

ПОЧВЕННО-АГРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В АГРОЛАНДШАФТАХ

В.И. Панасин, Д.А. Рымаренко

ФГБУ «Центр агрохимической службы “Калининградский”»,
Россия, 236038, г. Калининград, ул. Молодой Гвардии, 2/4
E-mail: agrohim_39@mail.ru

Рассмотрена обеспеченность почв сельскохозяйственных угодий подвижными формами микроэлементов. Установлены зависимости содержания подвижных микроэлементов от гранулометрического состава, содержания гумуса и кислотности. Даны практические рекомендации по применению микроудобрений.

микроэлементы, подвижные формы, корреляционная зависимость, агрохимические свойства почв, микроудобрения

В современных технологиях интенсивного земледелия микроудобрения выступают в качестве важного фактора, регулирующего урожайность сельскохозяйственных культур и качество урожая. Микроэлементы необходимы для создания в почве оптимального соотношения химических элементов питания растений, обуславливающих их нормальный рост и развитие. Обеспеченность сельскохозяйственных культур микроэлементами определяется запасом их в почве, биологическими особенностями растений, способностью растений усваивать элементы из присутствующих в почве химических соединений, а также уровнем применения средств химизации земледелия.

Из микроэлементов безусловно необходимыми для сельскохозяйственных растений являются бор, кобальт, марганец, медь, молибден и цинк. Бор не входит в состав ферментов, однако оказывает очень сильное влияние на процессы метаболизма, нейтрализуя токсичные промежуточные продукты. Это создает условия для нормального синтеза белка и передачи наследственной информации. Кроме того, бор регулирует поступление кальция и некоторых других катионов в растения, повышает устойчивость к болезням и неблагоприятным факторам среды.

Микроэлементы-металлы входят в состав ферментов, обеспечивающих нормальное функционирование растительных организмов, или являются специфическими активаторами ферментных систем. Элементы с переменной валентностью — кобальт, марганец, медь, молибден - обеспечивают протекание окислительно-восстановительных процессов. Цинк принимает участие в метаболизме стимуляторов и ингибиторов роста, а также нуклеиновых кислот и белков. Молибден играет ключевую роль в процессах фиксации атмосферного азота как симбиотической, так и свободноживущей почвенной микрофлорой.

Почва является основным резервуаром и источником большинства элементов питания растений, в том числе микроэлементов. Точный расчет доз микроудобрений для получения продукции с заданным содержанием микроэлементов возможен при знании содержания микроэлементов в почве, концентрации

их подвижных форм и генетически обусловленных потребностей растений. До начала периода интенсивной химизации земледелия информации о содержании и запасах подвижных форм микроэлементов в почвах Калининградской области не было.

С начала семидесятых годов прошлого века коллективом Центра агрохимической службы были развернуты широкомасштабные исследования поведения микроэлементов во всех компонентах агроэкосистем. Изучались содержание и запасы валовых и подвижных форм микроэлементов в профиле присутствующих в регионе почв, в гумусово-аккумулятивных горизонтах, содержание микроэлементов в почвенно-грунтовых водах, в продовольственных, технических и кормовых культурах. Было отобрано и проанализировано более 40 тысяч образцов из гумусовых горизонтов, заложено и проанализировано свыше 500 почвенных разрезов, около 450 образцов почвенно-грунтовых вод. Образцы отбирались и анализировались по стандартным, принятым в агрохимической службе ГОСТИрованными методикам. Оценка обеспеченности почв микроэлементами проводилась по принятым для нечерноземной зоны градациям. Групповой и фракционный состав гумуса минеральных почв определяли по методу Пономаревой и Плотниковой.

Обеспеченность почв области микроэлементами варьирует в достаточно широких пределах (табл. 1).

Таблица 1. Обеспеченность почв сельскохозяйственных угодий микроэлементами, %
Table 1. Provision of the agricultural soils microelements, %

Элемент	Низкая	Средняя	Повышенная	Высокая
Бор	0,4	23,2	69,6	6,8
Кобальт	93,9	6,1	-	-
Марганец	0,2	27,9	69,2	2,7
Медь	6,5	46,4	45,5	1,7
Молибден	100,0	-	-	-
Цинк	73,8	25,2	1,1	-

Содержание микроэлементов в гумусово-аккумулятивных горизонтах определяется генезисом и минералогическим составом почвообразующих пород, направленностью и интенсивностью почвообразовательных процессов, физическими, агрохимическими свойствами почв, а также интенсивностью их сельскохозяйственного использования. По содержанию микроэлементов основные почвообразующие породы Калининградской области располагаются в следующем ряду по убыванию: озерно- и водно-ледниковые безвалунные глины > водно-ледниковые безвалунные пылеватые суглинки > моренные валунные суглинки > моренные валунные супеси > озерно-ледниковые безвалунные пески > древнеаллювиальные сортированные пески [1]. Таким образом, обогащенные мелкопылеватыми и илистыми фракциями продукты сортировки морены являются концентраторами микроэлементов. Грубодисперсные дериваты обеднены микроэлементами относительно исходной морены. Содержание микроэлементов в органогенных породах определяется растениями-торфообразователями, а также современными и древними гидрогенными процессами, поэтому варьирует в достаточно широких пределах.

Из рассматриваемых микроэлементов бор является металлоидом с постоянной степенью окисления, что накладывает определенный отпечаток на его

поведение в системе почва-растение. Основная его часть находится в кристаллических решетках первичных и вторичных минералов, где замещает кремний в кремнекислородных тетраэдрах. Коэффициенты подвижности бора в минеральных почвах составляют 2-7%, при этом большие значения характерны для аллювиальных дерновых почв. В органогенных почвах подвижность его существенно выше, так как часть бора входит в состав относительно низкомолекулярных полимеров фульватной природы.

Ослабление подзолообразовательного и усиление аккумулятивных процессов ведут к накоплению как валового бора, так и его подвижных соединений в почвах. Содержание подвижного бора в верхних горизонтах возрастает в ряду дерново-подзолистые < дерновые < аллювиальные < осушаемые торфяные почвы. В минеральных почвах прослеживается связь между содержанием частиц физической глины и подвижным бором, при этом теснота корреляционной связи уменьшается в ряду дерновые < дерново-подзолистые < аллювиальные почвы. Коэффициенты линейной корреляции между содержанием физической глины и подвижным бором составляют для дерново-подзолистых почв +0,59; для дерновых +0,69; для аллювиальных +0,53. Для развитых на морене и продуктах ее переотложения легкого гранулометрического состава дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв характерно элювиально-иллювиальное распределение подвижного бора в профиле, тогда как для тяжелых дерново-подзолистых на озерно-ледниковых безвалунных глинах его распределение относительно равномерное. Максимальные коэффициенты биологического накопления отмечаются для дерново-подзолистых легко- и среднесуглинистых почв, развитых на моренных отложениях [2].

Содержание и состав органического вещества также являются существенными критериями оценки обеспеченности почв подвижным бором. Прослеживается прямая зависимость между общим содержанием гумуса и подвижного бора в минеральных почвах. Для дерново-подзолистых почв коэффициент линейной корреляции составляет +0,39, для аллювиальных +0,42, для дерновых +0,65. Таким образом, наиболее тесная связь прослеживается в дерновых почвах, в которых доминируют аккумулятивные процессы. Расчет корреляционных связей между долей отдельных фракций гумусовых веществ и содержанием подвижного бора показал достоверную положительную корреляцию между свободными и рыхлосвязанными гуминовыми кислотами ($r = +0,56$) и фракцией фульвокислот, связанной с кальцием, магнием и их гুমатами ($r = +0,60$). Между свободными фульвокислотами и подвижным бором прослеживается обратная зависимость ($r = -0,58$) [3]. В органогенных почвах связь между содержанием органического вещества и подвижного бора слабая ($r = +0,29$).

Почвенная кислотность неоднозначно влияет на накопление бора и подвижность его соединений. В кислой среде основной формой его существования является недиссоциированная борная кислота, которая в условиях выраженного промывного режима активно мигрирует в нижние горизонты почвенного профиля. В слабокислой и близкой к нейтральной среде появляются анионы $B(OH)_4^-$, а также эфиры борной кислоты. Это усиливает адсорбцию бора и способствует накоплению его в профиле. Смещение реакции среды в слабощелочной диапазон способствует образованию труднорастворимых боратов кальция.

Нашими исследованиями установлены положительные корреляционные связи между величиной рН для основных типов почв. Коэффициенты корреляции

составляют для дерново-подзолистых почв $+0,42 \pm 0,02$; для дерновых $+0,57 \pm 0,04$; для аллювиальных $+0,59 \pm 0,04$; для осушаемых торфяных $+0,53 \pm 0,04$. При этом установлена существенная нелинейность зависимости содержания подвижного бора от pH для дерново-подзолистых почв. В кислой среде (pH до 5,5) корреляция тесная, в нейтральной среде (pH в интервале 6,1-7,0) уменьшение кислотности не отражается на содержании подвижного бора.

В целом около 24% почв сельскохозяйственных угодий области характеризуются недостаточным содержанием бора. С учетом роста посевных площадей особо требовательных к этому элементу культур (сахарной свеклы, озимого и ярового рапса) до половины пахотных почв нуждаются в применении борных удобрений. Нашими исследованиями установлено, что наиболее экономически и технологически целесообразными способами внесения бора являются предпосевная обработка семян или опрыскивание вегетирующих растений раствором борной кислоты из расчета 50 г физического веса на гектар.

Содержание доступных соединений кобальта во многом определяется типом почв и условиями почвообразования. На территории региона не распространены почвообразующие породы, содержащие минералы кобальта. Последний присутствует в качестве акцессорной примеси в минералах железа и марганца. Это обуславливает выраженный недостаток подвижных соединений кобальта в аккумулятивных горизонтах подавляющего большинства почв. Среднее содержание подвижного кобальта в дерново-подзолистых почвах составляет 0,71 мг/кг, в дерновых – 0,77, в аллювиальных – 1,31, в болотных – 1,02 мг/кг [4]. Для дерново-подзолистых почв характерно элювиально-иллювиальное распределение кобальта по профилю, аллювиальные и болотные почвы вследствие наложения процессов гидрогенной аккумуляции имеют слабовыраженную дифференциацию профиля по кобальту.

Подвижный кобальт представлен в почвах двухзарядным катионом, его частично гидролизованная форма, а также подвижными кобальт-фульватными комплексно-гетерополярными соединениями. Катионные формы кобальта достаточно активно адсорбируются минеральными и органо-минеральными коллоидами, поэтому в минеральных почвах прослеживается прямая зависимость между содержанием физической глины и подвижного кобальта ($r = +0,58 \pm 0,02$ в дерново-подзолистых почвах, $+0,65 \pm 0,03$ в дерновых и $+0,42 \pm 0,06$ в аллювиальных). Определенное влияние на накопление подвижных соединений кобальта оказывают почвообразующие породы. Как правило, дерново-подзолистые почвы, сформированные на морене, отличаются пониженным запасом кобальта по сравнению с почвами, сформированными на водно-ледниковых безвалунных суглинках и глинах.

Накопление органического вещества также способствует увеличению концентрации подвижного кобальта. Прослеживается прямая, близкая к линейной, зависимость концентрации кобальта от содержания органического вещества в дерновых почвах ($r = +0,85$). В аллювиальных и дерново-подзолистых почвах связь менее тесная ($r = +0,48$ и $r = +0,35$ соответственно) вследствие наложения процессов гидрогенной аккумуляции и оподзоливания. В дерново-подзолистых почвах кобальт может накапливаться в форме простых гетерополярных солей гуминовых кислот, о чем свидетельствует достоверная корреляционная связь между содержанием Co и долей свободных и рыхлосвязанных гуминовых кислот ($r = +0,63$) [3].

В кислых почвах обменно поглощенный кобальт вытесняется из почвенного поглощающего комплекса катионами алюминия, по мере нейтрализации

почвенных растворов закрепление кобальта усиливается. Коэффициент корреляции между содержанием кобальта и величиной рН солевой вытяжки составляет для дерново-подзолистых почв $+0,68 \pm 0,01$, для аллювиальных минеральных - $+0,41 \pm 0,05$. В органогенных почвах механизм закрепления кобальта иной, поэтому между рН и содержанием подвижного кобальта наблюдается обратная зависимость ($r = -0,56 \pm 0,04$) [1].

В целом практически для всех почв сельскохозяйственных угодий характерен выраженный дефицит кобальта, поэтому применение кобальтовых микроудобрений под продовольственные и кормовые культуры является, на наш взгляд, необходимым агроприемом для получения качественной продукции. Наиболее эффективными методами применения кобальтовых микроудобрений являются предпосевная обработка семян и обработка вегетирующих растений раствором сернокислого или хлористого кобальта. Оптимальная доза препаратов – 200 г физического веса на гектар или гектарную норму семян.

Практически все почвы Калининградской области отличаются весьма низким содержанием молибдена. Почвообразующие породы характеризуются крайне незначительным содержанием молибденовых минералов, поэтому основными источниками молибдена в почвах агроэкосистем являются аэральное и антропогенное поступление. Расчет коэффициентов линейной корреляции между содержанием молибдена в основных типах почв и почвообразующих породах показал достаточно слабую зависимость. Так, для общей совокупности дерново-подзолистых почв $r = +0,28 \pm 0,02$; для дерновых глееватых и глеевых $r = +0,10 \pm 0,01$; для аллювиальных $r = +0,38 \pm 0,01$. В отличие от других химических элементов зависимость содержания подвижного молибдена от содержания физической глины относительно слабая.

Между содержанием гумуса и подвижного молибдена установлена статистически достоверная обратная корреляционная зависимость, коэффициент линейной корреляции составил $-0,70$ для дерново-подзолистых и $-0,73$ для дерновых глеевых и глееватых почв. Нами не выявлены достоверные корреляционные связи между содержанием подвижного молибдена и долей отдельных фракций гумусовых веществ [3].

Кислотно-основные свойства почв весьма значительно влияют на подвижность молибдена. Увеличение рН сужает диапазон устойчивости восстановленных его соединений и благоприятствует накоплению окисленной формы. Нашими исследованиями установлена статистически достоверная корреляционная зависимость между содержанием подвижного молибдена и величиной pH_{KCl} на кислых дерново-подзолистых почвах ($pH_{KCl} < 5,6$), однако на нейтральных рост pH_{KCl} не приводил к увеличению содержания Мо. Последнее, по-видимому, связано с повышением миграционной способности и скорости выщелачивания молибдата при относительно высоких значениях рН.

В связи с выраженным дефицитом молибдена применение молибденсодержащих удобрений актуально для всех возделываемых культур. На основании наших многолетних исследований установлено, что наиболее эффективным и целесообразным методом является предпосевная инокуляция семян раствором молибдата аммония. Расход соли – 200 г физического веса на гектарную норму семян.

Почвообразующие породы Калининградской области относительно обеднены цинком, для него характерно рассеяние. Отмечается присущая большинству элементов закономерность: при водной сортировке морены продукты переотложения более тяжелого гранулометрического состава содержат больше

элементов, чем исходная порода, а для продуктов легкого гранулометрического состава наблюдается обратное соотношение. Легким дерново-подзолистым почвам характерно элювиально-иллювиальное распределение подвижных соединений цинка в профиле, коэффициент биологического накопления, как правило, меньше единицы. В легкосуглинистых почвах наблюдается слабо выраженная биогенная аккумуляция подвижного цинка, коэффициент биологического накопления близок к единице. В средне- и тяжелосуглинистых почвах отмечается выраженная аккумуляция валового цинка, но подвижность его существенно ниже, чем в легких почвах. Дерновые глеевые почвы характеризуются весьма активной биогенной аккумуляцией подвижного цинка, коэффициенты биологического накопления варьируют в пределах 2,5-3,5.

Для дерново-глеевых и аллювиальных дерновых почв отмечается достаточно тесная корреляционная связь между содержанием физической глины и подвижного цинка, Коэффициенты корреляции составляют $+0,75 \pm 0,02$ и $+0,68 \pm 0,04$ соответственно. В гумусово-аккумулятивных горизонтах дерново-подзолистых почв связь между содержанием подвижного цинка и гранулометрическим составом выражена значительно слабее ($r = +0,36 \pm 0,02$). Вероятно, это вызвано спецификой водно-воздушного режима, а также большей интенсивностью антропогенных воздействий.

Цинк способен образовывать гетерополярные и комплексно-гетерополярные соединения с органическим веществом. Нашими исследованиями установлена прямая зависимость между валовым содержанием цинка и гумуса в аккумулятивном горизонте дерново-подзолистых почв ($r = +0,81 \pm 0,10$) [3]. Между содержанием подвижного цинка и гумуса также прослеживается прямая зависимость ($r = +0,69$). Аналогичные закономерности выявлены для дерновых почв. Коэффициенты корреляции составляют $+0,83$ и $+0,74$ для валового содержания и подвижных соединений соответственно [1].

Цинк в биогеоценозах регионов с достаточным и избыточным увлажнением является энергичным водным мигрантом [1]. В значительной степени его подвижность определяется величиной рН почвенного раствора. В кислой среде катион цинка достаточно прочно удерживается в обменно поглощенной форме. При нейтрализации почвенных растворов подвижность цинка существенно снижается.

В агроэкосистемах области наблюдается выраженный дефицит цинка. Нашими исследованиями установлена высокая эффективность цинковых удобрений под все сельскохозяйственные культуры. Максимальный эффект достигается при предпосевной обработке семян или при опрыскивании вегетирующих растений солями цинка.

Марганец является незаменимым элементом для растений, животных и человека. Благодаря широкому спектру степеней окисления и разнообразию почвенных условий и свойств марганец в почвах и почвообразующих породах существует в нескольких формах. В процессе почвообразования происходит перераспределение его в почвенном профиле. Характер дифференциации профиля определяется кислотно-основными свойствами, окислительно-восстановительным режимом, а также хозяйственной деятельностью. В целом для дерново-подзолистых почв сельскохозяйственных угодий характерно элювиально-иллювиальное распределение валового и подвижного марганца.

С увеличением содержания частиц физической глины, в частности илистой и коллоидной фракции, концентрация подвижных соединений марганца возрастает. Однако в дерново-подзолистых почвах гранулометрический состав не

играет решающей роли в накоплении подвижного марганца и закреплении его в обменно поглощенной форме. Коэффициент линейной корреляции между содержанием частиц физической глины и подвижного марганца относительно невелик ($r = +0,31 \pm 0,02$).

В дерновых почвах подвижность марганца во многом определяется кислотно-основными условиями. Присутствие карбонатов, характерное для некоторых дерновых почв связного гранулометрического состава, а также периодическое насыщение всего профиля жесткими грунтовыми водами снижает подвижность марганца. В условиях господствующего в дерново-подзолистых почвах промывного водного режима и застойно-промывного – в дерново-глеевых подкисление усиливает элювиирование Mn^{2+} в нижние горизонты почвенного профиля с нисходящими потоками почвенных растворов. Возможность этого подтверждается элювиально-иллювиальным распределением марганца в профиле большинства дерново-подзолистых почв Калининградской области.

Обобщение результатов определения содержания подвижного марганца в гумусовых горизонтах почв площадок локального мониторинга ФГБУ «ЦАС «Калининградский» показало, что концентрация подвижных соединений Mn от года к году изменяется в 1,5-1,8 раз в зависимости от условий увлажнения в период отбора образцов. При этом размах варьирования выше в полугидроморфных почвах с повышенным содержанием органического вещества, что подтверждает роль окислительно-восстановительного режима и микробиоты.

В отличие от большинства микроэлементов для подавляющего количества почв региона выраженный дефицит марганца не характерен. Некоторый его недостаток наблюдается на супесчаных и легкосуглинистых автоморфных почвах с нейтральной реакцией среды. В относительно засушливые годы дефицит марганца обостряется. Эффективным способом коррекции его дефицита является обработка вегетирующих растений раствором сернистого марганца из расчета 200 г на гектар.

Медь также является необходимым микроэлементом для растений, животных и человека. Содержание меди в морене Валдайского ледника и продуктах ее сортировки и переотложения ниже кларка литосферы, поэтому почвообразующие породы несколько обеднены этим элементом. В ходе почвообразования медь перераспределяется по почвенному профилю. Практически для всех минеральных почв наблюдается ее выраженная биогенная аккумуляция. Утяжеление гранулометрического состава приводит к росту содержания как валовой, так и подвижной меди, однако в тяжелых почвах отмечается тенденция к ее подвижности [5].

Содержание органического вещества неоднозначно влияет на обеспеченность почв подвижными соединениями меди. В минеральных почвах отмечается прямая зависимость между накоплением подвижной меди и гумусированностью. В органогенных почвах содержание подвижной меди положительно коррелирует с зольностью ($r = +0,59 \pm 0,04$) [1]. Между подвижностью меди и долей свободных гуминовых кислот прослеживается обратная зависимость. Рост относительного содержания фульвокислот также приводит к уменьшению подвижности меди [3].

Медь является элементом переменной валентности, в окислительных аэробных условиях устойчивы производные двухвалентной меди, в восстановительных анаэробных – соединения закисной одновалентной. Поэтому зависимость содержания подвижной меди от кислотно-основных условий неоднозначна. В дерново-подзолистых почвах вследствие преобладания аэробных условий в пахотном горизонте наблюдается положительная корреляция между

pH_{KCl} и содержанием подвижной меди, в дерновых почвах прослеживается обратная зависимость ($r = +0,52 \pm 0,02$ и $r = -0,57 \pm 0,03$ соответственно). В органических почвах отмечается та же закономерность – при нейтрализации содержание подвижной меди снижается.

Содержание подвижной меди зависит от вида сельскохозяйственных угодий. Пахотные почвы содержат на 11-17% меньше подвижной меди, чем аналогичные по типу, гранулометрическому составу и гумусированности почвы сенокосов и пастбищ. В целом несколько более половины почв сельскохозяйственных угодий недостаточно обеспечены подвижной медью. Для коррекции возможного ее дефицита в продукции растениеводства, согласно результатам наших многочисленных опытов с различными сельскохозяйственными культурами, наиболее целесообразными приемами являются предпосевная обработка семян или опрыскивание вегетирующих растений раствором медного купороса.

Таким образом, абсолютное большинство почв сельскохозяйственных угодий региона характеризуются низкой обеспеченностью кобальтом, молибденом и цинком. Более половины почв недостаточно обеспечены подвижной медью, около половины – бором. Внедрение в практику научно обоснованных методов использования микроэлементов позволит повысить продуктивность агроэкосистем и качество продукции растениеводства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Панасин, В.И. Микроэлементы и урожай / В.И. Панасин. – Калининград, 1995. – 282 с.
2. Бор в агроэкосистемах Калининградской области / В.И. Панасин, Е.С. Роньжина, В.В. Долинина и др. – Калининград, 2012. – 233 с.
3. Панасин, В.И. Гумус и плодородие почв Калининградской области / В.И. Панасин, Д.А. Рымаренко. – Калининград, 2004. – 220 с.
4. Содержание и распространение кобальта в агроэкосистемах Калининградской области / В.И. Панасин, С.И. Новикова, Г.Г. Комовникова и др. – Калининград, 2007. – 219 с.
5. Панасин, В.И. Агрохимические аспекты распространения меди в агроэкосистемах Калининградской области / В.И. Панасин, В.Д. Слобожанинова. – Калининград, 2003. – 285 с.

SOIL AND AGROCHEMICAL ASPECTS OF MICROELEMENTS DISTRIBUTION IN AGROCEONOSIS

V.I. Panasin, D.A. Rymarenko

The soils of the region are specified by contents of mobile microelement compounds. There are stated dependencies of contents of mobile microelement compounds on pH rate, content of humic substances and granulometric composition of soils.

microelements, mobile forms, correlation, agrochemical properties of soil, microfertilizers