

УДК 631.824:631.445.24:633.1

И. М. БОГДЕВИЧ, Ю. В. ПУТЯТИН, О. М. ТАВРЫКИНА, О. Л. ЛОМОНОС

ДИАГНОСТИКА МАГНИЕВОГО ПИТАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВАХ

Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь, e-mail: brissa5@mail.belpak.by

Представлены результаты многолетних полевых опытов на специально подготовленных 4 уровнях содержания обменного магния в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах в широком диапазоне Mg – 46–263 мг/кг. Разработаны параметры почвенной и растительной диагностики магниевого питания кукурузы, ярового рапса и ячменя. Полученная информация позволяет подобрать поля и участки для дифференцированного размещения культур и выявить необходимость проведения некорневых подкормок растений 4%-ным раствором $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ в зависимости от анализов почв и растений на ранних стадиях их развития.

Ключевые слова: дерново-подзолистые легкосуглинистые почвы, обменный магний, почвенная диагностика, растительная диагностика, магниевое питание кукурузы, ярового рапса, ячменя.

I. M. BOGDEVITCH, Yu. V. PUTYATIN, O. M. TAVRYKINA, O. L. LOMONOS

DIAGNOSTIC OF THE CROP MAGNESIUM NUTRITION ON PODZOLUVISOL LOAMY SOILS

The Institute for Soil Science and Agrochemistry, Minsk, Belarus, e-mail: brissa5@mail.belpak.by

The results of long-term field experiments on specially prepared 4 levels of exchangeable magnesium content in Podzoluvisol loamy soils in a wide range of Mg 46–263 mg · kg⁻¹ are presented. The parameters of soil and plant diagnostics of magnesium supply of corn, spring rapeseed and barley have been developed. The obtained data enable to choose the appropriate fields for particular crops and to identify the necessity for foliar spray of plants with 4 % solution of $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ according to the analyses of soils and plants at early stages of their development.

Keywords: Podzoluvisol loamy soils, exchangeable magnesium, soil diagnostics, plant diagnostics, magnesium supply of corn, spring rapeseed and barley.

Введение. Значение магния в питании растений определяется в первую очередь тем, что он входит в состав зеленого пигмента листьев хлорофилла и непосредственно участвует в фотосинтезе. Магний необходим для построения клеток и протоплазмы, регулирования нормального протекания биологических процессов [1–3]. Магний влияет на проницаемость и структуру коллоидов протоплазмы, а также на интенсивность деления и роста клеток. В отличие от одновалентных катионов калия и натрия, способствующих набуханию коллоидов и уменьшению их вязкости, кальций и магний уплотняют плазму, уменьшая ее набухаемость. В настоящее время магний рассматривают как полифункциональный элемент питания: он выполняет структурообразующую роль, входя в состав органелл, клеток, мембран, и важную функциональную роль в составе около 300 ферментов в обмене веществ в растениях и в биохимических процессах [4, 5].

В растении магний присутствует в виде двухвалентного катиона Mg^{2+} . Сухое вещество растения, как правило, содержит 0,2–0,5 % Mg^{2+} . Он относительно мобилен в растении и легко перемещается из одних органов и тканей в другие. Поглощение фосфора растениями невозможно без магния, и наоборот. Недостаток магния тормозит процесс восстановления нитратов и производство фитогормонов. При магниевом голодании разрушается формирование пластид, вследствие чего развивается хлороз и некроз листьев [1, 5]. Недостаток магния в минеральном питании растений ограничивает их урожай, снижает качество сельскохозяйственной продукции, влияет на эффективность использования азотных, фосфорных, калийных удобрений.

Дерново-подзолистые почвы Беларуси в середине прошлого столетия характеризовались крайне низким содержанием магния в поглощающем комплексе. Крупномасштабное обследование почв сельскохозяйственных земель на содержание магния проводится с 1976 г. Средневзвешенное содержание магния в пахотных почвах многих районов тогда было в пределах 36–62 мг MgO на 1 кг почвы. За истекший период в республике проведено семь циклов известкования кислых почв, где в качестве мелиоранта использовали доломитовую муку с содержанием MgO ~20 %. Это привело к закономерному повышению содержания в почвах обменных форм магния. С 1992 г. введена новая, ныне действующая градация обеспеченности почв обменным магнием [6]. Пахотные почвы в настоящий период преимущественно (86 %) характеризуются повышенным и высоким содержанием обменных форм магния [7].

Эффективность магниевых удобрений под сельскохозяйственные культуры в Беларуси изучена недостаточно. Имеющиеся немногочисленные работы преимущественно относятся к 60–70-м годам прошлого столетия, а исследования проведены в условиях острого дефицита магния на песчаных и супесчаных почвах. Углубленные исследования магниевое питания растений, установление количественных параметров как дефицита, так и избыточного содержания обменного магния в почве для размещения посевов, а также для эффективного применения магниевых удобрений, обеспечивающих окупаемость затрат и высокое качество продукции для наиболее ценных сельскохозяйственных культур, является важной научной задачей.

Цель настоящей работы – критический обзор экспериментальных исследований по разработке параметров почвенной и растительной диагностики магниевое питания сельскохозяйственных культур за последние 10 лет. Актуальность исследований обусловлена большим диапазоном различий концентрации магния в суглинистых почвах, которые в условиях производства различаются на порядок по отдельным полям и участкам.

Материалы и методы исследований. Исследования проводили в специально спланированных модельных стационарных полевых опытах на окультуренных дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, развивающихся на мощном лессовидном суглинке в СПК «Щемыслица» и на моренных суглинках в ОАО «Гастелловское» Минского района. Каждый из опытов проводился в двух полях. Пахотные горизонты почв перед закладкой опытов характеризовались близкими к оптимальным агрохимическими показателями: содержанием гумуса (по Тюрину) – 1,8–2,5 %, pH_{KCl} 5,8–6,2, P_2O_5 и K_2O (0,2 М HCl) – 300–350 и 146–308 мг/кг почвы соответственно. Содержание подвижных форм макро- и микроэлементов: серы – 6,1–8,8 мг/кг, бора – 0,33–0,65; меди – 2,08–2,84; цинка – 1,84–2,60 мг/кг. На каждом поле создано четыре уровня обеспеченности почвы обменным Mg, которые отражают диапазон различий по содержанию магния и соотношения катионов в поглощающем комплексе дерново-подзолистых суглинистых почвах Беларуси (табл. 1).

Высокие уровни содержания обменного Mg на блоках делянок создавались путем внесения быстродействующего удобрения – сульфата магния. Содержание катионов (Mg, K, Ca) и их соотношения на 3-м уровне типичны для окультуренных дерново-подзолистых пахотных почв. На каждом блоке содержания обменного магния в почве был контрольный вариант без удобрений, современный базовый вариант системы удобрений, вариант с повышенной дозой калия и варианты некорневых подкормок 4%-ным раствором сульфата магния в дозе Mg 1–1,5 кг/га. Некорневую подкормку ярового рапса проводили в стадию бутонизации, ячменя – при кущении, а кукурузы дважды – в стадию 6–8 листьев и в начале выхода в метелку. Повторность вариантов – 4-кратная, размещение делянок – рендомизированное. Площадь делянки – 12 м², учетная – 8 м².

Пробы для растительной диагностики отбирали у ярового рапса в стадию бутонизации, ячменя – образования 3–5 листьев, кукурузы – 6–8 листьев. Магний в листьях определяли атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 30502–97. Из характеристик качества продукции определяли содержание масла и протеина в семенах рапса. Содержание сырого белка и аминокислотный состав зерна ячменя и кукурузы (лизин, треонин, метионин, валин, изолейцин, лейцин, фенилаланин) – на жидкостном хроматографе Agilent 1100.

Т а б л и ц а 1. Содержание и соотношение катионов (Са, Mg, К,) в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах опытных полей в СПК «Щемьслица» и в ОАО «Гастелловское»

Вариант опыта	Уровень	Содержание катионов в почве, мг/кг			Эквивалентное соотношение катионов	
		Са	Mg	K ₂ O	Ca ²⁺ :Mg ²⁺	K ⁺ :Mg ²⁺
СПК «Щемьслица», поле № 1	1	706	71	143	6,0	0,62
	2	658	84	142	4,7	0,53
	3	771	181	147	2,6	0,25
	4	723	243	152	1,8	0,20
СПК «Щемьслица», поле № 2	1	947	70	248	8,2	1,10
	2	940	92	246	6,2	0,83
	3	926	137	233	4,1	0,53
	4	815	188	236	2,6	0,39
ОАО «Гастелловское», поле № 1	1	1737	46	308	22,9	2,08
	2	1432	90	278	9,7	0,96
	3	1216	147	279	5,0	0,59
	4	1110	198	257	3,4	0,41
ОАО «Гастелловское», поле № 2	1	1690	77	325	13,2	1,30
	2	1432	144	301	6,5	0,59
	3	1300	195	302	4,0	0,50
	4	1270	263	308	2,9	0,40

Результаты и их обсуждение

Почвенная диагностика. Установлены достоверные зависимости урожайности изучаемых культур от уровня обеспеченности почвы обменным магнием, которые описываются уравнениями параболы второго порядка (рис. 1).

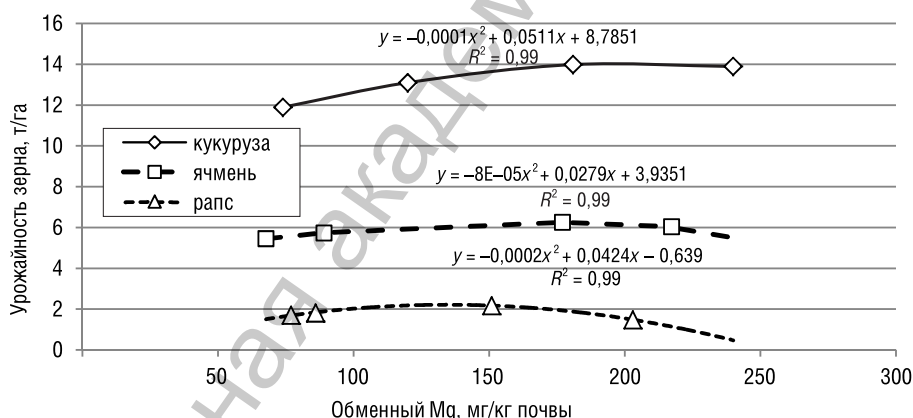


Рис. 1. Урожайность зерна кукурузы (на фоне 90 т навоза, N₁₁₀₊₃₀P₆₀K₁₂₀), ячменя (N₉₀₊₃₀P₆₀K₁₂₀) и ярового рапса (N₈₀₊₃₀P₆₀K₉₀+B) в зависимости от содержания обменного Mg в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, СПК «Щемьслица», 2004–2011 гг., ОАО «Гастелловское», 2012–2014 гг.

Максимальная урожайность исследуемых культур находится в очень широком диапазоне содержания Mg – 110–240 мг/кг почвы, что согласуется с ранее опубликованным ориентировочным диапазоном оптимума для суглинистых почв [3]. Научный и практический интерес представляют заметные различия по отдельным культурам. Так, за годы исследований наибольшая урожайность семян ярового рапса формировалась в диапазоне содержания обменного Mg 110–150 мг/кг, зерна ячменя – 150–190, а урожайность зеленой массы и зерна кукурузы при содержании Mg 180–240 мг/кг почвы. Повышение содержания магния в почве (от низкого до оптимального уровня) обеспечивало прирост урожайности зеленой массы кукурузы на 19–23 %, зерна – на 12–13 %. Урожайность зерна ячменя при этом повышалась на 13–17 %, урожайность

семян рапса – на 25–29 %. Избыток же концентрации обменного магния в почве и сужение эквивалентного соотношения $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ сопровождалось снижением урожайности кукурузы и ячменя на 3–8 %, а семян ярового рапса – до 32 %. Очевидно, что установление количественных параметров (как дефицита, так и избыточного содержания обменного магния в почве) для наиболее ценных сельскохозяйственных культур является важной научной задачей. При избытке магния в почве наблюдается антагонистическое действие его на поступление кальция и калия в растения [8]. Отсюда понятно, что мониторинг содержания обменных форм магния, кальция и калия в почвах имеет большое практическое значение.

Предельные параметры содержания обменного магния в почве, при которых наступает снижение урожайности, различаются в зависимости от гранулометрического состава и соответствующих им емкости, состава и соотношений обменных катионов [9, 10]. В научной литературе приводятся только ориентировочные пороговые параметры. R. Jokinen, 1981, считает, что оптимальное соотношение $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} = 6$ для плодородных почв Финляндии [11]. По мнению С. А. Барбера, избыток магния не проявляется на снижении урожайности сельскохозяйственных культур, пока соотношение $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ существенно больше единицы, а оптимальное соотношение находится в пределах 2–7 [12]. Согласно нашим экспериментальным данным, оптимальное соотношение $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ находится в пределах 4–6, а депрессия урожайности ярового рапса и ячменя на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах наблюдается при соотношении $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} < 3,0$ [13–16]. На супесчаных почвах избыток Mg в почвенном растворе для сельскохозяйственных культур проявляется при значительно меньшей концентрации обменного магния в почве [8].

В целом по Беларуси средневзвешенное эквивалентное соотношение $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ за последние двадцать лет обследования медленно сужается: на пашне – от 4,1 до 3,3, а в луговых почвах – от 5,4 до 3,6, и в среднем пока находится в допустимом диапазоне [7]. В то же время доля почв с высоким содержанием обменного магния и узким эквивалентным соотношением $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} \leq 3$ продолжает увеличиваться. Развитие этого процесса усиливает актуальность мониторинга и аналитического контроля магниевых питаний сельскохозяйственных культур.

Известно, что избыток магния может проявляться при относительно низких его концентрациях, если в почве недостаточно доступного для растений калия [3, 8–10]. В наших опытах установлено, что избыточное содержание обменного магния в почве сопровождается снижением содержания подвижных форм калия в почве. Поэтому повышение содержания обменного магния в почве может вызывать дополнительную потребность в повышении доз калийного удобрения.

Прибавки урожая зерна ячменя от минеральных удобрений увеличиваются при повышении доз калийных удобрений по мере повышения содержания обменного магния в почве до уровня Mg 150 мг/кг. При низком и оптимальном содержании обменного магния наибольший урожай зерна ячменя получен при дозе калия 120, а при избыточной концентрации магния в почве – при дозе 150 кг/га. По-видимому, оптимальные дозы K_2O следует определять не только с учетом обеспеченности почв подвижными формами калия, но также желательность учесть насыщенность поглощающего комплекса магнием и кальцием.

Одним из важных информативных показателей уровня обеспеченности почвы магнием является отзывчивость сельскохозяйственных культур на внесение магниесодержащих удобрений. Наибольшей отзывчивостью на магниевые удобрения отличаются растения с сильно развитым листовым аппаратом, например, рапс, кукуруза. Эффективность магниевых подкормок ярового рапса и ячменя была высокой при низком уровне обеспеченности почвы магнием и снижалась по мере увеличения его запасов в пахотном горизонте (рис. 2).

При содержании обменного магния в почве 46–77 мг/кг получены наибольшие прибавки семян рапса и зерна ячменя от магниевой подкормки – 3,2 и 9,5 ц/га соответственно. Прибавка урожайности снизилась до 1,7–2,1 ц/га при содержании Mg 151–173 мг/кг почвы, а при содержании магния в почве 193–203 мг/кг подкормка сопровождалась снижением урожайности на 0,4–1,1 ц/га.

Аналогичная закономерность отмечена и на кукурузе (рис. 3). При низком содержании Mg в почве 74–77 мг/кг прибавка урожайности от подкормки была наибольшей и составила для зеленой массы 5,0 и 3,5 т/га, для зерна – 0,74–0,76 т/га. При содержании магния 120 и 144 мг/кг почвы

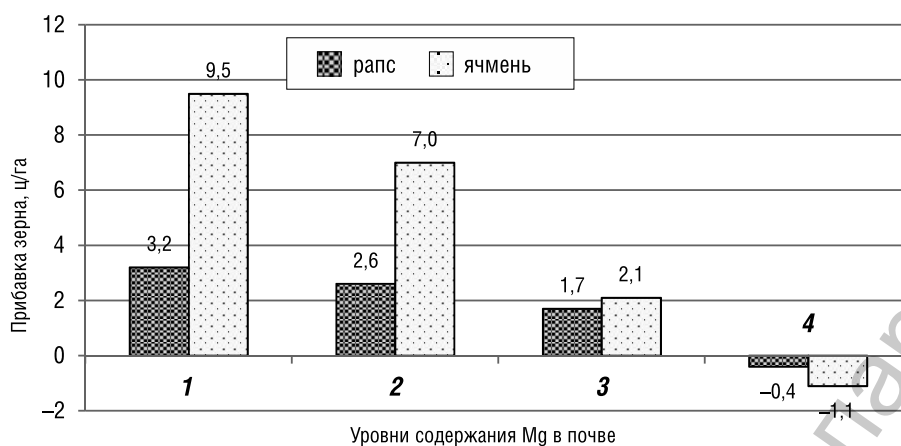


Рис. 2. Прибавки урожайности зерна ярового рапса и ячменя от некорневых подкормок 4%-ным раствором $MgSO_4$ на разных уровнях содержания обменного магния в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах. Уровни обеспеченности Mg: 1 – 46–77; 2 – 86–94; 3 – 151–173; 4 – 192–203 мг/кг почвы

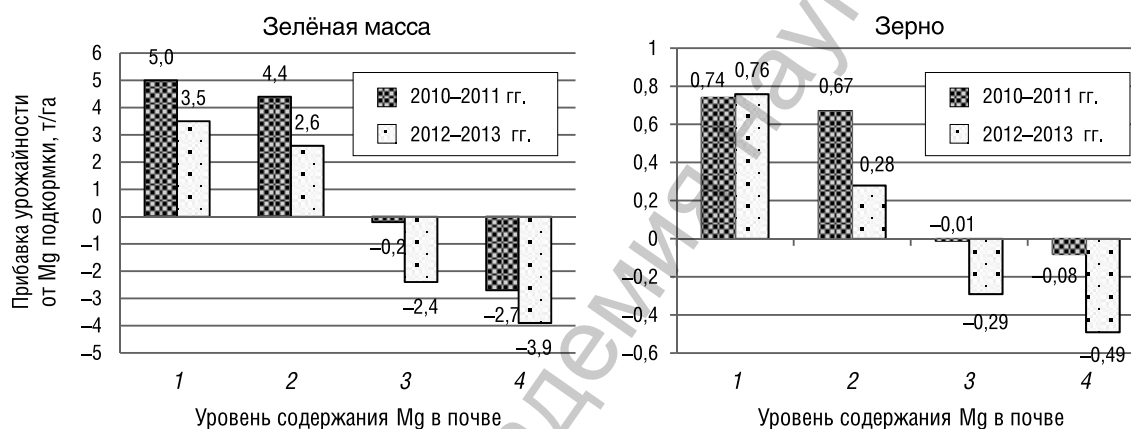


Рис. 3. Прибавки урожайности зеленой массы и зерна кукурузы от некорневых подкормок $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ на разных уровнях содержания обменного магния в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах

прибавка урожайности составила 4,4 и 2,6, зерна – 0,67 и 0,28 т/га соответственно. При оптимальном и избыточном содержании обменного магния в почве (3-й и 4-й уровни обеспеченности) магниевые подкормки сопровождались снижением урожайности зеленой массы и зерна кукурузы.

Одновременно исследовали действие серы в дозе S_{60} в форме фосфогипса и сульфата аммония, которые также были эффективны только при низком содержании в почве обменного магния. Яровой рапс был наиболее отзывчивым на внесение серы. В целом применение серосодержащих удобрений и некорневые подкормки сульфатом магния на фоне $N_{80+30}P_{60}K_{90}+B$ повышало урожайность семян ярового рапса на 10,5–11,1 ц/га на почве с содержанием обменного Mg 77–150 мг/кг. Повышение урожайности семян ярового рапса под влиянием магниевых и серосодержащих удобрений обеспечивается за счет увеличения количества стручков на одном растении на 21,4–24,7 %, количества семян в стручке – на 8,4–9,6 % и массы 1000 семян – на 3,8–5,2 %. Для ячменя серосодержащее удобрение (S_{60}) было эффективным только на первом (низком) уровне содержания магния в почве. Прибавки урожая зерна ячменя от внесения серы в форме сульфата аммония были небольшие – 2,6–5,3 ц/га.

Таким образом, содержание обменных форм магния в почве является критерием как для определения диапазона оптимальной обеспеченности возделываемых культур магнием, так и для прогноза эффективности некорневых подкормок растений сульфатом магния. Необходимо отметить, что для установления объективной потребности растений в питательных веществах

почвенная диагностика дополняется методами растительной диагностики, поскольку не всегда в полной мере способна удовлетворять запросам специалистов. Контроль минерального питания растений должен осуществляться на основе комплексной, почвенной и растительной диагностики.

Растительная диагностика. Об обеспеченности растений магнием трудно судить визуально, по внешнему виду растений, который существенно изменяется вследствие нарушения биохимических процессов в растении только при остром недостатке или большом избытке этого элемента в питательной среде. Известно, что при остром недостатке магния у ячменя в верхней части старых листьев появляются светлые или рыже-бурые пятна, а у их основания – темно-зеленые (скопления хлорофилла) [8]. W. Bergmann приводит визуальные примеры магниевых токсикозов растений ячменя в виде рыже-бурых пятен по всей пластинке листа. Эти признаки внешне похожи на признаки дефицита магния в почвенном растворе [8]. Чаще всего сельскохозяйственные культуры испытывают относительно небольшой дефицит или избыток доступного растениям магния в почве, без заметных изменений цвета листовой пластинки. Для объективной оценки состояния магниевых питаний растений и оптимизации магниевых удобрений необходимо использовать методы диагностики по химическому анализу почв и растений.

Примером растительной диагностики может служить установленная нами тесная корреляционная связь концентрации Mg в молодых растениях ячменя в фазу кущения с содержанием обменного магния в почве (рис. 4). Магниевая диагностика в фазу кущения удобна, так как позволяет получить данные заранее, до оптимального срока проведения некорневой подкормки растений сульфатом магния в период выхода в трубку – появления флагового листа.

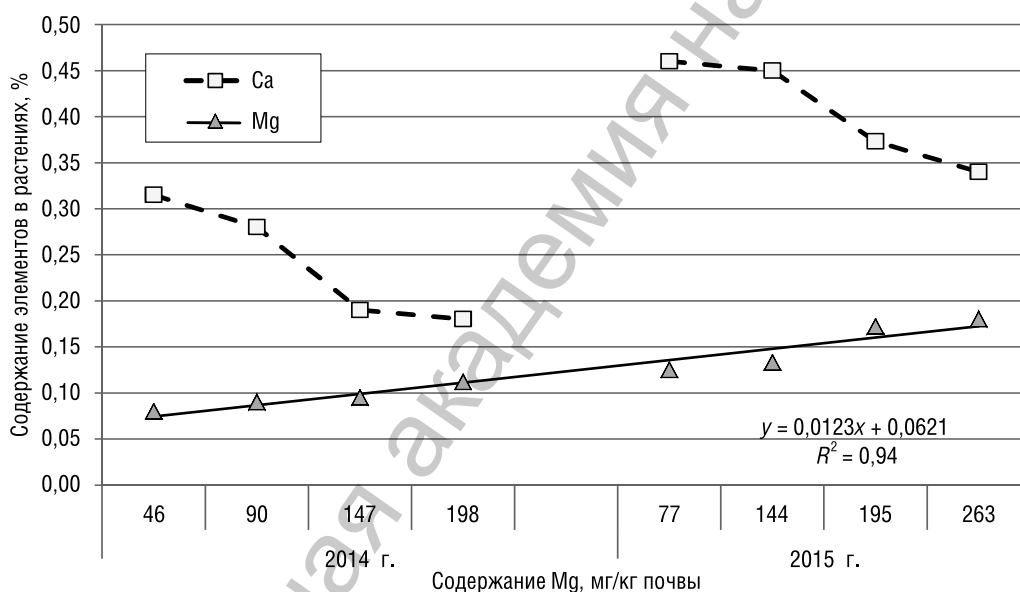


Рис. 4. Содержание катионов Mg и Ca в растениях ячменя сорта Стратус в фазу кущения на разных уровнях содержания обменного магния в дерново-подзолистой легкоуглинистой почве, 2014–2015 гг.

Известно, что доступность катиона Mg^{2+} растениям зависит от емкости катионного обмена почвы и влияния конкурирующих катионов Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Al^{3+} . Наиболее влияющими катионами являются Ca^{2+} и K^+ [8, 11, 17]. В свою очередь, повышение в почве содержания обменного магния сопровождается уменьшением поступления в растения кальция и в меньшей степени калия. В наших опытах по мере повышения содержания магния в почве наблюдалось снижение содержания кальция в растениях ячменя в 1,35–1,75 раза.

Установлены аналогичные тесные зависимости содержания магния, кальция и калия в молодых растениях ячменя и кукурузы от содержания обменного магния в почве. Некорневые подкормки сульфатом магния позволяли несколько корректировать и повышать содержание магния в растениях при низком и невысоком содержании обменного магния в почве, что можно видеть на кукурузе (рис. 5).

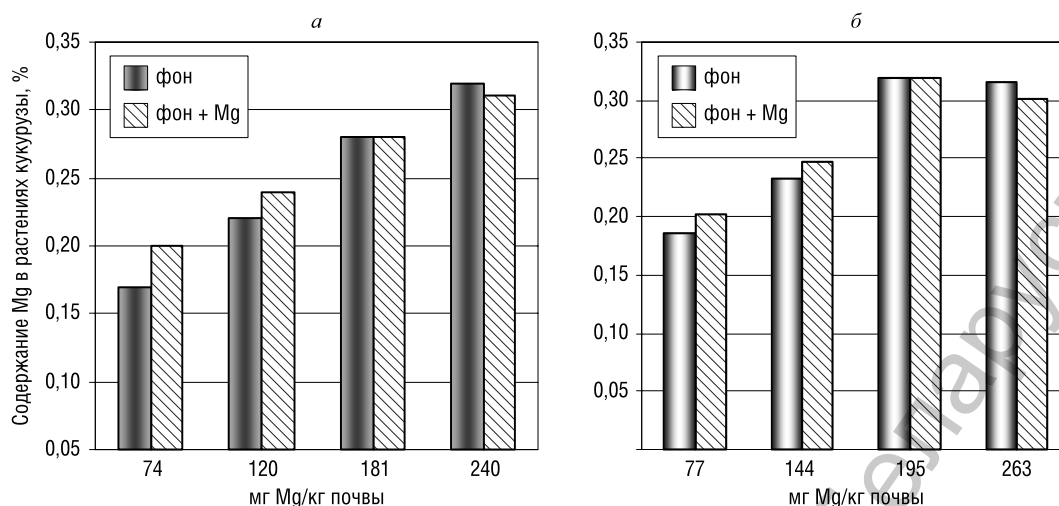


Рис 5. Содержание магния в растениях кукурузы (стадия 6–8 листьев) при различной обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием: а – СПК «Щемяслица»; б – ОАО «Гастелловское»

При уровне обменного магния в диапазоне 74–144 мг/кг почвы растения были отзывчивы на магниевые подкормки, и содержание Mg при этом достоверно повышалось. В блоках с повышенным и высоким содержанием обменного магния почвы магниевая подкормка не приводила к дальнейшему повышению содержания элемента в листьях кукурузы. За критерий оптимума нами принято содержание Mg в сухой массе растений кукурузы в фазе 6–8 листьев в вариантах, где получена наибольшая урожайность зеленой массы и зерна кукурузы, поскольку данные опыты проведены в благоприятных условиях, когда остальные агрохимические свойства почв (рН, гумус, P₂O₅, K₂O и др.) находились на относительно оптимальном уровне. Согласно данным опыта, в СПК «Щемяслица», наиболее высокой урожайности зеленой массы кукурузы (выше 78 т/га) и зерна (выше 13 т/га) соответствовало содержание магния 0,30–0,32 % в сухой массе растений в фазу 6–8 листьев. В опыте в ОАО «Гастелловское» наибольшей урожайности зеленой массы (свыше 103 т/га) и зерна (более 14 т/га) кукурузы соответствовало содержание магния в листьях кукурузы 0,32–0,34 %. Итак, оптимальным уровнем содержания магния в растениях кукурузы, (характерных для гибрида Дельфин) для урожайности зеленой массы выше 60–100 т/га и зерна выше 10–14 т/га можно считать 0,30–0,34 % (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Параметры растительной диагностики магниевого питания кормовых культур на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, %

Уровень обеспеченности магнием	Кукуруза, сорт Дельфин	Яровой рапс, сорт Явар	Ячмень, сорт Стратус
Низкий	<0,24	<0,20	<0,08
Средний	0,24–0,29	0,20–0,24	0,08–0,10
Оптимальный	0,30–0,34	0,25–0,33	0,10–0,17
Высокий	>0,34	>0,33	>0,17

П р и м е ч а н и е. Содержание Mg²⁺ определяли в сухой массе кукурузы в фазе 6–8 листьев, ячменя – 3–5 листьев по ГОСТ 30502–97.

Содержание магния в растениях 0,24–0,29 % является средним, а <0,24 % – низким, где растения нуждаются в проведении некорневой подкормки сульфатом магния. Высоким является содержание магния выше 0,34 %. Аналогичным образом проведено ранжирование показателей содержания магния в растениях ярового рапса и ячменя. Разумеется, что могут быть не только видовые, но и сортовые отличия параметров растительной диагностики [18]. Например, в нашем случае ориентировочное оптимальное содержание Mg в сухой массе растений ярового рапса в стадию

бутонизации составляет $0,29 \pm 0,04$ % с диапазоном 0,25–0,33 %. При такой концентрации магния в растениях прогнозируется наибольшая урожайность семян ярового рапса и достоверная прибавка $0,2 \pm 0,05$ т/га от некорневых подкормок сульфатом магния. W. Weichmann приводит оптимальное содержание магния в сухой массе растений озимого рапса в стадии стеблевания как 0,15–25 % [19].

Влияние на качество продукции. Применение магниевых удобрений не только повышает урожайность зерна, но и улучшает его качество (повышает выполненность и белковость зерна, массу 1000 зерен). Известно, что при обеспечении магнием растения становятся более устойчивыми к полеганию, поражению грибными заболеваниями. Влияние магния на качество зерновых культур отмечается в ряде работ, начиная от ранних публикаций К.П. Магницкого, где установлено увеличение содержания крахмала и сырого протеина в зерне ржи после применения магниевых удобрений на кислых дерново-подзолистых супесчаных почвах [1]. Отмечается повышение содержания сырого протеина и клейковины, а также увеличение массы 1000 зерен пшеницы, ржи и ячменя при применении сульфата магния в полевых экспериментах, проведенных в Украине и в странах Центральной Европы [10, 17].

В нашем опыте установлено небольшое увеличение содержания сырого белка в зерне ячменя (на 0,6–0,9 %), по мере повышения содержания обменного магния в почве – от низкого до оптимального уровня (табл. 3). Если принять во внимание и повышение урожайности зерна, то оптимизация магниевых питания растений позволяет повысить сбор сырого белка с гектара посева ярового ячменя на 20–30 %, или на 100–140 кг/га.

Т а б л и ц а 3. Содержание сырого белка в зерне ячменя и сбор с гектара в зависимости от содержания обменного магния в дерново-подзолистой суглинистой почве и удобрений

Вариант опыта	Сырой белок, %				Сбор белка, кг/га			
	Уровень содержания Mg, мг/кг почвы				Уровень содержания Mg, мг/кг почвы			
	64	94	173	192	64	94	173	192
Контроль	7,9	7,6	8,8	8,8	316	340	419	445
$N_{120}P_{60}K_{120}$ (фон)	9,0	8,9	9,6	9,4	580	610	680	662
Фон + $Mg_{1,5}$	8,8	8,9	9,4	9,2	646	681	693	644
Фон + $S_{60} + Mg_{1,5}$	9,6	9,8	9,9	10,5	706	750	717	735
<i>HCP₀₅ варианты уровни</i>	0,32 0,24							

Влияние обеспеченности почв магнием и удобрений на качество белка по аминокислотному составу зерна ячменя менее заметно. Содержание каждой из семи незаменимых аминокислот в зерне ячменя по вариантам опыта изменяется незначительно. Можно отметить только тенденцию повышения содержания в зерне суммы критических (лизин, метионин, треонин) и суммы всех незаменимых аминокислот при повышении содержания обменного магния в почве в диапазоне Mg 46–90 мг/кг почвы (табл. 4). Внесение полного минерального удобрения также сопровождалось достоверным повышением содержания в зерне суммы критических и суммы незаменимых аминокислот по сравнению с контролем без удобрений только на первых двух уровнях обеспеченности почвы магнием.

Т а б л и ц а 4. Биологическая ценность белка зерна ячменя в зависимости от содержания обменного магния в почве и удобрений, г/кг зерна

Вариант опыта	Содержание критических аминокислот				Содержание незаменимых аминокислот			
	Уровень содержания Mg, мг/кг почвы				Уровень содержания Mg, мг/кг почвы			
	46	90	147	198	46	90	147	198
Контроль	6,7	6,3	6,6	6,7	14,4	12,5	13,8	14,8
$N_{120}P_{60}K_{120}$ (фон)	7,7	8,2	7,2	6,1	17,0	18,2	15,1	12,9
Фон + $Mg_{1,5}$	6,9	7,9	7,1	7,3	15,1	17,9	15,2	15,7
Фон + $S_{60} + Mg_{1,5}$	6,9	8,3	7,2	7,2	15,5	18,4	15,6	15,8
<i>HCP₀₅</i>	0,74				1,80			

Содержание масла и белка в семенах рапса определяет их качество и зависит как от биологических особенностей сорта, так и от условий внешней среды и агротехнических приемов возделывания. Установлено повышение масличности семян ярового рапса от 40,7 до 43,6 % на фоновом варианте удобрения по мере увеличения содержания обменного магния в почве от 77 до 203 мг/кг. Содержание сырого протеина в семенах при этом наоборот имело тенденцию к снижению. Достоверное повышение содержания масла (на 1,3 %) получено также за счет некорневых подкормок растений сульфатом магния при содержании обменного магния 77 мг/кг почвы. Отзывчивость растений ярового рапса на некорневые подкормки сульфатом магния в наших опытах была соизмерима с результатами, полученными в Польше и Германии на озимом рапсе [20, 21].

Содержание белка в семенах ярового рапса определяет кормовую ценность шрота и жмыха, которые после отжима масла используются в качестве ценных кормовых компонентов. В наших исследованиях содержание сырого белка в семенах различалось по вариантам опыта от 20,0 до 24,3 % при сборе белка 231–531 кг/га. Внесение минеральных удобрений способствовало повышению белковости семян на всех уровнях содержания обменного магния в почве. Лучшие показатели содержания и сбора белка получены при совместном применении серы и магния на фоне полного минерального удобрения на третьем уровне содержания обменного магния в почве – 24,3 % и 531 кг/га соответственно.

При повышении содержания обменного магния в почве от 71 до 181 мг/кг отмечено увеличение содержания сырого белка на 0,2–0,9 % в зерне кукурузы на удобренных вариантах и на 0,7–1,5 % за счет удобрений по сравнению с контролем без удобрений. При очень высоком содержании магния в почве содержание сырого белка в зерне несколько снижалось. Наибольший сбор белка 1140–1146 кг/га получен на фоне базового удобрения с некорневой подкормкой сульфатом магния на 3-м уровне обеспеченности обменным Mg – 181 мг/кг почвы при соотношении $Ca^{2+} : Mg^{2+} = 3,9$.

Некорневые подкормки ярового рапса сульфатом магния экономически оправданы. В наших опытах с яровым рапсом все дополнительные затраты окупались прибавкой урожайности с чистым доходом с гектара посева в эквиваленте 40–50 долларов США при низком содержании магния в почве (Mg 77–86 мг/кг) и 24 доллара при повышенном содержании Mg – 150 мг/кг почвы [14].

Выводы

1. Проведены специально спланированные модельные полевые опыты по установлению параметров магниевое питания полевых культур. Для этого созданы четыре уровня (блока) обеспеченности дерново-подзолистых легкосуглинистых почв обменными формами Mg (1M KCl) в диапазоне от низкого 46–71 до высокого 243–263 мг/кг почвы при соответствующем эквивалентном соотношении $Ca^{2+} : Mg^{2+}$ от 1,8 до 22,9 и соотношении $K^+ : Mg^{2+}$ от 0,4 до 2,1. Другие агрохимические свойства (pH_{KCl} , содержание гумуса, подвижные формы фосфора и калия) были близки к оптимальным параметрам и сравнительно выровнены по блокам. Созданные уровни отражают типичный диапазон различий по содержанию обменного магния и соотношений катионов $Ca^{2+} : Mg^{2+} : K^+$ в дерново-подзолистых суглинистых почвах Беларуси.

2. Установлены тесные зависимости урожайности полевых культур от уровня обеспеченности дерново-подзолистых легкосуглинистых почв обменным магнием, которые описываются уравнениями параболы второго порядка. Среднегодовая урожайность семян ярового рапса, ячменя, зерна и зеленой массы кукурузы на удобренных вариантах возростала на 25–29 %, 13–17, 12–13 и 19–23 % соответственно при повышении содержания обменного магния от низкого до оптимального уровня. Этот уровень, специфичный для каждой культуры, находится в диапазоне содержания Mg 140–240 мг/кг почвы, а оптимальное эквивалентное соотношение $Ca^{2+} : Mg^{2+}$ – в пределах 6–4. При дальнейшем повышении содержания магния в почве сверх оптимального уровня и сужении соотношения $Ca^{2+} : Mg^{2+} = < 3,0$ наблюдалось снижение урожайности кукурузы и ячменя на 3–8 %, а снижение урожайности семян ярового рапса достигало 32 %.

3. Установлены количественные параметры почвенной и растительной диагностики магниевое питания исследованных культур, позволяющие прогнозировать эффективность некорневых магниевых подкормок растений. Эффективность некорневых подкормок растений раствором сульфата магния закономерно снижается по мере повышения содержания обменного магния в почве, что подтверждает надежность почвенной диагностики магниевое питания.

4. Получены существенные прибавки урожайности семян рапса – 2,0–3,2 ц/га, зерна ячменя – 3,4–9,5 ц/га и зерна кукурузы – 6,7–7,6 ц/га от некорневых подкормок раствором сульфата магния при низком и среднем содержании обменного магния в почве. Рекомендуется проведение некорневой подкормки ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 4%-ный раствор, Mg 1,5 кг/га) в фазы кушения ячменя, образования 6–8 листьев кукурузы и в фазу бутонизации рапса при недостаточном уровне обеспеченности почвы обменным магнием ($\text{Mg} \leq 140$ мг/кг почвы). При оптимальном и высоком содержании обменного магния применение некорневых магниевых подкормок на посевах ячменя не эффективно или сопровождается снижением урожайности. Аналогичным было и действие серосодержащих удобрений (S 60 кг/га) в форме фосфогипса или сульфата аммония.

5. Оптимизация магниевых питаний растений позволяет повысить масличность семян рапса, содержание сырого белка в зерне кукурузы, увеличить сбор сырого белка с гектара посева ярового ячменя на 20–30 %, или на 100–140 кг/га, и несколько повысить биологическую ценность белка со сбалансированным составом критических и незаменимых аминокислот.

Список использованных источников

1. *Магницкий, К. П.* Магниевые удобрения / К. П. Магницкий. – М.: Колос, 1967. – 200 с.
2. *Кулаковская, Т. Н.* Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев / Т. Н. Кулаковская. – Минск, 1978. – С. 227–232.
3. Магниевые удобрения в интенсивном земледелии: обзор. информ. / В. В. Прокошев [и др.]. – М.: ВНИИТЭИ агропром, 1987. – 51 с.
4. *Аристархов, А. Н.* Агрохимическое обоснование применения магниевых удобрений / А. Н. Аристархов // Плодородие. – 2002. – № 3. – С. 15–17.
5. *Шкляев, Н. И.* Магний в жизни растений / Н. И. Шкляев. – М.: Наука, 1981. – 96 с.
6. Методика крупномасштабного агрохимического и радиологического обследования почв сельскохозяйственных угодий Республики Беларусь. – Минск, 1992. – 44 с.
7. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич [и др.]. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2015. – 276 с.
8. Nutritional disorders of plants – development, visual and analytical diagnosis / W. Bergmann [et al.]. – Stuttgart, New York, 1992. – 234 p.
9. *Mercik, S.* Badania nad współdziałaniem potasu z magnezem i wapniem na różnych glebach i pod różnymi roślinami / S. Mercik, J. Goralski // Rośl. glebozn. – 1984. – Т. 35, N 1. – С. 81–96.
10. *Альшевский, Н. Г.* Действие магниевых удобрений на урожай и качество озимой пшеницы / Н. Г. Альшевский, Ю. Г. Дербон // Химия в сельском хозяйстве. – 1982. – № 4. – С. 17–20.
11. *Jokinen, R.* The magnesium status of Finnish mineral soils and the requirement of the magnesium supply / R. Jokinen // Magnesium Bulletin. – 1981. – N 3. – P. 1–5.
12. *Барбер, С. А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход / С. А. Барбер; под ред. Э. Е. Хавкина. – М.: Агропромиздат, 1988. – 376 с.
13. *Богдевич, И. М.* Потребность растений яровой рапса в магнии и сере на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве / И. М. Богдевич, О. Л. Мишук // Земляробства і ахова раслін. – 2008. – № 1(56). – С. 8–11.
14. Рекомендации по применению магниевых и серосодержащих удобрений под яровой рапс в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистых суглинистых почв магнием / Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2007. – 24 с.
15. Влияние возрастающих уровней обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием и удобрений на урожайность и качество зеленой массы кукурузы / О. М. Таврыкина [и др.] // Агрохимия. – 2013. – № 10. – С. 39–45.
16. Методика почвенной и растительной диагностики магниевых питаний растений кукурузы. / И. М. Богдевич [и др.]. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2014. – 28 с.
17. *Chwil, S.* Oddziaływanie magnezu i azotu na cechy jakościowe plonu pszenicy ozimej / S. Chwil // Ann. Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. – Lublin, Polonia, 2009. – Т. 64. – P. 61–66.
18. *Церлинг, В. В.* Диагностика питания сельскохозяйственных культур / В. В. Церлинг. – М.: Агропромиздат, 1990. – 235 с.
19. *Weichmann, W.* World fertilizer use manual / W. Weichmann. – IFA, Paris, 1998. – 304 p.
20. *Krauze, A.* The effect of magnesium on yield and crude oil content of winter rapeseed / A. Krauze, T. Bowszyc // Agro-Food-Industry Hi-Tech. – 1996. – March/April. – P. 39–40.
21. *Orlovius, K.* Wyniki badan nad wpływem nawożenia potasen, magnezium i siarką na rośliny oleiste w Niemczech. / K. Orlovius // Zbilansowane nawożenie rzepaku / W. Grzebisz (ed.). – Poznań, Poland, 2000. – P. 299–239.

Поступила в редакцию 11.01.2016