

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНаВОДСТВА

УДК 631.445.24:631.416.9:[633.1:631.559]

*Н. А. МИХАЙЛОВСКАЯ, О. М. ТАВРЫКИНА, Ю. В. ПУТЯТИН, Т. В. ПОГИРНИЦКАЯ***ВЛИЯНИЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ
ПОЧВЫ ОБМЕННЫМ МАГНИЕМ НА ЕЕ БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ
И УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР***Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь, e-mail: bionf1@yandex.ru**(Поступила в редакцию 18.06.2014)*

Введение. Магний является незаменимым биогенным элементом, необходимым для нормального функционирования растительной клетки. Биохимическая роль магния связана с тем, что он входит в состав хлорофилла, регулирующего фотосинтез, активирует ряд ферментов, а также входит в состав многих ферментов, катализирующих ключевые биохимические процессы [1–4]. Установлено участие магния в процессах синтеза белка и нуклеиновых кислот. Нарушение магниевое питания вызывает снижение содержания белка и повышает концентрацию свободных амидов и аминокислот в растениях. Магний существенно влияет на поглощение из почвы, передвижение и обмен фосфора в растениях [1–6].

Несмотря на значимую роль магния в клеточном метаболизме и функционировании ферментов, осуществляющих важнейшие биохимические процессы, влияние этого элемента на биологическую активность почвы слабо изучено [7, 8]. Актуальность исследований в этом направлении обусловлена недостатком информации и необходимостью установления биологически обоснованных уровней содержания магния в дерново-подзолистых почвах.

В настоящее время содержание обменного магния в почвах республики значительно возросло вследствие длительного известкования доломитовой мукой. Увеличивается площадь почв с высоким (избыточным) содержанием обменного магния [3, 5]. Это обуславливает необходимость агрохимических и биологических исследований по установлению оптимальных и пороговых уровней содержания этого элемента в почвах во избежание недобора урожая сельскохозяйственных культур из-за недостаточного или несбалансированно избыточного содержания обменных форм магния в почвах.

Содержание обменного магния сильно различается по отдельным полям и участкам. Если рассматривать на уровне элементарных участков, то разница в содержании магния может достигать двух порядков. Таким образом, в ряде полей севооборотов и рабочих участков, где наблюдаются большие различия в содержании обменного магния, нарушено требуемое соотношение катионов Ca^{2+}/Mg^{2+} и K^{+}/Mg^{2+} , это может оказывать негативное действие на интенсивность биохимической трансформации органического вещества, что также требует биологической оценки оптимальных и пороговых уровней содержания магния в почвах.

Необходимость биологической диагностики избыточного содержания магния в почве диктуется также экономическими соображениями, чтобы исключить нерациональные затраты [9].

Биологическое состояние почвы – один из основных оценочных критериев антропогенной деятельности. Микробные сообщества и аккумулялированные в почве ферменты выполняют кри-

тические функции, имеющие основополагающее значение – трансформацию органического вещества и обеспечение питания растений [10–13]. Биологические показатели количественно характеризуют интенсивность и направленность процессов трансформации органического вещества почвы, что позволяет оценивать влияние антропогенной нагрузки на состояние почвенного плодородия и определяет их экологическую значимость.

Цель исследований – в модельном полевом эксперименте установить влияние обеспеченности обменным магнием на урожайность сельскохозяйственных культур и биологическую активность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы.

Объекты и методы исследований. Биологические исследования проведены в модельном стационарном полевом опыте, заложенном в 1989 г. Почва опытного участка – дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на мощных лессовидных суглинках (СПК «Щемяслица» Минского района).

Биологическую диагностику почвы проводили в течение 2010–2011 гг. В 2010 г. исследуемой культурой была кукуруза на зеленую массу (гибрид Дельфин), в 2011 г. – яровой ячмень (сорт Атаман).

В опыте созданы четыре уровня обеспеченности почв Mg^{2+} (1М КСl), отражающие диапазон различий по содержанию магния в дерново-подзолистых суглинистых почвах Беларуси. Содержание катионов Mg^{2+} и Ca^{2+} и их соотношения типичны для хорошо окультуренных дерново-подзолистых пахотных почв (табл. 1).

Таблица 1. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с различными уровнями обеспеченности обменным магнием (1 М КСl)

Содержание Mg^{2+} , мг/кг		Гумус, %	$pH_{КСl}$	P_2O_5	K_2O	Ca	Ca^{2+}/Mg^{2+}	
2010 г.	2011 г.						мг/кг почвы	
71	71	1,8	6,1	292	313	1156	9,8	9,8
84	84	2,2	6,1	278	271	1008	7,2	7,2
137	181	2,2	6,2	294	245	908	3,9	3,0
172	243	2,1	6,3	295	237	932	3,3	2,3

Содержание и соотношение катионов Ca^{2+}/Mg^{2+} по уровням в 2010 г. до проведения насыщения составило 71, 84, 137, 172 мг/кг и 9,8–7,2–3,9–3,3 соответственно. В результате дополнительного насыщения магнием III и IV уровней содержание обменного магния поднялось до 181 и 243 мг/кг при эквивалентных соотношениях Ca^{2+}/Mg^{2+} 3,0 и 2,3. Высокие уровни содержания обменного Mg на делянке создавали путем внесения быстродействующего удобрения – сульфата магния ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Агрохимические параметры почвы были определены дважды: весной – перед насыщением опытных делянок и осенью – после уборки урожая ($pH_{КСl}$, гумус, P_2O_5 , K_2O , Ca, Mg). На опытном поле реакция почвы, $pH_{КСl}$, различалась в пределах 6,1–6,3. Опытные делянки находились в одной группе по содержанию подвижных фосфатов, содержание P_2O_5 (0,2 М НСl) составило 278–295 мг/кг почвы, подвижных форм калия K_2O (0,2 М НСl) в зависимости от уровня обеспеченности магнием составило от 237 до 313 мг/кг почвы, обменного Ca (1М КСl) – 908–1156 мг/кг почвы. Содержание гумуса (по Тюрину) было в пределах 1,8–2,2 %.

Биологические исследования проведены на следующих вариантах: контроль – без удобрений, $N_{110+30}P_{60}K_{120}$ (под кукурузу) и $N_{60+30}P_{60}K_{120}$ (под яровой ячмень). Минеральные удобрения в виде карбамида, аммофоса, калия хлористого вносили весной под предпосевную культивацию. Повторность в опыте 4-кратная, размещение делянок рендомизированное. Общая площадь делянки – 12 м², учетная – 8 м².

Содержание углерода в микробной биомассе определяли методом фумигации-экстракции [14]. Для оценки дегидрогеназной активности почвы использовали модифицированный метод А. Ш. Галстяна с применением трифенилтетразолия хлористого в качестве ферментного субстрата, активность рассчитывали в мг трифенилформазана/кг почвы [15].

Активность инвертазы в почве определяли по методу Т. А. Щербаковой, используя динитросалициловую кислоту для индикации редуцирующих сахаров; активность фермента расчи-

тивали в мг глюкозы/кг почвы [16]. Активность уреазы устанавливали колориметрическим методом, разработанным Т. А. Щербаковой [15], в качестве ферментного субстрата использована мочеви́на, для количественного определения аммония применяли реактив Несслера; активность фермента рассчитывали в мг N-NH₄⁺/кг почвы. Активность полифенолоксидазы и пероксидазы оценивали колориметрическим методом по трансформации гидрохинона в почве, активность ферментов выражали в мг 1,4-бензохинона/кг почвы [15]. Содержание обменного магния в почве определяли методом ЦИНАО (ГОСТ 26487–85) [17].

По сравнению со средними многолетними данными вегетационные периоды 2010 и 2011 гг. отличались повышением температуры воздуха в апреле – августе на 3–5°. По сумме осадков погодные условия были близки средним многолетним величинам, дефицит осадков отмечали в апреле 2010 и 2011 гг.

Результаты и их обсуждение. Интенсивное известкование доломитовой мукой (12 % Mg²⁺) в течение 40 лет привело к удвоению содержания обменных форм магния в дерново-подзолистых почвах республики. В настоящее время средневзвешенное содержание обменного магния (Mg²⁺) в пахотных почвах приближается к оптимальному для полевых севооборотов и составляет 147 мг/кг. Подавляющее большинство почв Беларуси (67,9 %) характеризуется оптимальным содержанием Mg²⁺, однако имеет место значительная дифференциация по этому показателю. Так, в Брестской области почвы с низким содержанием обменного магния составляют 6,1 %, в Гомельской – 13,7 %. Почвы с избыточным содержанием обменного магния в целом по республике составляют 5,6 %, в Минской и Брестской областях – 11,2 и 8,7 % соответственно, в Могилевской – 7,2 % [18]. Это свидетельствует о необходимости исследований в широком диапазоне его содержания в почвах, так как параметры оптимального содержания магния в современной научной литературе, как правило, не приводятся.

По литературным данным, содержание магния в дерново-подзолистых суглинистых почвах в диапазоне 90–180 мг/кг обеспечивает получение высокой урожайности сельскохозяйственных культур [18]. Не менее важным условием получения высокой продуктивности культур является соблюдение определенного соотношения катионов кальция и магния в почве [1–6]. До настоящего времени вопрос об оптимальном соотношении Ca²⁺/Mg²⁺ для разных культур остается открытым. Интенсивность поглощения кальция и магния растениями примерно одинакова. Однако для того чтобы оба катиона с равной скоростью поступали в корни растений, концентрация обменного кальция должна превышать концентрацию обменного магния. Это обусловлено более прочной связью кальция с катионнообменными частицами почвы. Согласно исследованиям С. А. Барбера [4], избыток магния в почве не вызывает снижения урожайности, если соотношение Ca²⁺/Mg²⁺ значительно больше единицы. Оптимальный диапазон соотношения Ca²⁺/Mg²⁺ составляет 2–7. Так как почвы различаются по относительной прочности связывания катионов кальция и магния, оптимальный диапазон соотношения Ca²⁺/Mg²⁺ также может варьировать в определенных пределах. К настоящему времени в научной литературе приводятся в основном ориентировочные пороговые значения соотношения Ca²⁺/Mg²⁺ для разных почв.

По данным В. А. Ковды [2], физиологически оптимальным соотношением поглощенных катионов для основных культур является 60–70 % обменного кальция, 10–15 % обменного магния и 3–5 % обменного калия (от емкости поглощения), что соответствует идеальному составу обменных катионов в почве. Однако в разных почвенно-климатических зонах требования разных сельскохозяйственных культур будут различаться.

По данным исследований Института почвоведения и агрохимии, оптимальное соотношение Ca²⁺/Mg²⁺ находится в пределах 4–6. Устойчивая депрессия урожайности основных сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве отмечается при содержании MgO в почве более 300 мг/кг и эквивалентном соотношении Ca²⁺/Mg²⁺ менее 2,8 [3, 5]. На дерново-подзолистых супесчаных почвах избыток магния в почвенном растворе проявляется при меньшей концентрации обменного магния в почве.

В сложившихся условиях актуально установление количественных параметров избыточной концентрации магния в почвах, которая может вызывать снижение урожайности и качества сельскохозяйственных культур. В этом отношении особая диагностическая роль принадлежит

оценке биологического состояния почв в зависимости от обеспеченности магнием, в том числе в зоне оптимального соотношения $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$. Требуется установить биологически обоснованные уровни содержания обменного магния в почвах, определяющие зону оптимума, а также его недостаток или избыток, вызывающие снижение урожайности и качества сельскохозяйственных культур.

Разнообразие используемых в настоящее время показателей биологической активности связано с многообразием функций, выполняемых почвенными микроорганизмами. Для диагностических целей наибольший интерес представляет характеристика универсальных микробиологических и биохимических процессов.

Интегральными микробиологическими показателями считаются численность почвенных микроорганизмов и их метаболическая активность [14, 19–21]. Круговорот веществ и энергии, трансформация органического вещества и мобилизация элементов питания – микробно-опосредованные процессы, протекающие при прямом участии микроорганизмов или за счет микробных метаболитов [10, 12].

В основе микробного метаболизма лежит работа ферментов, почвы содержат все известные классы ферментов, однако гидролитические и окислительно-восстановительные ферменты представляют наибольший интерес [10–13]. Выбор показателей ферментативной активности в наших исследованиях обусловлен их связью с универсальными почвенными биохимическими процессами.

Микробную биомассу в почве оценивали по содержанию в ней углерода ($\text{C}_{\text{биомассы}}$), который широко используется в микробиологических исследованиях [14]. Микробная биомасса – основной агент изменений, происходящих в почве под влиянием агротехнологий, она более лабильна по сравнению с общим пулом органического вещества, возраст углерода микробной биомассы составляет всего несколько лет [19–21]. Микробная биомасса тесно коррелирует с активной, или разлагаемой, фракцией органического вещества [19]. Эта фракция легко утилизируется микроорганизмами и отличается быстрым круговоротом в почве [22]. В связи с этим микробная биомасса считается объективным показателем при оценке влияния агротехнологий на численность микроорганизмов в почве.

Наряду с микробной биомассой определена дегидрогеназная активность почвы, которая характеризует интенсивность процессов дегидрирования органических субстратов и метаболическую активность микрофлоры. Дегидрогеназы имеются у абсолютного большинства микроорганизмов. В отличие от других ферментов дегидрогеназы не имеют экстрацеллюлярного компонента, они не адсорбируются и не накапливаются в почве, их активность дает объективную информацию об актуальной численности микроорганизмов в почве, так как дегидрирование органического субстрата идет за счет дегидрогеназ живых микробных клеток [23].

Микробиологические исследования показали, что содержание магния в почве является фактором, регулирующим уровень ее заселенности микроорганизмами и их метаболическую активность. По мере увеличения содержания обменного магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве от I к IV уровню (71, 84, 137, 172 мг/кг) наблюдается постепенный рост микробной биомассы и ее метаболической активности на вариантах без удобрений и с внесением NPK (рис. 1, а). При насыщении почвы обменным магнием до 181 мг/кг отмечена относительная стабилизация показателей микробной биомассы и дегидрогеназной активности почвы. Повышение обеспеченности почвы Mg^{2+} до 243 мг/кг вызывало снижение численности и метаболической активности микрофлоры (рис. 1, б).

Изученные микробиологические показатели – $\text{C}_{\text{биомассы}}$ и дегидрогеназная активность – одинаково варьировали в зависимости от содержания обменного магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (рис. 1, 2).

Статистическая оценка показала, что микробиологические показатели в большей мере зависели от содержания магния в почве. Гидротермические условия и возделываемые культуры были менее значимыми факторами. По данным дисперсионного анализа, дегидрогеназная активность почвы на 68 % зависела от обеспеченности магнием и на 29 % от гидротермических условий года и возделываемой культуры.

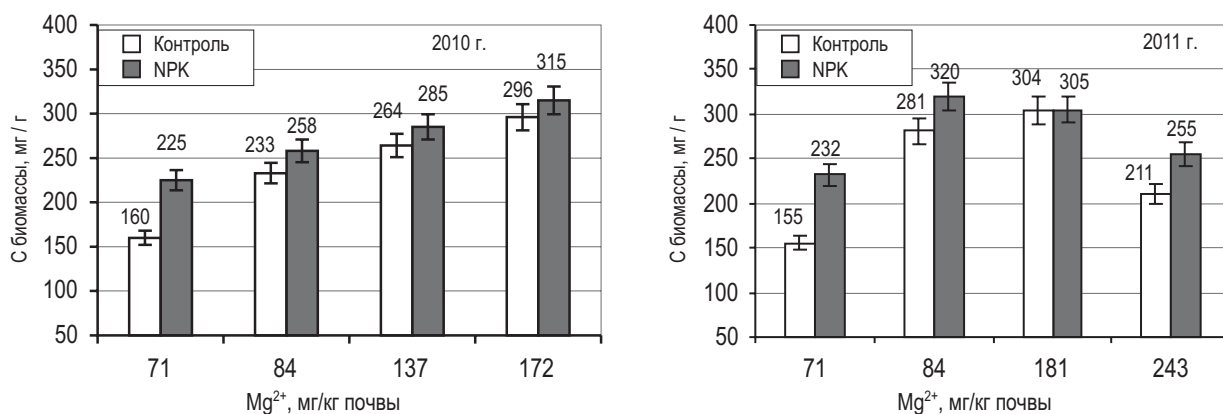


Рис. 1. Содержание углерода в микробной биомассе в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, 2010 и 2011 гг.

В диапазоне соотношения катионов кальция и магния (3,9–7,2) параметры $C_{\text{биомаcсы}}$ варьируют в пределах 233–320 мг/г почвы, дегидрогеназной активности – в пределах 544–833 мг ТФФ/кг почвы (см. рис. 1, 2).

Одна из глобальных функций микробных сообществ почвы – деструкционная, она обеспечивает минерализацию органических остатков до усвояемых форм [10]. Динамика и мобилизация элементов питания связана с действием гидролитических ферментов преимущественно микробного происхождения. Для оценки способности почвы трансформировать сложные органические соединения в усвояемые единицы целесообразно использовать активность гидролитических ферментов завершающих стадий гидролиза [24], когда образуются конечные продукты, в частности аммоний в процессах аммонификации и моносахариды при минерализации углеводов.

В результате аммонификации азот органических соединений, составляющий около 94–95 %, переходит в минеральные формы и становится доступным для растений и микроорганизмов. На разных стадиях аммонификации действуют специфические группы гидролитических ферментов – протеаз, пептидаз, дезаминаз и амидогидролаз, которые определяют динамику азота в почве [10, 25–27]. На завершающих стадиях аммонификации действуют амидогидролазы, к которым относится уреаза [10].

В состав растительных остатков, поступающих в почву, входят углеводы, различающиеся по скорости разложения: моно-, олиго- и полисахариды. Медленно разлагаемая целлюлоза составляет около 40–70 % сухого вещества растительных остатков и является наиболее значимым полисахаридом, поступающим в почву. Ферментативный гидролиз полисахаридов до мономеров представляет собой сложный многоступенчатый процесс, который на разных стадиях катализируется специфическими группами ферментов [13, 24, 28]. В качестве диагностического показателя способности почвы накапливать усвояемые структурные единицы целесообразно ис-

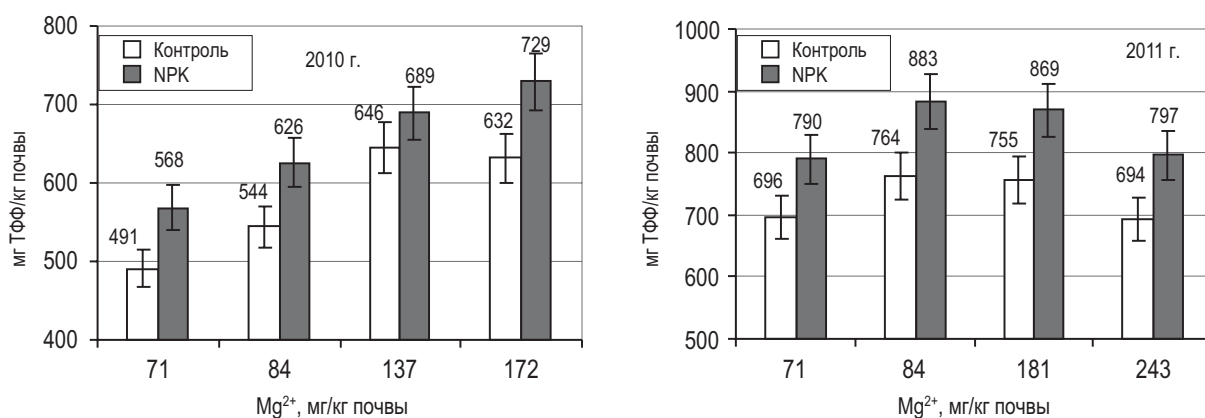


Рис. 2. Дегидрогеназная активность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с разным содержанием магния, 2010 и 2011 гг.

пользовать активность инвертаз, действующих на последних стадиях гидролиза, приводящих к образованию растворимых моносахаридов.

Установлено, что возрастание обеспеченности почвы магнием от 71 до 172 мг/кг (2010 г.) приводит к повышению уреазной активности в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве от 163 до 274 мг N-NH₄⁺/кг, что указывает на активизацию процессов аммонификации и повышение обеспеченности почвы минеральными формами азота. При указанных содержаниях магния в почве не отмечено депрессии значимых для плодородия процессов аммонификации. Снижение уреазной активности отмечено на III и IV уровнях обеспеченности почвы магнием при его содержании 181 и 243 мг/кг (2011 г.). Это указывает, что насыщение почвы Mg²⁺ до 181 мг/кг и тем более до 243 мг/кг является избыточным и депрессирует процессы аммонификации, нарушая баланс микробиологических процессов (табл. 2).

По данным дисперсионного анализа, содержание магния в почве является более значимым фактором, регулирующим уреазную активность почвы, по сравнению с гидротермическими условиями вегетационного периода и возделываемыми культурами. Активность уреазы и, соответственно, интенсивность аммонификации в почве на 58 % зависела от обеспеченности магнием и на 36 % от гидротермических условий года и возделываемой культуры.

Сходные закономерности установлены в отношении инвертазной активности почвы. Повышение способности почвы обеспечивать микробные сообщества источниками энергии установлено в диапазоне обеспеченности магнием от 71 до 172 мг/кг (2010 г.), при этом активность инвертазы возрастала от 1156 до 1635 мг глюкозы/кг почвы. Депрессия активности фермента на III и IV уровнях указывает, что содержание Mg²⁺ в пределах 181–243 мг/кг является избыточным и тормозит минерализацию углеводов в почве (см. табл. 2).

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что повышение содержания магния от 71 до 172 мг/кг в почве благоприятно воздействует на интенсивность протекания важнейших микробиологических процессов, регулирующих почвенное плодородие – аммонификацию и ми-

Таблица 2. Влияние обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием на активность гидролитических ферментов, 2010–2011 гг.

Содержание Mg ²⁺ в почве	Вариант опыта	Уреазная активность, мг N-NH ₄ ⁺ /кг	Инвертазная активность, мг глюкозы/кг
<i>2010 г.</i>			
I уровень, 71 мг/кг	Контроль	163	1156
	NPK	204	1210
II уровень, 84 мг/кг	Контроль	186	1245
	NPK	233	1365
III уровень, 137 мг/кг	Контроль	214	1528
	NPK	257	1607
IV уровень, 172 мг/кг	Контроль	241	1608
	NPK	274	1635
Фактор А (Mg ²⁺)		9,7	139,5
Фактор В (NPK)		6,8	98,6
<i>2011 г.</i>			
I уровень, 71 мг/кг	Контроль	218	1664
	NPK	258	1734
II уровень, 84 мг/кг	Контроль	247	1777
	NPK	272	1847
III уровень, 181 мг/кг	Контроль	187	1495
	NPK	231	1607
IV уровень, 243 мг/кг	Контроль	164	1481
	NPK	205	1537
Фактор А (Mg ²⁺)		15,6	109,4
Фактор В (NPK)		11,0	77,3

нерализацию углеводов. Депрессия уреазной и инвертазной активности отмечается при насыщении дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием до 180 мг/кг.

В диапазоне соотношения катионов кальция и магния 3,9–7,2 параметры уреазной активности варьируют в пределах 186–272 мг N-NH₄⁺/кг почвы, инвертазной активности – 1245–1847 мг глюкозы/кг почвы (см. табл. 2).

Почвенные микроорганизмы и их метаболиты ведут разнонаправленные процессы, одновременно с минерализацией протекает гумификация органических соединений [10–12]. Несмотря на наличие разных концепций гумусообразования, общепризнано, что гумификация – процесс биохимический [10–13], управляемый микробными ферментами. В настоящее время катализаторами гумификации разлагающегося органического вещества считаются микробные оксидазы – фенолоксидазы и пероксидазы [29, 30], а их активность может служить показателем интенсивности процессов гумификации в почве [11, 13, 31, 32]. Полифенолоксидазы и пероксидазы являются основными агентами гумификации лигнинов, составляющих 15–30 % растительных остатков и наряду с белками являющихся главными поставщиками структурных единиц для гумификации. Микробные оксидазы катализируют окисление ароматических соединений и их производных до хинонов, которые в соответствующих условиях конденсируются с аминокислотами и пептидами с образованием первичных молекул гуминовых кислот [11, 12].

В наших исследованиях проведена оценка активности пероксидазы (ПО) и полифенолоксидазы (ПФО) в зависимости от содержания магния в почве. Как и по другим изученным ферментам, наблюдается общая закономерность – повышение ферментативной активности при внесении минеральных удобрений N₆₀₊₃₀P₆₀K₁₂₀ по сравнению с контролем. Повышение содержания магния в почве от 71 до 172 мг/кг активизировало почвенные пероксидазы и полифенолоксидазы. Дальнейшее увеличение содержания магния до 181 и 243 мг/кг приводило к депрессии активности оксидаз (табл. 3).

В диапазоне оптимального соотношения катионов кальция и магния параметры пероксидазной активности составляют 35,0–46,3 мг бензохинона/кг, полифенолоксидазной – 39,7–43,7 мг бензохинона/кг почвы.

Таблица 3. Влияние обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием на активность ПО и ПФО, 2010–2011 гг.

Содержание Mg ²⁺ в почве	Вариант опыта	ПО	ПФО
		мг бензохинона/кг	
<i>2010 г.</i>			
I уровень, 71 мг/кг	Контроль	38,6	39,1
	НPK	40,0	40,6
II уровень, 84 мг/кг	Контроль	40,4	39,7
	НPK	42,2	41,8
III уровень, 137 мг/кг	Контроль	44,3	41,1
	НPK	46,3	43,7
IV уровень, 172 мг/кг	Контроль	50,8	39,0
	НPK	51,3	43,2
Фактор А (Mg ²⁺)		2,34	2,20
Фактор В (NPK)		1,65	1,55
<i>2011 г.</i>			
I уровень, 71 мг/кг	Контроль	34,0	41,3
	НPK	36,5	42,9
II уровень, 84 мг/кг	Контроль	35,0	42,1
	НPK	36,5	43,5
III уровень, 181 мг/кг	Контроль	34,2	39,9
	НPK	35,0	40,2
IV уровень, 243 мг/кг	Контроль	32,2	39,9
	НPK	33,3	40,7
Фактор А (Mg ²⁺)		0,86	1,25
Фактор В (NPK)		0,61	0,88

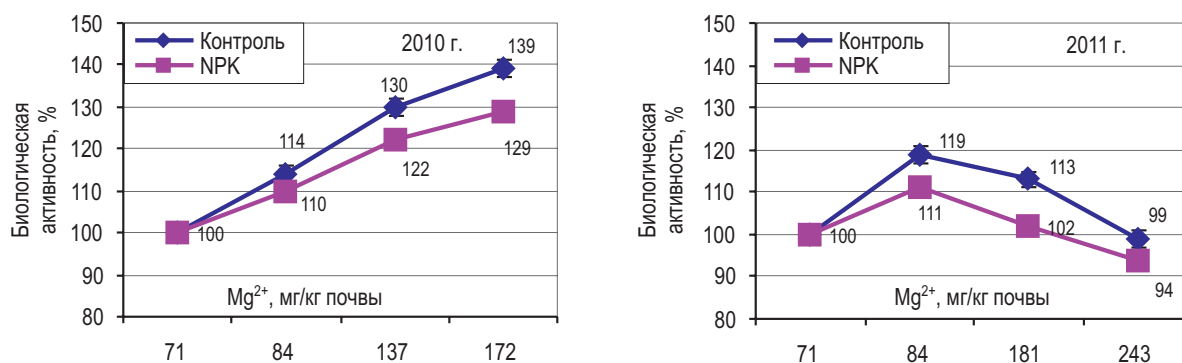


Рис. 3. Биологическая активность почвы в зависимости от обеспеченности обменным магнием, 2010 и 2011 гг.

Для обобщения данных по влиянию обеспеченности почвы подвижным магнием на ее биологический статус проведена суммарная оценка биологической активности почвы в относительных единицах (%). В комплексный показатель биологической активности включены все микробиологические и биохимические параметры за 2010–2011 гг.

На контроле без удобрений повышение показателя суммарной биологической активности отмечается в диапазоне насыщения почвы магнием от 71 до 172 мг/кг. При увеличении содержания магния в почве до 181 и далее до 243 мг/кг проявляется тенденция снижения показателя суммарной биологической активности (рис. 3).

На вариантах внесения минеральных удобрений при содержании обменного магния на уровне 172 мг/кг снижения показателя суммарной биологической активности не отмечается, но уже при насыщении почвы магнием до 181 и 243 мг/кг наблюдается постепенное снижение показателя биологической активности почвы.

Проведение микробиологических и биохимических исследований позволило определить биологически обоснованные уровни содержания обменного магния в дерново-подзолистой суглинистой почве. Экспериментально установлено, что насыщение дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием свыше 172 мг/кг нецелесообразно по биологическим критериям – на вариантах без удобрений отмечается тенденция снижения показателя суммарной биологической активности, а при содержании магния на уровне 181 и 243 мг/кг отмечается значительная депрессия биологической активности почвы. Внесение минеральных удобрений в определенной степени компенсирует отрицательное действие избыточного содержания магния – депрессия биологической активности на удобренных вариантах отмечается при насыщении дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы магнием до 181 мг/кг.

Выводы о биологически обоснованных уровнях обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы магнием подтверждаются урожайными данными. В исследованиях лаборатории мониторинга плодородия почв и экологии Института почвоведения и агрохимии установлено, что в контрольном варианте без удобрений урожайность зеленой массы кукурузы повышалась по мере увеличения содержания обменного магния в почве вплоть до уровня 243 мг Mg²⁺ на кг почвы (табл. 4). Прибавка урожайности за счет повышения обеспеченности почвы магнием в 2010 г. составила 26,6 ц к.ед/га. В варианте с применением минеральных удобрений N₁₁₀₊₃₀P₆₀K₁₂₀ урожайность зеленой массы кукурузы повышалась до III уровня содержания обменного Mg²⁺ (181 мг/кг почвы) на 9–25 %, снижаясь на 7 % (на 11,6 ц к.ед/га) при повышении уровня обменного магния до 243 мг/кг почвы. Наиболее эффективным действие минеральных удобрений оказалось на уровне содержания магния 181 мг/кг, обеспечивая прибавку 21,4 к.ед. по сравнению с контролем. На IV уровне обеспеченности почвы обменным магнием прибавка урожайности зеленой массы кукурузы от минеральных удобрений снизилась до 8 ц к.ед/га.

Урожайность зерна ячменя достоверно увеличивалась только при повышении содержания обменного магния в почве в диапазоне 71–181 мг/кг почвы. Дальнейшее повышение концентрации обменного магния в почве до уровня 243 мг/кг почвы не приводило к увеличению урожайности на исследуемых вариантах опыта. Наибольшая прибавка зерна была получена на уровне

с обеспеченностью обменным магнием 181 мг/кг, составившая в контрольном варианте 6,5 ц к.ед/га, в удобренном варианте – 3,9 ц к.ед/га. При содержании Mg^{2+} 243 мг/кг почвы снижение урожайности было незначительным и составило 1–5 % (0,8–2,7 %). Наиболее эффективным действие минеральных удобрений оказалось на самом низком уровне содержания магния 71 мг/кг, обеспечивая прибавку 36,2 ц по сравнению с контролем.

Таблица 4. Урожайность зеленой массы кукурузы и зерна ячменя в зависимости от применения удобрений и обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием

Вариант опыта	Урожайность, ц к.ед/га		Урожайность культур 2010–2011 гг., ц к.ед/га	Прибавка, к.ед. от	
	кукурузы	ячменя		Mg^{2+} в почве	НРК
<i>Mg 71 мг/кг почвы; $Ca^{2+}/Mg^{2+} = 9,8$</i>					
Контроль (б/у)	117,0	47,4	82,2	–	–
$N_{140^{*}} P_{60} K_{120}$	130,6	83,6	107,1	–	24,9
<i>Mg 84 мг/кг почвы; $Ca^{2+}/Mg^{2+} = 7,2$</i>					
Контроль (б/у)	135,2	51,9	93,6	11,4	–
$N_{140(90)} P_{60} K_{120}$	142,4	85,5	114,0	6,9	20,4
<i>Mg 181 мг/кг почвы; $Ca^{2+}/Mg^{2+} = 3,0$</i>					
Контроль (б/у)	141,8	53,9	97,8	15,6	–
$N_{140(90)} P_{60} K_{120}$	163,2	87,5	125,3	18,2	27,5
<i>Mg 243 мг/кг почвы; $Ca^{2+}/Mg^{2+} = 2,3$</i>					
Контроль (б/у)	143,6	51,2	97,4	15,2	–
$N_{140(90)} P_{60} K_{120}$	151,6	86,7	119,2	12,1	21,8
НСП ₀₅					
Фактор А (НРК)	9,01	5,32	7,17		
Фактор В (Mg^{2+})	10,52	7,43	8,98		

* Доза азота под кукурузу.

** Доза азота под яровой ячмень.

В среднем за два года исследований наибольшая урожайность культур – 123,3 ц к.ед/га – была получена на почве с содержанием обменного магния 181 мг/кг почвы, прибавка урожайности за счет повышения обеспеченности почвы магнием на 110 мг/кг (от 71 до 181 мг/кг) составила 18,2 ц к.ед/га, при этом эквивалентное соотношение Ca^{2+}/Mg^{2+} в почве составило 3,0. Дальнейшее повышение содержания магния в почве приводило к снижению урожайности на 5 % (на 6,1 ц/га к.ед.). Расширение соотношения Ca^{2+}/Mg^{2+} до уровня 7,2–9,8 или снижение до уровня 2,3 сопровождалось недобором урожайности.

Наибольшая прибавка от внесения минеральных удобрений – 27,5 ц/га – была получена на почве с обеспеченностью обменным магнием 181 мг/кг.

Заключение. В полевом эксперименте, моделирующем разную насыщенность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием – в диапазоне 71, 84, 137, 172, 181 и 243 мг/кг и выровненной обменной кислотности, проведены микробиологические и биохимические исследования. Установлено, что в диапазоне содержания Mg^{2+} в почве от 71 до 172 мг/кг при внесении полного минерального удобрения отмечается постепенный рост микробной биомассы и метаболической активности микробных сообществ, а также повышение интенсивности ключевых микробиологических процессов, регулирующих почвенное плодородие – аммонификации, минерализации углеводов и гумификации растительных остатков (биологически обоснованный диапазон). При насыщении дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием до 180 мг/кг, которое по биологическим критериям можно считать пороговым, замедляется аммонификация, минерализация углеводов и гумификация растительных остатков, в особенности на контроле без удобрений. При достижении концентрации обменного магния до 243 мг/кг отмечается депрессия микробиологических и биохимических процессов в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, что подтверждается урожайными данными.

В диапазоне соотношения катионов кальция и магния 3,9–7,2 параметры биологических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы варьируют в следующих пределах: $C_{\text{биомассы}}$ – 233–320 мг/г почвы, дегидрогеназной активности – 544–833 мг ТФФ/ кг почвы, уреазной активности – 186–272 мг $N-NH_4^+$ /кг почвы, инвертазной активности – 1245–1847 мг глюкозы/кг почвы, пероксидазной активности – 35,0–46,3 мг 1,4-бензохинона на 1 кг почвы, полифенолоксидазной активности – 39,7–43,7 мг 1,4-бензохинона на 1 кг почвы.

Установлено повышение урожайности сельскохозяйственных культур на 15,6–18,2 ц к.ед/га за счет повышения содержания обменного магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в диапазоне 71–181 мг Mg^{2+} на кг почвы. Дальнейшее повышение содержания Mg^{2+} до уровня 243 мг/кг почвы приводило к снижению урожайности культур на 5 %. При оптимальном уровне содержания обменного магния в почве 181 мг/кг эквивалентное соотношение катионов Ca^{2+}/Mg^{2+} составило 3,0.

Литература

1. *Кедров-Зихман, О. К.* Известкование почв подзолистой зоны / О. К. Кедров-Зихман. – М.: Сельхозгиз, 1948. – 32 с.
2. *Ковда, В. А.* Основы учения о почвах / В. А. Ковда. – М.: Наука, 1973. – Т. 1. – 447 с.
3. *Кулаковская, Т. Н.* Баланс кальция и магния в пахотных землях Белоруссии / Т. Н. Кулаковская, Л. П. Детковская // Химия в сельском хозяйстве. – 1972. – № 12. – С. 16–20.
4. *Барбер, С. А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход / С. А. Барбер; под ред. Э.А. Хавкина. – М.: Агропромиздат, 1988. – 376 с.
5. *Богдевич, И. М.* Магниеые удобрения на дерново-подзолистых почвах: анализ. обзор / И. М. Богдевич, О.В. Ломонос; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2009. – 39 с.
6. Магниеые удобрения в интенсивном земледелии: обзор. информ. / В. В. Прокошев [и др.] // ВНИИТЭИагропром. – М., 1987. – 51 с.
7. *Пуятин, Ю. В.* Влияние обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы кальцием и магнием на биологическую активность / Ю. В. Пуятин, Н. А. Михайловская, Г. В. Мороз // Почвенные исследования и применение удобрений. – Вып. 23. – Минск, 1995. – С. 239–248.
8. *Клебанович, Н. В.* Влияние известкования на микрофлору и микробиологические особенности дерново-подзолистых почв Белоруссии / Н. В. Клебанович, Г. В. Мороз // Почвоведение. – 1998. – № 1. – С. 74–77.
9. Методика почвенной и растительной диагностики магниевого питания кукурузы / И. М. Богдевич, О. М. Таврыкина, Ю. В. Пуятин, В. А. Довнар, Е. С. Третьяков, Г. И. Каленик, Д. В. Маркевич, П. С. Манько. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2014. – 28 с.
10. *Звягинцев, Д. Г.* Биология почв / Д. Г. Звягинцев, И. Л. Бабьева, Г. М. Зенова. – М.: МГУ, 2005. – 445 с.
11. *Александрова, Л. Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации / Л. Н. Александрова. – Л., 1980. – С. 122–133.
12. *Туев, Н. А.* Микробиологические процессы гумусообразования / Н. А. Туев. – М.: ВО Агропромиздат, 1989. – 237 с.
13. *Щербакова, Т. А.* Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества / Т. А. Щербакова. – Минск: Наука и техника, 1983. – 221 с.
14. *Vance, E. D.* An extraction method for measuring soil microbial biomass C / E. D. Vance., P. C. Brookes., D. S. Jenkinson // Soil Biol. Biochem. – 1987. – Vol. 19, N 6. – P. 703–707.
15. *Хазиев, Ф. Х.* Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев – М.: Наука, 1990. – 189 с.
16. *Щербакова, Т. А.* К методике определения активности инвертазы и амилазы в почве / Т. А. Щербакова // Сборник докладов симпозиума по ферментам почвы. – Минск, 1968. – С. 453–455.
17. Почвы. Определение обменного Са и Mg методом ЦИНАО: ГОСТ 24687–85. – Введ. 1986–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 13 с.
18. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / под общ. ред. И. М. Богдевича. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2012. – 276 с.
19. Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils / E. G. Gregorich [et al.] // Soil Biol. Biochem. – 2000. – Vol. 32. – P. 581–587.
20. *Ryan, M. C.* Combining ^{13}C natural abundance and fumigation extraction methods to investigate soil microbial biomass turnover / M. C. Ryan, R. Aravana // Soil Biol. Biochem. – 1994. – Vol. 26. – P. 1583–1585.
21. *Jenkinson, D. S.* Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil / D. S. Jenkinson; J. R. Wilson (ed.) // Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Systems, CAB Wallingford. – 1988. – P. 368–386.
22. Soil organic matter and its inert and decomposable part in arable soils in the Czech Republic / J. Kubat [et al.] // Почвоведение и агрохимия. – 2006. – № 1(36). – С. 40–49.
23. *Cashida, L. E.* Microbial metabolic activity in soil as measured by dehydrogenase determinations / L. E. Cashida // Appl. Environ. Microbiol. – 1977. – Vol. 34. – P. 630–636.

24. Звягинцев, Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей / Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–52.
25. Михайлоўская, Н. А. Уплыў сельскагаспадарчых культур і ўмоў увільгатнення на ферментатыўную актыўнасць дзярнова-падзолістай суглінкавай глебы / Н. А. Михайлоўская // Вес. Акад. навук БССР. Сер. с.-г. навук. – 1991. – № 3. – С. 91–94.
26. Bandick, A. K. Field management effects on soil enzyme activities / A. K. Bandick, R. P. Dick // Soil Biol. Biochem. – 1999. – Vol. 31. – P. 1471–1479.
27. Ceccanti, B. Fractionation of humus–urease complexes / B. Ceccanti [et al.] // Soil Biol. Biochem. – 1978. – Vol. 10. – P. 39–45.
28. Speir, T. W. Hydrolytic Enzyme Activities to Assess Soil Degradation and Recovery / T. W. Speir, D. J. Ross // Enzymes in the environments: activity, ecology and applications / R. G. Burns, R. P. Dick. – NY, 2002. – P. 407–431.
29. Martin, J. P. Comparison of the use of phenolase and peroxidase for the synthesis of model humic acid type polymers / J. P. Martin, K. A. Haider // Soil Sci. Soc. Amer. J. – 1980. – Vol. 44. – Is. 5. – P. 983–988.
30. Михайловская, Н. А. Взаимосвязь ферментативной активности с содержанием гумуса в дерново-подзолистой супесчаной почве / Н. А. Михайловская, О. Миканова // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2008. – № 4. – С. 57–61.
31. Kirk, T. K. Enzymatic “combustion”: the microbial degradation of lignin / T. K. Kirk, R. L. Ferrell // Annu. Rev. Microbiol. – 1987. – Vol. 41. – P. 465–505.
32. Михайловская, Н. А. Взаимосвязь активности оксидаз с содержанием разных фракций органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве / Н. А. Михайловская, О. Миканова // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2011. – № 1. – С. 37–44.

N. A. MIKHAILOVSKAYA, O. M. TAVRYKINA, Yu. V. PUTYATIN, T. V. POGIRNITSKAYA

INFLUENCE OF THE SUPPLY OF LUVISOL SANDY LOAM SOIL WITH EXCHANGEABLE MAGNESIUM ON ITS BIOLOGICAL ACTIVITY AND THE YIELD OF CROPS

Summary

Microbiological and enzymatic research has been conducted in the field experiment modeling different supply of Luvisol sandy loam soil with exchangeable magnesium (71, 84, 137, 172, 181 and 243 mg/kg) and even exchangeable acidity. It's established that within the diapason of 70–170 Mg²⁺ content in soil and with NPK-fertilization it's observed the increase of soil microbial biomass, metabolic activity of microbial communities, intensity of the main microbiological processes which regulate soil fertility – ammonification, carbohydrates mineralization and plant residues humification. The rise of Mg²⁺ concentration up to 180 mg/kg results in the retarding of microbiological and enzymatic processes in soil. When the concentration of Mg²⁺ in soil is up to 243 mg/kg the depression of the mentioned processes is observed. The established dependences are confirmed by the data on the yields of maize and barley.