedenie i agrokimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2011, no. 1 (46), pp. 231–236. (in Russian)

Информация об авторах

Сосновская Наталья Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Красноберская Ольга Георгиевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

Ракович Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией биогеохимии и агроэкологии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mire4@tut.by

Information about the authors

Natalia E. Sosnovskaya – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Olga G. Krasnoberskaya – Ph. D. (Agricultural), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

Vyacheslav A. Rakovich – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Head of Lab. of Biogeochemistry and Agroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mire4@tut.by