

## 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  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$ , 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 KCl), 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 KCl)

| Содержание $Mg^{2+}$ , мг/кг |         | Гумус, % | $pH_{KCl}$ | $P_2O_5$ | $K_2O$ | Ca   | $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ |         |
|------------------------------|---------|----------|------------|----------|--------|------|-------------------|---------|
| 2010 г.                      | 2011 г. |          |            |          |        |      | 2010 г.           | 2011 г. |
| 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 ( $pH_{KCl}$ , гумус,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ , Ca, Mg). На опытном поле реакция почвы,  $pH_{KCl}$ , различалась в пределах 6,1–6,3. Опытные делянки находились в одной группе по содержанию подвижных фосфатов, содержание  $P_2O_5$  (0,2 М HCl) составило 278–295 мг/кг почвы, подвижных форм калия  $K_2O$  (0,2 М HCl) в зависимости от уровня обеспеченности магнием составило от 237 до 313 мг/кг почвы, обменного Ca (1М KCl) – 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 м<sup>2</sup>, учетная – 8 м<sup>2</sup>.

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-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/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 % Mg<sup>2+</sup>) в течение 40 лет привело к удвоению содержания обменных форм магния в дерново-подзолистых почвах республики. В настоящее время средневзвешенное содержание обменного магния (Mg<sup>2+</sup>) в пахотных почвах приближается к оптимальному для полевых севооборотов и составляет 147 мг/кг. Подавляющее большинство почв Беларуси (67,9 %) характеризуется оптимальным содержанием Mg<sup>2+</sup>, 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 Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 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 Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> значительно больше единицы. Оптимальный диапазон соотношения Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> составляет 2–7. Так как почвы различаются по относительной прочности связывания катионов кальция и магния, оптимальный диапазон соотношения Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> также может варьировать в определенных пределах. К настоящему времени в научной литературе приводятся в основном ориентировочные пороговые значения соотношения Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 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 Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 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 Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> 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  $\text{Mg}^{2+}$  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.

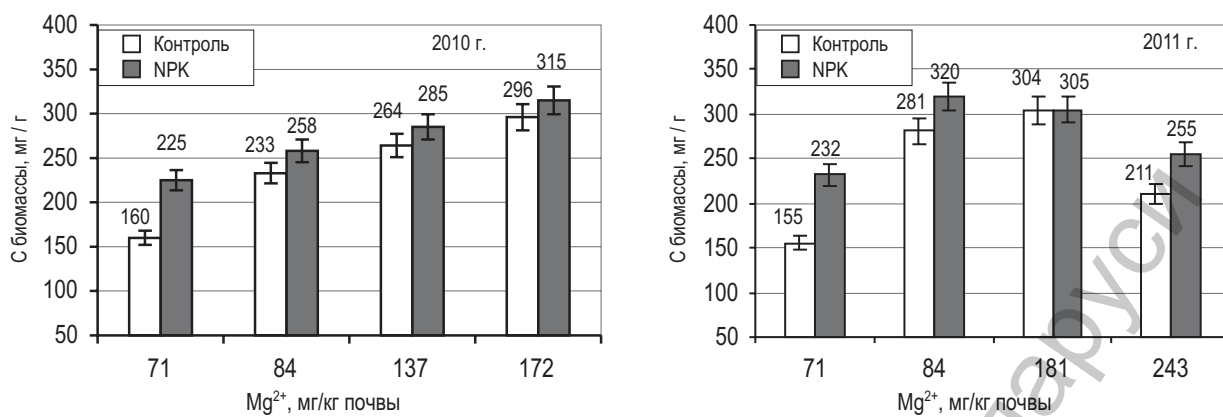


Рис. 1. Содержание углерода в микробной биомассе в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, 2010 и 2011 гг.

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 уреазы [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-

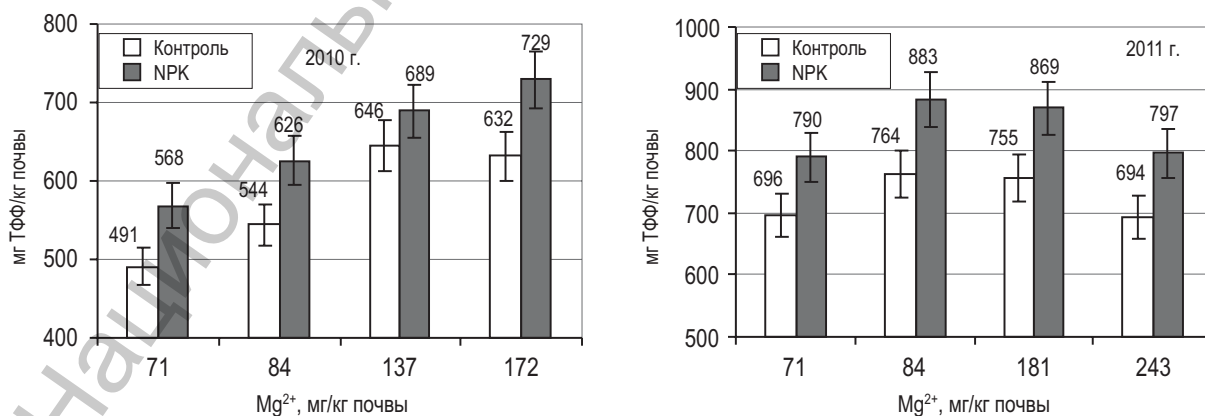


Рис. 2. Дегидрогеназная активность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с разным содержанием магния, 2010 и 2011 гг.

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-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/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 Mg<sup>2+</sup> 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 Mg<sup>2+</sup> 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 <sup>2+</sup> в почве | Вариант опыта | Уреазная активность, мг N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /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 <sup>2+</sup> )        |               | 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 <sup>2+</sup> )        |               | 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-NH<sub>4</sub>/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 N<sub>60+30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>120</sub> 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 <sup>2+</sup> в почве | Вариант опыта | ПО                | ПФО  |
|-------------------------------------|---------------|-------------------|------|
|                                     |               | мг бензохинона/кг |      |
| <i>2010 г.</i>                      |               |                   |      |
| I уровень, 71 мг/кг                 | Контроль      | 38,6              | 39,1 |
|                                     | НПК           | 40,0              | 40,6 |
| II уровень, 84 мг/кг                | Контроль      | 40,4              | 39,7 |
|                                     | НПК           | 42,2              | 41,8 |
| III уровень, 137 мг/кг              | Контроль      | 44,3              | 41,1 |
|                                     | НПК           | 46,3              | 43,7 |
| IV уровень, 172 мг/кг               | Контроль      | 50,8              | 39,0 |
|                                     | НПК           | 51,3              | 43,2 |
| Фактор А (Mg <sup>2+</sup> )        |               | 2,34              | 2,20 |
| Фактор В (НПК)                      |               | 1,65              | 1,55 |
| <i>2011 г.</i>                      |               |                   |      |
| I уровень, 71 мг/кг                 | Контроль      | 34,0              | 41,3 |
|                                     | НПК           | 36,5              | 42,9 |
| II уровень, 84 мг/кг                | Контроль      | 35,0              | 42,1 |
|                                     | НПК           | 36,5              | 43,5 |
| III уровень, 181 мг/кг              | Контроль      | 34,2              | 39,9 |
|                                     | НПК           | 35,0              | 40,2 |
| IV уровень, 243 мг/кг               | Контроль      | 32,2              | 39,9 |
|                                     | НПК           | 33,3              | 40,7 |
| Фактор А (Mg <sup>2+</sup> )        |               | 0,86              | 1,25 |
| Фактор В (НПК)                      |               | 0,61              | 0,88 |

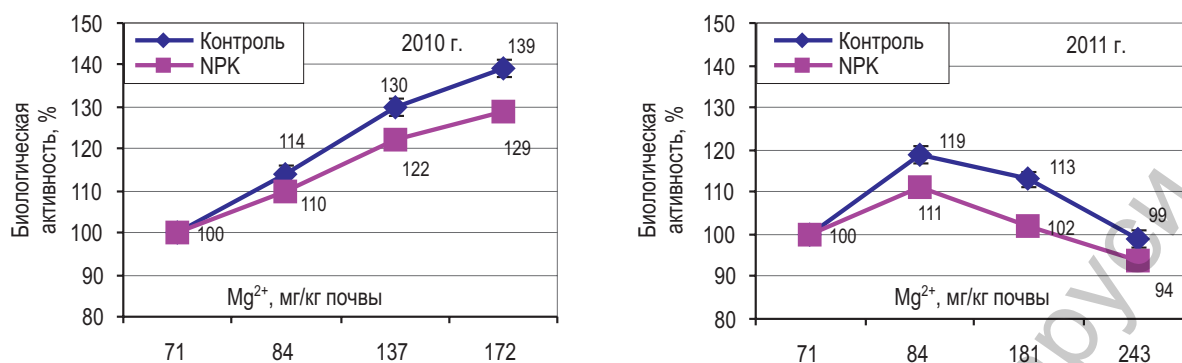


Рис. 3. Биологическая активность почвы в зависимости от обеспеченности обменным магнием, 2010 и 2011 гг.

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 Mg<sup>2+</sup> 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 N<sub>110+30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>120</sub> урожайность зеленой массы кукурузы повышалась до III уровня содержания обменного Mg<sup>2+</sup> (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<br>2010–2011 гг.,<br>ц к.ед/га | Прибавка, к.ед. от |      |
|---|------------------------|--------|--|--------------------|------|
|   | кукурузы               | ячменя |  | $Mg^{2+}$ в почве  | НРК  |
| <i>Mg 71 мг/кг почвы; <math>Ca^{2+}/Mg^{2+} = 9,8</math></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; <math>Ca^{2+}/Mg^{2+} = 7,2</math></i>  |                        |        |  |                    |      |
| Контроль (б/у)  | 135,2                  | 51,9   | 93,6   | 11,4               | –    |
| $N_{140} P_{60} K_{120}$                                      | 142,4                  | 85,5   | 114,0  | 6,9                | 20,4 |
| <i>Mg 181 мг/кг почвы; <math>Ca^{2+}/Mg^{2+} = 3,0</math></i> |                        |        |  |                    |      |
| Контроль (б/у)  | 141,8                  | 53,9   | 97,8   | 15,6               | –    |
| $N_{140} P_{60} K_{120}$                                      | 163,2                  | 87,5   | 125,3  | 18,2               | 27,5 |
| <i>Mg 243 мг/кг почвы; <math>Ca^{2+}/Mg^{2+} = 2,3</math></i> |                        |        |  |                    |      |
| Контроль (б/у)  | 143,6                  | 51,2   | 97,4   | 15,2               | –    |
| $N_{140} P_{60} K_{120}$                                      | 151,6                  | 86,7   | 119,2  | 12,1               | 21,8 |
| НСР <sub>05</sub>   |                        |        |  |                    |      |
| 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 ТДФ/ 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 кед/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: аналит. 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 Mg<sup>2+</sup> 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 Mg<sup>2+</sup> concentration up to 180 mg/kg results in the retarding of microbiological and enzymatic processes in soil. When the concentration of Mg<sup>2+</sup> 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.