

2. ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

УДК 631.8:631.445

ДИНАМИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ КАЛЬЦИЕМ ПАХОТНЫХ И ЛУГОВЫХ ПОЧВ БЕЛАРУСИ

И. М. Богдевич, Ю. В. Путятин, И. С. Станилевич, В. А. Довнар

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Кальций – структурный элемент клеточных оболочек, жизненно необходимый для образования новых клеток. Недостаток кальция сдерживает рост всех частей растения, что может привести к усилению недостатка и нарушению баланса других элементов вследствие слабо развитой корневой системы. Недостаток кальция сильно сказывается на развитии корневой системы. На корнях перестают образовываться корневые волоски, снабжающие растения водой и минеральными веществами. Кальций играет важную физиологическую роль в развитии растений, участвуя в превращении азотистых веществ и передвижении углеводов и в повышении активности ферментов. Особая роль кальция заключается в регулировании физико-химического состояния протоплазмы растений – вязкости, проницаемости и других свойств, определяющих нормальное протекание биохимических процессов [1]. Кальций поглощают только молодые части растений, он не реутилизируется [2].

В дерново-подзолистых почвах Беларуси валовое содержание кальция в пахотном слое составляет 0,4–1,0 %, магния – 0,3–0,8 % [3]. Обменно-поглощенные почвенными коллоидами двухвалентные катионы кальция и магния являются основным, наиболее доступным источником минерального питания для растений. Вследствие гумидного климата потери этих элементов из почв в результате выщелачивания вызывают подкисление и снижение плодородия почв. Реакция почвенной среды не только влияет на рост и развитие растений, но и служит фундаментальной составляющей почвенного плодородия [4].

Насыщение поглощающего комплекса почв кальцием и магнием существенно влияет на снижение накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в продукции сельскохозяйственных культур на землях, загрязненных после аварии на ЧАЭС. Установлено, что на дерново-подзолистых супесчаных почвах минимум биологической доступности ^{90}Sr для зерновых культур, картофеля, ярового рапса и клевера лугового наблюдается при содержании обменного кальция (Ca) 1200–1400 мг/кг, а для люпина узколистного – 850 мг/кг почвы [5].

До начала интенсивного известкования, примерно на 80–90 % площади всех пахотных почв Беларуси недостаток обменных форм кальция лимитировал урожайность культурных растений. Определение обменного кальция в почвах сельскохозяйственных земель при крупномасштабном агрохимическом обследовании, введено в практику в Беларуси с седьмого тура (1989–1992 гг.) [6].

В научной литературе России и стран СНГ имеется ряд публикаций, подтверждающих зависимость урожайности сельскохозяйственных культур и эффективность минеральных удобрений от степени кислотности и других агрохимических свойств дерново-подзолистых почв. Однако практически нет публикаций о количественной зависимости содержания и баланса обменных оснований от факторов интенсификации земледелия в условиях производства.

Цель исследований – установить характер изменения насыщенности почв обменным кальцием от природных и хозяйственных факторов за период мониторинга, дать прогноз содержания обменных форм кальция в пахотных почвах на период до 2035 г. по областям и группам районов Беларуси. Метод исследований – систематизация и анализ результатов агрохимического обследования почв по содержанию обменного кальция в пахотных почвах в сопоставлении с уровнем внесения известковых мелиорантов, другими свойствами почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований являются почвы сельскохозяйственных земель, обследованные по степени кислотности, содержания обменных форм кальция за период до 2020 г. Материалы агрохимического обследования почв представлены областными проектно-изыскательскими станциями сельского хозяйства. Эта информация верифицирована до уровня административных районов и систематизирована в республиканской электронной базе данных. Изменения агрохимических свойств почв анализировались в сопоставлении с интенсивностью известкования кислых почв. Информация по количеству применяемых мелиорантов собрана по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь и областных проектно-изыскательских станций. Предмет исследований – зависимость показателей, характеризующих плодородие (динамика структуры земель по группам кислотности почв, средневзвешенные показатели реакции почв pH_{KCl} (далее pH), содержание Ca) от факторов интенсификации земледелия и исходной агрохимической характеристики почв. Метод исследования – системный анализ с применением общепринятых методов математической обработки данных.

Критерии оптимизации содержания обменного кальция в пахотных и луговых почвах. Содержание обменных форм кальция и других оснований в почвах, сформированных в условиях умеренного европейского климата, с промывным режимом, обусловлена многими факторами, ведущим из которых является интенсивность известкования. Потери кальция из почвы обусловлены выщелачиванием в грунтовые воды и далее в гидрографическую сеть в зависимости от количества выпадающих осадков, расходом кальция на нейтрализацию физиологически кислых удобрений и выносом кальция с отчуждаемой частью возделываемых культур. В многофакторных лизиметрических опытах на Ротамстедской опытной станции были установлены уравнения регрессии

потерь Са в зависимости от среднегодовых доз извести и показателя рН водной вытяжки почвы. Согласно расчетам J.Gasser, потери кальция и магния возрастали в геометрической прогрессии по мере повышения показателя рН. Так, при повышении рН (Н₂О) с 5,0 до 8,0 ориентировочные ежегодные потери карбонатов СаСО₃ возрастали со 118 до 942 кг/га [7, 8]. В лизиметрических опытах Т. Н. Кулаковской и В. Ю. Агейца (1978) на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах потери кальция при известковании возрастали до 3-х раз [9]. В лизиметрических опытах А. Н. Небольсина потери кальция также возрастали до 3-х раз при повышении доз извести и изменении степени кислотности дерново-подзолистых почв от сильнокислого (рН 4,1–4,3) до близкого к нейтральному (рН 6,3–6,6) диапазона реакции [10]. В многолетних лизиметрических опытах ЦОС ВНИИА дана количественная оценка природоохранной роли травосеяния. Под многолетними травами почвы в условиях интенсивного земледелия теряют с инфильтрацией на 30–40 % меньше кальция, магния, серы, азота, чем под зерновыми и пропашными культурами [4].

Кислая реакция почвенного раствора не является главным ограничителем доступности кальция для сельскохозяйственных культур, поскольку даже на кислых почвах концентрация Са²⁺ в почвенном растворе находится в пределах 20–150 мг/л, а нижний предел уже достаточен для удовлетворения потребности даже кальциелюбивых культур. Основными ограничителями доступности кальция растениям являются повышенные концентрации К⁺, Мn²⁺, Al³⁺, Mg²⁺ и особенно NH₄⁺. Хорошее обеспечение возделываемых культур кальцием наблюдается при насыщении обменного комплекса почвы 65–85 % Са²⁺, 6–12 % Mg²⁺, 3–5 % К⁺ [11].

Известкование, улучшая физико-химические свойства почвы, может в определенных дозах и условиях положительно влиять и на фосфатный режим, а фосфорные удобрения – на кислотность почвы. При известковании кислых почв повышается подвижность и доступность фосфатов растениям. Повышенные дозы фосфорных удобрений снижают подвижность алюминия, образуя малорастворимые алюмосиликаты, не токсичные для растений. Наибольшее улучшение физико-химических свойств дерново-подзолистых почв достигали при сочетании известкования с повышенными дозами фосфорных удобрений [12, 13]. Систематическое одностороннее применение азотных и калийных удобрений, наоборот, приводит к ухудшению физико-химических свойств дерново-подзолистых почв, особенно к повышению содержания подвижного алюминия, который в высоких концентрациях угнетает рост и развитие растений [2, 10, 14].

Таким образом, очевидно, что диапазоны оптимального содержания обменного кальция в дерново-подзолистых почвах могут существенно различаться по группам гранулометрического состава и типам севооборотов в зависимости от уровня поддерживаемого диапазона степени кислотности. В серии модельных полевых опытов в 1985–1990 гг. были установлены ориентировочные диапазоны степени кислотности и параметры оптимального насыщения основаниями дерново-подзолистых почв [15]. Кальциелюбивые культуры (рапс, кормовая и сахарная свекла, ячмень, клевер) обеспечивали наибольшую урожайность в интервале содержания обменного кальция в суглинистых почвах 900–1500, а на супесчаных – 800–1300 мг СаО на кг почвы. На песчаных почвах диапазон оптимального содержания обменного кальция был в пределах 600–800 СаО на кг почвы (табл. 1).

Интервалы оптимальных параметров реакции, содержания подвижных форм кальция в пахотных почвах Беларуси

| Почвы | рН | Содержание, мг/кг почвы | |
|--|---------|-------------------------|----------|
| | | СаО | Са |
| Суглинистые | 6,0–6,8 | 900–1500 | 644–1072 |
| Супесчаные, подстилаемые суглинками | 5,8–6,5 | 800–1300 | 572–930 |
| Песчаные и рыхлосупесчаные, подстилаемые песками | 5,5–5,8 | 600–800 | 430–572 |

Методические подходы к первичному и последующим циклам известкования едины, поскольку для получения наибольшей урожайности с высоким качеством продукции важно создание и поддержание оптимальной реакции почвенной среды.

Оптимальная реакция почв не является строго фиксированной величиной и зависит от ряда свойств почв и от видов возделываемых культур [2, 11, 15]. Экспериментально установленные диапазоны реакции почв по отдельным культурам сгруппированы по типам севооборотов, гранулометрическому составу почв и используются в качестве целевых ориентиров при известковании кислых почв. Дозы известковых мелиорантов устанавливаются с учетом гранулометрического состава почв, исходной степени кислотности рН, содержания гумуса, плотности загрязнения почв радионуклидами, типа севооборота. В зависимости от перечисленных факторов, оптимальные интервалы значений рН различаются на дерново-подзолистых почвах от 5,3–5,8 до 6,0–6,8. Оптимальные показатели кислотности для возделывания сельскохозяйственных культур на торфяных почвах соответствуют диапазону рН 5,0–5,3. Рекомендуемые дозы извести дифференцированы таким образом, чтобы сильно- и среднекислые почвы нейтрализовать до нижнего уровня оптимального диапазона. В дальнейшем, небольшие, поддерживающие дозы извести на слабокислых почвах не позволяют выйти за пределы оптимального диапазона реакции почв [16].

Средневзвешенный показатель реакции почв рН элементарного участка является основным критерием оптимизации степени кислотности почв, пригодности почвы для возделывания группы однотипных сельскохозяйственных культур. Однако средневзвешенный показатель рН пашни или луговых земель на площади целого хозяйства или района не может быть критерием оптимизации кислотности почв, так как может включать поля как с сильнокислой, так и слабощелочной реакцией. Для оценки результативности известкования по хозяйствам или административным районам, областям, используют два критерия: доля сильно- и среднекислых почв с показателем рН < 5,0 и доля почв с показателем рН > 6,5 в % от общей площади земель [17].

На почвах с показателем рН менее 5,0 наблюдаются существенные недоборы урожайности всех сельскохозяйственных культур. В условиях системного известкования доля сильно- и среднекислых пахотных и луговых почв должна быть близкой к нулю, практически менее 5 % от общей площади.

Результаты проведенных исследований, особенно в последние 30 лет, выявили исключительно важное значение известкования почв, как природоохранного и экологического фактора. В Российской Федерации выявлены сотни тысяч гектаров пахотных почв, загрязненных тяжелыми металлами, на которых

необходимо проводить специальные мероприятия, предотвращающие загрязнение растительной продукции токсичными элементами. Наиболее эффективным является известкование, снижающее накопление в растениях тяжелых металлов в 5–10 раз. Поскольку очищение почвы от тяжелых металлов процесс очень медленный, необходимо проводить периодическое известкование рекультивируемых почв многократно в течение десятков лет [18].

Важно также избегать избыточной нейтрализации почв, сопровождаемой большой потерей кальция и магния, выщелачиваемых из плодородного слоя. Почвы с нейтральной и слабощелочной реакцией в Беларуси занимают только 12,8 % от площади пашни [6]. На таких почвах наблюдается снижение доступности для растений микроэлементов, преимущественно Mn и Zn, что приводит к снижению урожайности и качества продукции культур кальцефобов: льна-долгунца, люпина и картофеля, которые должны возделываться в специализированных севооборотах, где предусмотрено ограниченное известкование до показателей pH не более 5,6–6,0. Для хозяйств и районов, где преобладают загрязненные радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr земли, минимальное накопление этих элементов в растениеводческой продукции достигается при сдвиге от оптимальной реакции почв на 0,2–0,3 единицы pH в сторону щелочного диапазона [5]. Однако снижение накопления радионуклидов в растениях в нейтральном и щелочном диапазонах незначительное. На загрязненных радионуклидами землях рекомендуемые дозы известки повышаются только на сильно- и среднекислых почвах для ускоренного сдвига реакции почв и достижения оптимальных диапазонов кислотности почв из расчета на максимальную урожайность возделываемых культур [16, 20]. Эффективность известкования следует оценивать по разнице показателей (pH) между исходным, достигнутым и оптимальным уровнями степени кислотности почвы. Важными информативными показателями являются также содержание обменных форм кальция и магния в почвах.

Динамика известкования, как базис обеспеченности обменным кальцием пахотных и луговых почв Беларуси. Мелиоративное известкование кислых почв ведется в Беларуси с 1966 г., когда на пашне преобладали (≥ 66 %) сильно- и среднекислые почвы с pH < 5,0. В данной работе исследуется период поддерживающего известкования (1997–2020 гг.). Систематизация данных показывает стабилизацию объемов поддерживающего известкования кислых почв сельскохозяйственных земель в период трех циклов с 1997 по 2008 г. по областям и в целом по Беларуси (табл. 2).

Таблица 2

Динамика известкования кислых пахотных и луговых почв по областям Беларуси за период 1997–2020 гг.

| Области | Площадь известкования, тыс. га | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| | 1997–2000 | 2001–2004 | 2005–2008 | 2009–2012 | 2013–2016 | 2017–2020 |
| Брестская | 237,0 | 303,6 | 325,6 | 246,9 | 162,0 | 125,3 |
| Витебская | 307,7 | 254,0 | 320,8 | 214,4 | 164,6 | 113,6 |
| Гомельская | 268,1 | 272,8 | 228,9 | 206,8 | 173,9 | 172,0 |
| Гродненская | 183,2 | 239,8 | 306,0 | 234,3 | 153,9 | 131,1 |
| Минская | 303,6 | 234,4 | 309,9 | 402,1 | 192,8 | 169,8 |
| Могилевская | 310,8 | 256,8 | 329,2 | 195,2 | 167,3 | 134,1 |
| Беларусь | 1580,4 | 1561,2 | 1820,4 | 1499,7 | 1014,5 | 845,9 |

Объективную оценку соответствия проведенных объемов работ потребности в известковании, можно видеть из данных таблицы 3. В последнем цикле известкования, в результате недостаточного финансирования, требуемые объемы работ снизились до 38 % от потребности по республике с различиями по областям от 31 до 55 %.

Таблица 3

Объемы известкования кислых пахотных и луговых почв в % к потребности по областям Беларуси за период 1997–2020 гг.

| Области | 1997–2000 | 2001–2004 | 2005–2008 | 2009–2012 | 2013–2016 | 2017–2020 |
|-----------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Брестская | 76 | 93 | 105 | 81 | 56 | 35 |
| Витебская | 93 | 79 | 113 | 72 | 50 | 31 |
| Гомельская | 100 | 101 | 98 | 93 | 70 | 55 |
| Гродненская | 84 | 111 | 137 | 78 | 50 | 40 |
| Минская | 108 | 75 | 106 | 100 | 43 | 35 |
| Могилевская | 102 | 85 | 151 | 80 | 56 | 37 |
| Беларусь | 99 | 89 | 117 | 85 | 52 | 38 |

По итогам мониторинга разработан «Комплекс мероприятий по повышению плодородия и защите от деградации почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь на 2021–2025 гг.», одобренный Научно-техническим советом МСХП РБ, где рекомендовано увеличение площади известкования земель в 2,2 раза при средней дозе CaCO_3 4,9 т/га [19].

До начала интенсивного известкования кислых почв недостаток обменного кальция лимитировал урожайность возделываемых культур на преобладающей части пахотных и луговых земель. Системное определение обменного кальция на интенсивно используемых сельскохозяйственных землях Беларуси проведено в седьмом туре крупномасштабного агрохимического обследования почв (1989–1992 гг.), когда уже наблюдалось равновесное состояние баланса обменного кальция в пахотных и луговых почвах (рис. 1). Средневзвешенное содержание обменного кальция в пахотных почвах Беларуси стабилизировалось на уровне Ca^{2+} 715–858 мг/кг почвы, или CaO около 1000–1200 мг/кг почвы.

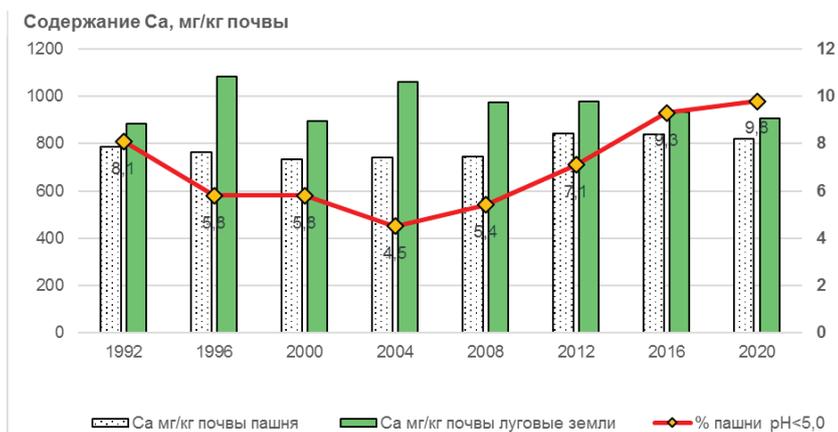


Рис. 1. Динамика средневзвешенных показателей содержания обменного кальция (Ca^{2+}) в почвах пахотных и луговых земель Беларуси за 1992–2020 гг.

На луговых землях средневзвешенное содержание обменного кальция несколько выше, в пределах Ca^{2+} 930–1000 мг/кг почвы, или СаО около 1300–1400 мг/кг почвы. В условиях системного, поддерживающего известкования уровень обеспеченности почв обменным кальцием обусловлен, в основном, емкостью катионного обмена почв. По мере утяжеления гранулометрического состава и повышения буферной способности почв возрастают запасы обменного кальция в почвах. Приведенные данные показывают необходимость анализировать причины заметных различий в накоплении или потере запасов обменного кальция по областям и районам с учетом количества вносимых мелиорантов, удобрений и других факторов интенсификации земледелия.

Систематизация данных по 14 туру обследования показывает заметные различия в обеспеченности обменным кальцием пахотных почв по областям Беларуси (табл. 4).

Таблица 4

Распределение пахотных почв Беларуси по группам содержания обменного кальция (2017–2020 гг.)

| Области | По группам содержания СаО (Са), мг/кг почвы | | | | | | Средне- взвешенное содержание СаО (Са), мг/кг почвы |
|-----------------|---|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|------------------|---|
| | < 400 (< 286) | 401–800 (287–572) | 801–1200 (573–858) | 1201–1600 (859–1144) | 1601–2000 (1145–1430) | > 2000 > 1430 | |
| Брестская | 0,2 | 20,7 | 35,6 | 12,8 | 8,1 | 22,6 | 1120 (801) |
| Витебская | 0,1 | 3,0 | 21,3 | 32,3 | 22,5 | 20,8 | 1494 (1068) |
| Гомельская | 0,6 | 24,5 | 39,7 | 13,3 | 4,7 | 17,2 | 1098 (785) |
| Гродненская | 0,5 | 19,2 | 52,5 | 19,7 | 4,6 | 3,5 | 1087 (777) |
| Минская | 0,3 | 11,2 | 32,8 | 32,3 | 12,5 | 10,9 | 1133 (810) |
| Могилевская | 0,5 | 30,5 | 48,3 | 16,9 | 2,4 | 1,4 | 964 (689) |
| Беларусь | 0,4 | 17,7 | 37,9 | 22,0 | 9,4 | 12,6 | 1149 (822) |

В Витебской области средневзвешенное содержание обменного кальция достигло уровня 1068 мг/кг почвы, что в 1,5 раза выше аналогичного показателя для Могилевской. Согласно распределению по группам обеспеченности свыше 80 % площади пашни Беларуси характеризуются оптимальной и высокой степенью обеспеченности пахотных почв обменным кальцием. Только на 0,4 % площади пахотных почв сельскохозяйственные культуры испытывают острый недостаток и на 17,7 % – умеренный дефицит кальция для формирования высокой урожайности возделываемых культур. Однако доля пашни с умеренным дефицитом кальция для культурных растений различается по областям от 30,5 % в Могилевской до 3,0 % в Витебской области. Еще больше различия наблюдаются по районам и хозяйствам в республике.

Минеральные почвы луговых земель характеризуются сравнительно более высоким содержанием обменного кальция. В целом оптимальная и высокая обеспеченность почв кальцием наблюдается на 91,2 % площади минеральных улучшенных сенокосов и пастбищ с различиями по областям от 76,6 % в Могилевской до 97,0 % в Витебской области (табл. 5). Торфяные почвы при луговом использовании

характеризуются наиболее высоким содержанием обменного кальция. Средневзвешенное содержание Са в луговых торфяных почвах Беларуси составляет 6378 мг/кг почвы с различиями от 4167 мг/кг в Могилевской до 9589 мг/кг торфяных почв в Гомельской области.

Таблица 5

Распределение минеральных почв улучшенных сенокосов и пастбищ по содержанию кальция (2017–2020 гг.)

| Области | По группам содержания СаО, мг/кг почвы | | | | | | Средневзвешенное содержание СаО (Са), мг/кг почвы |
|-----------------|--|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| | < 400 | 401–800 | 801–1200 | 1201–1600 | 1601–2000 | > 2000 | |
| Брестская | 0,2 | 7,0 | 17,5 | 14,8 | 14,4 | 46,1 | 1668 (1207) |
| Витебская | 0,1 | 2,9 | 19,4 | 32,9 | 24,5 | 20,2 | 1524 (1090) |
| Гомельская | 0,4 | 10,0 | 21,3 | 17,2 | 11,6 | 39,5 | 1945 (1391) |
| Гродненская | 0,4 | 8,3 | 25,4 | 16,5 | 9,8 | 39,6 | 1976 (1413) |
| Минская | 0,3 | 10,1 | 29,2 | 31,7 | 17,7 | 11,0 | 1398 (1000) |
| Могилевская | 0,5 | 22,9 | 40,1 | 20,3 | 6,9 | 9,3 | 1132 (809) |
| Беларусь | 0,3 | 8,5 | 23,7 | 23,4 | 15,9 | 28,3 | 1615 (1155) |

Исследованы различия в накоплении обменного кальция в зависимости от гранулометрического состава пахотных почв и результативности известкования по районам Беларуси по материалам обследования 2017–2020 гг. Наибольшее содержание обменного Са характерно для районов с преобладающими суглинистыми и связносупесчаными, подстилаемыми суглинками, почвами, где минимально проявилось их подкисление. Минимальное содержание обменного кальция характерно для районов с преобладанием песчаных и рыхлосупесчаных почв, где доля проблемных кислых почв с рН < 5,0 достигает 20,4 % от площади пашни. Группировка районов по результативности известкования (доле кислых почв с рН < 5,0) показывает четкую зависимость содержания обменного кальция в пахотных почвах от выше названных показателей (табл. 6).

Таблица 6

Содержание обменного кальция в пахотных почвах в зависимости от гранулометрического состава и степени кислотности почв по районам Беларуси (2017–2020 гг.)

| Число районов | Доля (%) связных почв (суглинков и супесей, подстилаемых суглинками) | Доля (%) площади кислых почв рН < 5,0 | Средневзвешенное рН | Са мг/кг почвы | Доля (%) почв 1 + 2 групп обеспеченности Са |
|---------------|--|---------------------------------------|---------------------|----------------|---|
| 19 | 60,5 | 4,0 | 6,09 | 1039 | 5,4 |
| 52 | 32,0 | 7,5 | 5,83 | 832 | 15,6 |
| 29 | 25,6 | 12,5 | 5,71 | 737 | 26,5 |
| 18 | 20,1 | 20,4 | 5,56 | 687 | 32,2 |

По мере увеличения в группах районов доли кислых почв с $\text{pH} < 5,0$ с 4,0 до 20,4 % от площади пашни содержание обменного Са закономерно снижается от 1039 до 687 мг/кг почвы. При этом, доля слабообеспеченных кальцием почв ($\text{Ca} < 572$ мг/кг почвы) закономерно повышается от 5,4 до 32,2 % от площади пашни. Эта корреляционная связь статистически достоверна ($R^2 = 0,29$, рис. 2). В совокупности всех районов Беларуси, по мере подкисления реакции почвы и увеличения доли проблемных почв с $\text{pH} < 5,0$ от 4 до 40 %, средневзвешенное содержание обменного Са в пахотных почвах закономерно снижается от 978 до < 400 мг/кг почвы. Повышение доли кислых почв с $\text{pH} < 5,0$ на каждый последующий 1 % сопровождается потерей 15,563 мг Са в обменном комплексе почвы.

Характерно, что подкисление почв и потеря обменного кальция более заметно проявляются в группах районов по мере снижения доли плодородных суглинистых и супесчаных почв, подстилаемых суглинками. Общеизвестно, что выщелачивание Са на песчаных и рыхлосупесчаных почвах происходит весьма интенсивно. Средневзвешенные показатели содержания обменного кальция различаются более чем вдвое по районам республики в диапазоне от 531 мг Са в Климовичском районе Могилевской области до 1289 мг/кг почвы в Шарковщинском районе Витебской области.

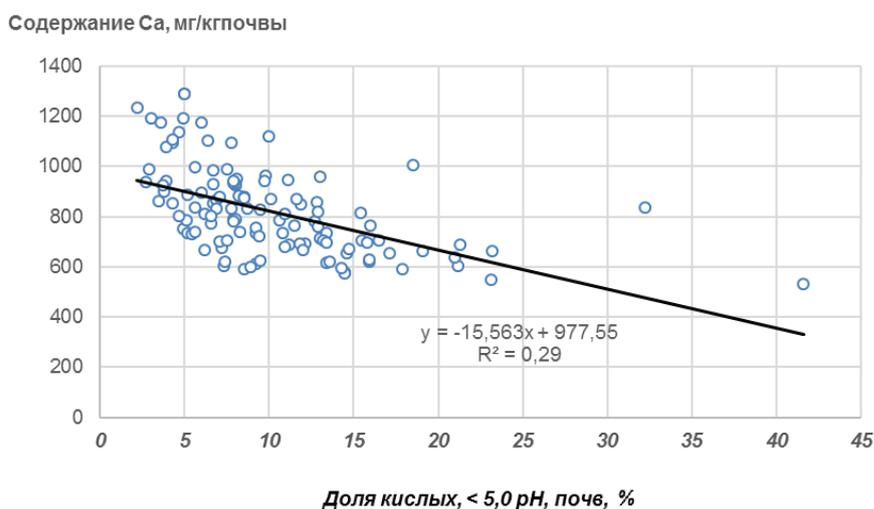


Рис. 2. Содержание обменного кальция в пахотных почвах по районам Беларуси в зависимости от доли кислых почв, $\text{pH} < 5,0$ (2017–2020 гг.)

Содержание обменного кальция по районам Беларуси достоверно коррелирует с показателями доли связных пахотных почв ($R^2 = 0,32$, рис. 3), что обусловлено более высокой емкостью катионного обмена суглинистых и супесчаных, подстилаемых суглинками почв, по сравнению с песчаными и рыхлосупесчаными почвами, подстилаемыми песками. Установлено, что в районах Беларуси, содержание обменного кальция в пахотных почвах закономерно повышается на 32 мг/кг почвы по мере увеличения доли суглинистых и супесчаных, подстилаемых суглинками, почв на каждые 10 % от площади пашни.

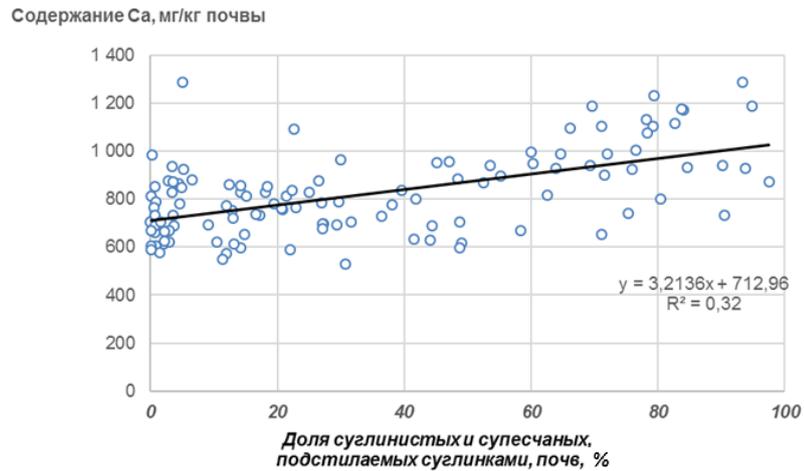


Рис. 3. Содержание обменного кальция в зависимости от доли связанных пахотных почв по районам Беларуси (2017–2020 гг.)

Информативным показателем обеспеченности почв обменным кальцием является доля (%) слабообеспеченных Са почв от общей площади пашни района, который также тесно коррелирует с долей кислых почв ($pH < 5,0$), что можно видеть на рисунке 4.

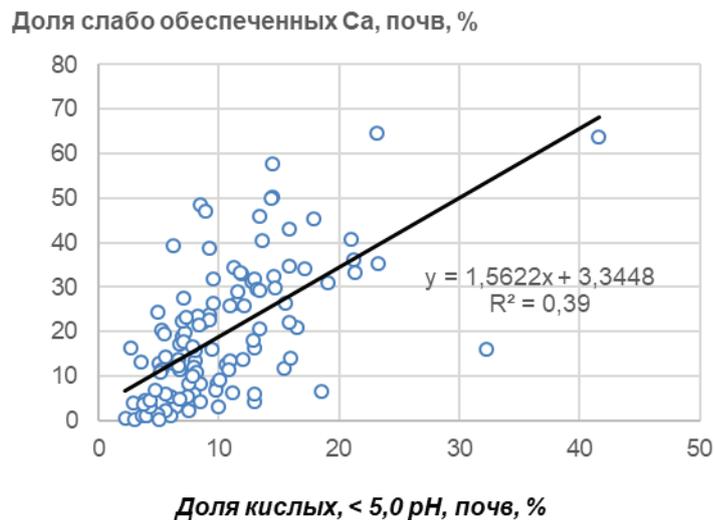


Рис. 4. Доля слабообеспеченных кальцием почв (1 + 2 группы) в зависимости от доли кислых почв, ($pH < 5,0$) по районам Беларуси (2017–2020 гг.)

Установленные производственные функции можно использовать в качестве информационно-нормативной основы для прогноза изменения содержания обменного кальция в пахотных почвах на перспективу до 2035 г. по областям и группам районов Беларуси в зависимости от природных факторов и степени интенсификации земледелия.

Прогноз содержания обменного кальция в пахотных почвах Беларуси на перспективу до 2035 г. Планомерное известкование за 50-летний период позволило исключить повышенную кислотность почв из числа факторов, лимитирующих производство растениеводческой продукции, оптимизировать реакцию почв, произвести насыщение поглощающего комплекса почв обменными формами кальция и магния в соответствии с емкостью катионного обмена почв сельскохозяйственных земель. Однако в последние годы прослеживается тенденция подкисления пахотных почв во многих районах Беларуси в связи с недостатком финансирования и соответствующим снижением требуемых объемов работ. Как было показано выше, заметное снижение содержания обменного кальция в пахотных почвах может иметь место в соответствии со значительным повышением доли сильно- и среднекислых почв ($pH < 5,0$). Подкисление пахотных почв наблюдается с 2012 г. во всех областях Беларуси (табл. 7). Наиболее контрастно возросла доля сильно- и среднекислых почв в Гродненской и Могилевской области, соответственно с 6,0 до 13,9 % и с 3,9 до 14,2 % от площади пашни.

Таблица 7

Динамика доли площади проблемных кислых пахотных почв по областям Республики Беларусь

| Области | 2000 г. | 2004 г. | 2008 г. | 2012 г. | 2016 г. | 2020 г. |
|-----------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Доля (%) площади сильно- и среднекислых почв ($pH < 5,0$) | | | | | |
| Брестская | 6,3 | 5,3 | 6,0 | 6,6 | 8,3 | 8,9 |
| Витебская | 5,7 | 4,2 | 3,5 | 4,6 | 6,9 | 6,1 |
| Гомельская | 7,4 | 6,6 | 6,2 | 7,8 | 9,6 | 9,4 |
| Гродненская | 5,4 | 5,0 | 6,0 | 8,2 | 9,9 | 13,9 |
| Минская | 3,7 | 2,8 | 3,9 | 7,1 | 8,9 | 7,6 |
| Могилевская | 5,8 | 4,0 | 3,9 | 8,6 | 12,1 | 14,2 |
| Беларусь | 5,6 | 4,5 | 4,8 | 7,2 | 9,3 | 9,8 |

На улучшенных сенокосах и пастбищах подкисление почв идет менее интенсивно. Реакция луговых почв преимущественно находится в слабокислом диапазоне, благоприятном для многолетних трав.

Снижение требуемых объемов известкования и подкисление пахотных почв характерно и для многих регионов Российской Федерации. По данным МСХ РФ, в Центральном регионе Нечерноземной зоны России за период 2000–2019 гг. доля площади сильно- и среднекислых почв с показателем $pH < 5,0$ удвоилась и составляет 24 % от площади пашни. В известковании нуждаются около 60 % площади пахотных почв [21].

Для прогноза изменения доли (%) кислых почв ($pH < 5,0$) – за период между двумя турами обследования Y_1 получено уравнение линейной регрессии:

$$Y_1 = -0,1562 \times X_1 + 14,669, \quad (1)$$

$$R^2 = 0,84,$$

где X_1 – площадь известкования в % к проектной потребности.

При известковании разной доли проектной площади использование предложенной производственной функции позволяет прогнозировать ориентировочное, вероятное изменение доли кислых почв ($pH < 5,0$) на ближайшую перспективу (табл. 8). Прогноз проведен для двух сценариев: 1 – оптимистический и 2 – инерционный.

Оптимистический сценарий предполагает, что финансирование известкования пахотных почв будет увеличено до уровня полной потребности для нейтрализации кислотности первых трех групп и поддерживающего известкования четвертой группы кислотности почв суглинистого и глинистого гранулометрического состава, согласно действующей инструкции [16]. Для реализации оптимистического сценария необходимо ежегодно известковать 572,0 тыс. га сельскохозяйственных земель, вносить 2,8 млн т известковых мелиорантов, в пересчете $CaCO_3$ [19]. В случае реализации оптимистического сценария доля сильно- и среднекислых почв будет за 2021–2035 гг. снижена до 6,1 %. В конечном результате во всех областях будет заметное снижение доли кислых почв на 1,5–6,3 % от площади пашни.

В случае реализации инерционного сценария будет наблюдаться дальнейшее подкисление почв. В настоящее время дозы азотных удобрений под полевые культуры снизились на 20–30 %, что несколько замедляет подкисление почв. Однако если известкование весь период будет проводиться на 40 % от потребности, то к 2035 г. доля кислых почв ($pH < 5,0$) повысится до 2–3 раз по областям Беларуси. В целом по республике доля кислых почв прогнозируется соответствующее снижение эффективности удобрений и недобор урожайности на 26,6 % площади пашни.

Таблица 8

Прогноз изменения доли сильно- и среднекислых пахотных почв в зависимости от интенсивности известкования на период до 2035 г.

| Области | Известкование, площадь в % к потребности 2021–2035 гг. | | Доля (%) кислых почв $pH < 5,0$ | | |
|-----------------|--|------------|---------------------------------|------------|-------------|
| | | | 2020 г. | 2035 г. | |
| | сценарий 1 | сценарий 2 | | сценарий 1 | сценарий 2 |
| Брестская | 100 | 40 | 8,4 | 5,9 | 25,7 |
| Витебская | 100 | 30 | 6,1 | 4,6 | 16,1 |
| Гомельская | 100 | 60 | 9,3 | 6,3 | 19,6 |
| Гродненская | 100 | 40 | 13,9 | 7,6 | 30,7 |
| Минская | 100 | 40 | 9,2 | 4,5 | 26,0 |
| Могилевская | 100 | 40 | 14,2 | 8,2 | 31,0 |
| Беларусь | 100 | 40 | 9,8 | 6,1 | 26,6 |

В соответствии с вышеприведенными изменениями доли (%) проблемных почв ($pH < 5,0$) можно прогнозировать изменение средневзвешенных показателей содержания обменного Са мг/кг почвы (Y_2) по регионам Беларуси согласно уравнению:

$$Y_2 = 977,5 - 15,563 \times X, \quad (2)$$

$$R^2 = 0,29,$$

где X – доля кислых почв (pH менее 5,0), %.

А также прогнозировать долю (%) слабообеспеченных Са пахотных почв 1 + 2 группы, (Y_3)

$$Y_3 = 1,5622 * X + 3,3448, \quad (3)$$

$$R^2 = 0,39,$$

где X – доля кислых почв (рН менее 5,0), %.

Результаты прогноза обеспеченности пахотных почв обменным кальцием по областям Беларуси на период до 2035 г. представлены в таблице 9.

Таблица 9

Прогноз содержания обменного кальция в пахотных почвах Беларуси на период до 2035 г.

| Области | Содержание Са, мг/ кг почвы | | | Доля (%) слабообеспеченных Са почв | | |
|-----------------|-----------------------------|--------------------|------------|------------------------------------|--------------------|-------------|
| | 2020 г. | Прогноз на 2035 г. | | 2020 г. | Прогноз на 2035 г. | |
| | | сценарий 1 | сценарий 2 | | сценарий 1 | сценарий 2 |
| Брестская | 801 | 886 | 578 | 20,9 | 12,6 | 43,5 |
| Витебская | 1068 | 1079 | 817 | 3,1 | 10,5 | 28,5 |
| Гомельская | 785 | 879 | 672 | 25,1 | 13,2 | 34,0 |
| Гродненская | 777 | 859 | 500 | 19,7 | 15,2 | 51,3 |
| Минская | 810 | 907 | 573 | 11,5 | 10,4 | 44,0 |
| Могилевская | 690 | 850 | 495 | 31,0 | 16,2 | 51,8 |
| Беларусь | 821 | 883 | 564 | 18,1 | 12,9 | 44,9 |

Нетрудно видеть, что при реализации оптимистического сценария и организации известкования кислых почв по потребности будет наблюдаться небольшое повышение средневзвешенных показателей содержания обменного Са в пахотных почвах во всех областях, а доля слабообеспеченных кальцием почв снизится до приемлемого уровня в пределах 10,4–16,2 %, что будет соответствовать потребности для размещения культур кальцефобов (лен, люпин, картофель) и других культур, толерантных к невысокому содержанию обменного кальция в почве.

При реализации инерционного сценария, средневзвешенное содержание обменного кальция по Беларуси снизится на 257 мг/кг почвы, или на 31 % от нынешнего уровня. Наиболее низкое содержание Са, около 500 мг/кг почвы, ожидается в Гродненской и Могилевской областях, где доля слабообеспеченных кальцием почв прогнозируется на 51,3 и 51,8 % площади пахотных почв соответственно. В этом случае неизбежно значительное снижение окупаемости применяемых минеральных удобрений и недобор урожайности наиболее ценных культур: сахарной свеклы, рапса, кукурузы, пшеницы, овощных и плодово-ягодных культур.

ВЫВОДЫ

Исследована динамика обеспеченности пахотных и луговых почв обменным кальцием в Беларуси по материалам восьми туров обследования 1989–2020 гг. Средневзвешенное содержание мало различалось по годам и стабилизировалось на уровне Са²⁺ 715–858 мг/кг пахотных почв и 930–1000 мг/кг луговых почв.

Только на 0,4 % площади пахотных почв сельскохозяйственные культуры испытывают острый недостаток и на 17,7 % площади – умеренный дефицит кальция для формирования высокой урожайности возделываемых культур. Однако доля пашни с умеренным дефицитом кальция для культурных растений различается по областям от 30,5 % в Могилевской до 3,0 % в Витебской области. Еще больше различия наблюдаются по районам и хозяйствам в республике в зависимости от результативности известкования и гранулометрического состава почв. Минимальное содержание обменного кальция характерно для районов с преобладанием песчаных и рыхлосупесчаных почв, где доля проблемных кислых почв с $pH < 5,0$ достигает 20,4 % от площади пашни.

Представлено два сценария прогноза содержания обменного кальция в пахотных почвах по областям Беларуси на перспективу до 2035 г., в связи с тем, что заметное подкисление почв проявилось за три последних тура обследования земель (2009–2020 гг.). Вследствие снижения объемов известкования соответственно на 15, 48 и 62 %, от проектной потребности, доля кислых пахотных почв ($pH < 5,0$) удвоилась и составила 9,8 % от обследованной площади.

Оптимистический сценарий предполагает, что известкование будет проведено по потребности. В результате, доля сильно- и среднекислых почв снизится с 9,8 до 6,1 % от площади пашни, а средневзвешенное содержание обменного Са повысится с 821 до 883 мг/кг почвы. При этом, доля слабообеспеченных кальцием почв снизится с 18,1 до 12,9 % с различиями по областям 10,4–16,2 %, что будет соответствовать потребности для размещения культур кальцефобов (лен, люпин, картофель) и других культур, толерантных к невысокому содержанию обменного кальция в почве.

При инерционном сценарии (известкования на уровне 40 % от потребности) доля проблемных сильно- и среднекислых почв повысится до уровня 26,6 % с различиями по областям 16,1–31,0 %. Средневзвешенное содержание Са в целом по Беларуси снизится на 257 мг/кг почвы, или на 31 % от нынешнего уровня. В Гродненской и Могилевской областях доля слабообеспеченных почв кальцием прогнозируется на 51,3 и 51,8 % площади соответственно. В этом варианте неизбежно снижение окупаемости минеральных удобрений и недобор урожайности наиболее ценных культур: сахарной свеклы, рапса, кукурузы, пшеницы, овощных и плодово-ягодных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаковская, Т. Н. Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев / Т. Н. Кулаковская. – Минск, 1978. – 272 с.
2. Барбер, С. А. Биологическая доступность питательных веществ в почвах / С. А. Барбер. – М., 1988. – 376 с.
3. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Васильюк. – Минск: Изд-во БГУ, 2003. – 322 с.
4. Шильников, И. А. Известкование, как фактор урожайности и почвенного плодородия / И. А. Шильников [и др.]. – М.: ВНИИА, 2008. – 340 с.
5. Путятин, Ю. В. Минимизация поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениеводческую продукцию / Ю. В. Путятин. – Минск: Институт почвоведения и агрохимии, 2008. – 255 с.

6. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 276 с.

7. Gasser, I. An assessment of the importance of some factors causing losses of lime from agricultural soils / I. Gasser. – *Experimental husbandry*. – 1974. – № 25. – P. 97–150.

8. Bolton, J. Liming effects on the response of potatoes and oats to phosphorus, potassium and magnesium fertilizer / J. Bolton. – *Agric. Sci. J., Camb.* – 1977. – № 89. – P. 87–93.

9. Кулаковская, Т. Н. Влияние известкования и минеральных удобрений на вымывание элементов питания из почвы / Т. Н. Кулаковская, В. Ю. Агеец // *Химия в сельском хозяйстве*. – 1978. – № 9. – С. 53–55.

10. Небольсин, А. Н. Теоретические основы известкования почв / А. Н. Небольсин, З. П. Небольсина. – СПб.: ЛНИИСХ, 2005. – С. 90–118.

11. Bergmann, W. Nutritional disorders of plants / W. Bergmann. – New York: G. Fisher, 1992. – 741 p.

12. Кирпичников, Н. А. Влияние извести на фосфатный режим слабокультурной дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений / Н. А. Кирпичников // *Агрохимия*. – 2016. – № 12. – С. 3–9.

13. Влияние длительного применения удобрений на показатели плодородия дерново-подзолистой почвы в зернотравяном севообороте / Р. Ф. Байбеков [и др.] // *Земледелие*. – 2021. – № 7. – С. 12–15.

14. Сычев, В. Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования / В. Г. Сычев. – М.: РАН, 2019. – С. 108–138.

15. Богдевич, И. М. Агрохимические пути повышения плодородия дерново-подзолистых почв: дис... д-ра с.-х. наук в форме науч. докл. / И. М. Богдевич; Всесоюзная Академия сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина, ВИУА. – М., 1992. – 73 с.

16. Инструкция по известкованию кислых почв сельскохозяйственных земель / В. В. Лапа [и др.]. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2019. – 32 с.

17. Богдевич, И. М. Динамика степени кислотности пахотных и луговых почв в результате известкования / И. М. Богдевич, О. Л. Ломонос, О. М. Таврыкина // *Почвоведение и агрохимия*. – 2014. – № 1(52). – С. 159–172.

18. Овчаренко, М. М. Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / М. М. Овчаренко, И. А. Шильников, Н. И. Аканова. – М: Агроконсалт, 1998. – 380 с.

19. Комплекс мероприятий по повышению плодородия и защите от деградации почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь на 2021–2025 годы / В. В. Лапа [и др.]; под ред. В. В. Лапы, Н. Н. Цыбулько; НАН Беларуси, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Институт почвоведения и агрохимии. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 148 с.

20. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы / Цыбулько Н. Н. [и др.]; НАН Беларуси, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Институт почвоведения и агрохимии. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 144 с.

21. Некрасов, Р. В. Перспективы химической мелиорации кислых почв в Российской Федерации / Р. В. Некрасов, А. И. Аканова / *Плодородие почв России*:

DYNAMICS AND PERSPECTIVE OF CALCIUM SUPPLY OF ARABLE SOILS AND GRASLAND IN BELARUS

I. M. Bogdevitch, Yu. V. Putyatin, I. S. Stanilevich, V. A. Dovnar

Summary

The results of Agrochemical Soil Survey for 1989–2020 showed an acceptable level of exchangeable Ca-supply of arable soils and grassland in Belarus due to long term systemic liming of acidic soils. At present, 81,9 % of the area of arable and 93.1 % of improved grassland are characterized by an optimal and high content of Ca²⁺. Due to a significant decrease in the required volumes of liming in recent years, there is a noticeable acidification of arable soils in most regions of the republic. This can lead to a loss of exchangeable calcium and degradation of soil fertility.

Two scenarios are discussed for forecasting the availability of arable soils with exchangeable calcium for the period up to 2035 in the regions of Belarus: 1 – optimistic, with liming on demand, the proportion of acidic (pH < 5.0) soils will decrease from 9,8 to 6,1 %, and the proportion of soils poorly supplied with calcium will decrease from 18,1 to 12,9 %; 2 – the inertial scenario is unacceptable, because with a long-term deficit of liming, 40 % of the requirement, the weighted average content of exchangeable Ca will decrease by 31 %, and the share of soils poorly supplied with calcium will increase to 44,9 %, which will lead to a decrease in the yield of the most valuable crops: sugar beet, rapeseed, wheat and corn.

Поступила 03.05.23