

ЛЕКЦИЯ 2. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФОСФОР-СОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ

Вопросы

1. Фосфор в питании растений и качестве продукции.
2. Формы фосфора в почве. Процессы трансформации фосфатов.
3. Формирование фосфатного фонда и динамика фосфатов.
4. Факторы, влияющие на содержание фосфатов и фосфатный режим пахотных почв.

Литература

1. Агрохимия: учебник / И. Р. Вильдфлуш [и др.]; под ред. И. Р. Вильдфлуша. – Минск: 2012. – 506 с.
2. Вильдфлуш, И. Р. Фосфор в почвах и земледелии Беларуси / И. Р. Вильдфлуш, А. Р. Цыганов, В. В. Лапа. – Минск, 1999. – 190 с.
3. Прянишников, Д. Н. Избранные сочинения. Т. 1 / Д. Н. Прянишников. – М.: Колос, 1965. – 767 с.
4. Минеральные удобрения и их применение при современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: пособие / О. И. Мишура, И. Р. Вильдфлуш, В. В. Лапа. – Горки: БГСХА, 2011. – 176 с.
5. Агрохимия. Практикум: учеб. пособие / И. Р. Вильдфлуш [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2010. – 368 с.
6. Рациональное применение удобрений: учеб. пособие / И. Р. Вильдфлуш [и др.]. – Горки, 2002. – 324 с.

1. Фосфор – важнейший биогенный элемент, который необходим для жизнедеятельности всех организмов. Соединения фосфора с кислородом (фосфорные кислоты и фосфаты), являясь самыми распространенными в природе, имеют исключительно важное значение для существования и развития растительного и животного мира. Без фосфорной кислоты не может существовать ни одна живая клетка. В связи с этим фосфор назван ключом жизни.

Фосфор содержится в растениях в органических и минеральных соединениях. Обычно большая часть фосфора, содержащаяся в растениях (до 90 %), представлена различными органическими соединениями. В репродуктивных органах фосфор концентрируется в наибольшей степени. Семена должны содержать фосфора в количестве, достаточном до начала его поглощения из почвы сформировавшимися корнями.

Фосфор содержится в клеточной протоплазме, входит в состав хромосом, нуклеиновых кислот, нуклеотидов, фосфопротеидов, некоторых витаминов, ферментов, эфиров, фитина, других органических соединений. Фосфор является обязательным компонентом ряда коферментных систем, катализирующих ряд реакций азотного обмена.

Важными органическими фосфорсодержащими соединениями в растениях являются нуклеиновые кислоты, играющие важную роль в наследственных функциях организма. В растениях на долю нуклеиновых кислот приходится от 0,1 до 1 %. Содержание фосфора в нуклеиновых кислотах в пересчете на P_2O_5 составляет около 20 %. Нуклеопротеиды, представляющие собой соединения белков с нуклеиновыми кислотами, являются важнейшим веществом клеточных ядер.

Фосфор входит также в состав фитина, лецитина, сахарофосфатов и других органических соединений. Фитин является запасным веществом, и фосфорная кислота, входящая в его состав, используется при прорастании семян. Лецитин – представитель группы фос-

фатидов, накапливается преимущественно в семенах. Ключевая позиция в обмене веществ принадлежит макроэргическим соединениям, содержащим фосфор. В настоящее время известно большое число макроэргических соединений, в состав большинства из которых входит фосфор. Однако основная роль среди них принадлежит аденозинтрифосфорной кислоте (АТФ). Это своеобразный хранитель и носитель энергии во многих синтетических процессах. При гидролизе АТФ, входящей в состав РНК, высвобождается около 55 КДж/моль. В то же время свободная энергия гидролиза обычных связей составляет только 8–12 КДж/моль. Макроэргические фосфатные связи принимают участие в процессах фотосинтеза, дыхания, биосинтеза белков, жиров, крахмала, сахарозы, ряда аминокислот и других соединений.

При участии фосфора осуществляется углеводный обмен в растениях. Фосфорная кислота принимает активное участие в биосинтезе сахарозы, ферментативных превращениях форм углеводов, в их передвижении, оттоке в клубни картофеля, корнеплоды сахарной свеклы и т. д. В связи с этим фосфорные удобрения положительно влияют на накопление в растениях крахмала, сахаров, других углеводов, улучшают качество льна и конопли. Фосфор также благоприятствует накоплению в плодах красящих и ароматических веществ.

Особенно чувствительны к недостатку фосфора растения в начальных фазах роста и развития, когда их корневая система обладает слабой усвояющей способностью. Замечено, что в начальные стадии развития сельскохозяйственные культуры интенсивнее поглощают фосфаты, чем в последующие периоды роста. Оптимальное фосфорное питание в начальный период роста и развития растений способствует развитию корневой системы – она глубже проникает в почву и лучше ветвится, что улучшает снабжение растений влагой и питательными элементами. Фосфор способствует более экономному расходованию влаги. Это имеет особенно большое значение в засушливые периоды.

В связи с таким большим значением фосфора в первые периоды роста и развития растений припосевное внесение в рядки небольших доз фосфорных удобрений обеспечивает значительные прибавки урожая самых различных культур. Наибольшее потребление фосфора зерновыми культурами наблюдается в фазы выхода в трубку и колошения.

В минеральной форме фосфор находится в растениях в виде солей ортофосфорной кислоты с кальцием, магнием, калием, аммонием и другими катионами. Минеральный фосфор является не только запасующим веществом, резервом для синтеза органических фосфорсодержащих соединений, но и повышает буферность клеточного сока, поддерживает тургор клетки, другие жизненно важные процессы в ней. В связи с тем, что фосфор усиливает способность растительных клеток удерживать воду, он повышает устойчивость растений к засухам и низким температурам. Хорошее фосфорное питание улучшает перезимовку озимых культур благодаря остаточному накоплению сахаров в узлах кущения с осени.

При пониженных температурах (10–11 °С) затрудняется использование растениями фосфора. Исследованиями установлено, что понижение температуры до 5–7 °С мало влияло на поступление калия в растения, но резко уменьшало поглощение ими азота и фосфора. Увеличением доз фосфорных удобрений можно усилить поглощение фосфора и снизить отрицательное влияние холодов на растения.

У молодых растений фосфор концентрируется преимущественно в меристематической ткани. Он легко передвигается внутри растений и перемещается из старых тканей в более молодые, т. е. реутилизируется (используется повторно). По мере созревания культур большая часть усвоенного растениями фосфора сосредотачивается в семенах и плодах (в семенах злаков до 50 %).

Из внешних признаков при недостатке фосфора наблюдается скручивание краев листовой пластинки, грязно-зеленая, более темная окраска листьев. При недостатке фосфора кроме более темной окраски листьев вследствие образования антоциана нередко появляются еще красноватые и фиолетовые тона, в особенности у основания стеблей, на влага-

лицах листьев и черешках. От недостатка фосфора больше страдают более старые – нижние листья.

При нехватке фосфора в растениях больше накапливается нитратов, что связано с важным значением соединений типа НАД и НАДФ при восстановлении нитратов.

Фосфор снижает токсичность алюминия, марганца и железа. Благодаря тому, что фосфор связывает подвижный алюминий почвы, фиксирует его в корневой системе, улучшается углеводный и азотный обмен в растениях.

При высоком содержании в почве меди снижается потребление растениями фосфора и увеличивается эффективность фосфорных удобрений. Применение цинковых удобрений снижает поступление в растения фосфора.

Фосфор является спутником азота и белковых соединений. Фосфора содержится в растениях в 2–3 раза меньше, чем азота. При недостатке фосфора замедляется синтез белков и уменьшается их содержание. Поэтому дозы азотных и фосфорных удобрений должны быть сбалансированными.

Исследования, проведенные в США, показали, что небольшое количество азота, входящее в состав фосфорного удобрения, делает его более эффективным.

Избыток фосфора также неблагоприятно влияет на растения. В этом случае много фосфатов находится в растениях в минеральной форме, особенно в вегетативных органах. В случае избыточного поступления фосфора растения преждевременно созревают и не успевают синтезировать хороший урожай. При избытке фосфора ухудшается питание цинком, что приводит к заболеванию плодовых культур розеточностью.

Большое значение имеет фосфор в жизни человека и сельскохозяйственных животных. Он входит в состав костной ткани и играет незаменимую роль в процессах, от которых зависят основные жизненные функции организма (обмен веществ, размножение и т. д.). При недостатке фосфора у человека и животных развивается остеоспороз и другие заболевания костей. Суточная потребность в фосфоре составляет 1,0–1,5 г. Отмечается достоверная связь между содержанием фосфора в кормах и продуктивностью животных. Оптимальное содержание фосфора в кормах – 0,35–0,5 % сухого вещества.

Обеспеченность растений фосфором во многом зависит от запасов его в почве, степени подвижности, гранулометрического состава и ряда других условий, влияющих на использование фосфора из почвы и удобрений. Все формы фосфора в почве, возможные вариации их воздействия можно изобразить в цепочке: валовой – органический – минеральные соединения P_2O_5 – потенциально доступный P_2O_5 – непосредственно доступный P_2O_5 .

Применение фосфорных удобрений влияет не только на урожайность, но и на качество продукции. Фосфорная кислота принимает активное участие в биосинтезе сахарозы, ферментативных превращениях форм углеводов, передвижении углеводов, влияет на их отток в клубни картофеля, корнеплоды сахарной свеклы и т. д. В связи с этим фосфорные удобрения положительно влияют на накопление в растениях крахмала, сахаров, других углеводов, улучшают качество льна и конопли. Фосфор также благоприятствует накоплению в плодах красящих и ароматических веществ, улучшает их лежкость.

Достаточное фосфорное питание ускоряет образование растениями продуктивных органов. В частности, регулируя фосфорное питание, можно существенно изменять в сторону увеличения количество зерна за счет соломы.

При недостатке фосфора в растениях больше накапливается нитратов, что связано с важным значением фосфатных соединений типа НАД и НАДФ в восстановлении нитратов. Внесение фосфорных удобрений снижает уровень нитратов. С другой стороны, и избыток фосфора оказывает неблагоприятное действие на растения. В этом случае много фосфатов находится в растениях в минеральной форме, особенно в вегетативных органах. В случае избыточного поступления фосфора растения преждевременно созревают и не успевают синтезировать хороший урожай. Характерной особенностью нарушения питания растений при завышенных дозах фосфора на дерново-подзолистых почвах является нарушение баланса магния и хлора.

При избытке фосфора ухудшается питание цинком, что приводит к заболеванию плодовых культур розеточностью. При внесении высоких доз фосфорных удобрений увеличивается потребность применения цинковых удобрений.

Усвоение фосфора растениями, эффективность фосфорных удобрений и остаточных фосфатов в почве возрастают при достаточной обеспеченности почвы другими элементами питания, в том числе микроэлементами. В свою очередь, оптимальное содержание в почве фосфора повышает эффективность других видов удобрений.

Таким образом, для получения высокого урожая хорошего качества необходимо сбалансированное минеральное питание растений.

2. Обеспеченность растений фосфором во многом зависит от общих его запасов в почве, удельного веса его подвижных форм, гранулометрического состава почвы и других условий, влияющих на использование растениями фосфора из почвы и удобрений.

Важным показателем потенциального плодородия почв является общее содержание в них фосфорных соединений. В работах многих исследователей отмечается бедность ими дерново-подзолистых почв. Общее количество соединений фосфора в почве может колебаться в значительных пределах в зависимости от гранулометрического состава, материнской породы, генезиса и степени окультуренности почвы.

В земной коре фосфора содержится в среднем 0,12 %, в почвах – 0,14 %. Общее его содержание в различных типах почв колеблется от 0,01 до 0,35 %, в низинных агроторфяных почвах – от 0,29 до 0,67 %, а в пойменных низинных иногда достигает 1,7 %. В исследованиях кафедры агрохимии БГСХА были получены следующие значения содержания фосфора в пахотном горизонте: дерново-подзолистые пылевато-, легко- и среднесуглинистые почвы – 0,138–0,160 %, легкосуглинистые, развивающиеся на моренном суглинке – 0,09–0,132%, супесчаные, подстилаемые моренным суглинком – 0,064–0,121, песчаные – 0,056–0,080 %.

В верхних горизонтах почв любого типа и состава, как правило, больше валового фосфора, чем в нижних. Это объясняется биологическим (корни растений постепенно переносят фосфаты из нижних слоев почвы в верхние) и антропогенными факторами.

В почве, как и в растениях, фосфор присутствует в органической и минеральной формах. По данным Т. Н. Кулаковской, в минеральных почвах доля органических фосфатов в валовом фосфоре колеблется от 16 до 48 % и увеличивается от легких почв к тяжелым. В низинных торфяных почвах органические фосфаты преобладают над минеральными, их удельный вес достигает 70%.

Органические фосфаты в почве представлены различными по природе группами соединений: индивидуальной природы (неспецифические органофосфаты) и гумусообразования (специфические соединения). Неспецифические органофосфаты относятся к трем основным классам соединений: фосфолипиды, нуклеиновые кислоты и инозитолфосфаты. При этом кальциевые и магниевые соли инозитолфосфорной кислоты содержатся в нейтральных почвах, а фитаты железа и алюминия – в кислых. Вниз по профилю почвы содержание органических фосфатов снижается, они распределяются в почве примерно так же, как гумус. Фосфолипиды составляют менее 1 % всего органического фосфора, нуклеиновые кислоты – до 10 % и инозитолфосфаты – 30–60 %. Обнаружены также в небольших количествах фосфоропротеины, сахарофосфаты, глицерофосфаты, нуклеотидные коферменты, соединения фосфатов с жирными и аминокислотами и другие соединения.

По новейшим данным многих авторов, больше половины фосфорорганических соединений представлены почвообразованными специфическими фосфогумусными соединениями. Формы этих соединений пока неясны, хотя некоторые данные позволяют считать, что фосфор в них связан с гумусовыми кислотами через ион металла.

Исследования кафедры агрохимии БГСХА показали, что в гумусе агродерново-подзолистых почв содержится 0,8–3,5 % P_2O_5 к его массе. Причем, как правило, чем

меньше гумуса в почве, тем выше его насыщенность органическим фосфором. Для определения общего содержания органического фосфора широко используется метод Мета: почва последовательно обрабатывается при температуре 70 °С концентрированной HCl и на холоде 0,5 М NaOH.

Органический фосфор – это главная часть «оборотного капитала» почвенных фосфатов, при определенных условиях он минерализуется и становится доступным для растений. Большое значение имеет соотношение углерода и органического фосфора. Если $C:P_{org} < 200$, то по данным Нельсона и Тисдала, фосфорорганические соединения представлены неустойчивыми легкоминерализующимися формами.

По данным Л. Г. Шарпфа, природные фосфорорганические соединения претерпевают в почвах физико-химические изменения в результате реакций хелатообразования, сорбции, химического гидролиза, ферментативных превращений и окислительно-восстановительных реакций. Кроме того, происходит их биологическое разложение почвенной микрофлорой и свободными ферментами. В результате этих процессов значительная часть органических фосфатов минерализуется и пополняет запасы потенциально доступных минеральных форм фосфора.

Поэтому для повышения уровня фосфорного питания растений и снижения потребности в фосфорных удобрениях актуально выявление факторов, усиливающих минерализацию органических фосфатов почвы.

Исследования Л. М. Томпсона говорят о том, что фракция легко минерализующегося органического фосфора присутствует лишь в целинных почвах, но при обработке почвы она быстро исчезает. А после исчезновения этой фракции органический фосфор минерализуется значительно медленнее. При антропогенном вмешательстве почвенная система стремится стабилизировать свое состояние на новом уровне, ниже которого могут возникать негативные односторонние процессы минерализации, ухудшающие плодородие почвы.

Длительное внесение удобрений, особенно органических, увеличивает содержание органических фосфатов, но в меньшей степени, чем минеральных. Особенностью процесса минерализации органических фосфатов почвы является достаточно высокая подвижность ее продуктов, которые мало переходят в труднорастворимые соединения.

Минеральные формы фосфора в почвах по степени участия в фосфорном питании растений можно разделить на три большие группы, находящиеся в динамическом равновесии:

Ортофосфаты почвенного раствора (фактор интенсивности)	→	Лабильные фосфаты (фактор емкости)	→	Стабильные фосфаты
		←	←	

Ортофосфаты почвенного раствора – это однозамещенные водорастворимые фосфаты кальция и магния, фосфорнокислые соли одновалентных катионов калия, натрия, аммония и других. Эта фракция интенсивно используется растениями в начальный период роста и развития. О степени подвижности фосфатов в почве («фактор интенсивности») судят по способности твердой части почвы отдавать в раствор ионы фосфора, что устанавливается присутствием фосфора в почвенном растворе. Однако выделить почвенный раствор очень сложно, поэтому используются водные и солевые вытяжки из почвы.

Лабильные фосфаты – это фосфаты, осевшие или адсорбированные на поверхности твердых частиц почвы, почвенно-поглощающего комплекса, оксидах железа и алюминия, а также вторичные фосфаты, которые образовались после формирования почвы. Ученые считают, что 4–10 % всего почвенного фосфора связано адсорбционно. В отличие от первичных минералов вторичные фосфаты являются активной мобильной составной частью почвы. К ним относятся дигидратдикальцийфосфат ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$), октакальцийфосфат ($Ca_8H(PO_4)_3 \cdot 3H_2O$), одно- и двузамещенные фосфаты железа. При нарушении фосфатного

равновесия твердой и жидкой частей почвы эти фосфаты могут переходить в почвенный раствор. Фосфаты второй группы характеризуют запасы подвижного фосфора - фосфатную «емкость» почвы и являются резервом для последующего снабжения растений фосфором. Для определения величины запаса подвижных фосфатов используют (в зависимости от типа и состава почв) кислотные, щелочные, буферные растворители, анионообменные смолы, радиоизотопный метод и другие.

Стабильные фосфаты – труднорастворимые соединения, заключенные в почве в первичных и вторичных минералах (окклюдируемые гидратами полутораокисей, карбонатами и другими). Наиболее устойчивой формой, медленно поддающейся химическому и биологическому воздействию, является фосфор в составе кристаллической решетки первичных минералов почвы: апатитов, фосфоритов, варисцитов ($AlPO_4$), стренгитов ($FePO_4 \cdot 2H_2O$), вивианитов [$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$] и других. Фосфаты третьей группы почти недоступны для растений. Однако в процессе выветривания они могут становиться более доступными и служить источником фосфорного питания растений.

Известно 205 фосфорсодержащих минералов, из них 95 включают железо, 60 – алюминий, 56 – кальций и 45 – марганец. Многие из фосфорсодержащих минералов встречаются в небольших количествах. На апатиты и различные производные фосфатов кальция, входящие в состав фосфоритов, приходится 95% всех природных фосфатов. В процессе выветривания некоторое количество фосфора апатитов постепенно превращается в органические формы и в ионы, адсорбируемые другими минералами. Химическое выветривание – процесс очень сложный. Его можно представить в виде следующей схемы: первичные минералы + $O_2 + H_2O \rightarrow$ органическое вещество \rightarrow вторичные минералы + растворимые соли. К вторичным минералам, сформировавшимся в результате выветривания, имеющим в основном размеры илистых частиц, относятся разновидности биотитов (силикатные илистые минералы, монтмориллонит, каолинит и др.) и слаборастворимые оксиды алюминия, железа и кремния. Фосфор в составе вторичных минералов удерживается в результате ионных, координационных и адсорбционных связей.

3. Природные фосфорорганические соединения претерпевают в почвах физико-химические изменения в результате реакций хелатообразования, сорбции, химического гидролиза, ферментативных превращений и окислительно-восстановительных реакций. В результате этих процессов значительная часть органических фосфатов минерализуется и пополняет запасы потенциально доступных минеральных форм.

Длительное внесение удобрений, особенно органических, увеличивает содержание органических фосфатов, но в меньшей степени, чем минеральных. Особенностью процесса минерализации органических фосфатов почвы является достаточно высокая подвижность ее продуктов, которые мало переходят в труднорастворимые соединения.

Процессы превращения недоступных для растений минеральных и органических соединений фосфора в усвояемую форму протекают очень медленно. Несмотря на большие общие запасы фосфора в почве, его доступных соединений в ней содержится обычно мало, поэтому чтобы получать высокие устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур, необходимо применять фосфорные удобрения.

Как показали исследования, на более кислых дерново-подзолистых почвах происходит связывание фосфора, главным образом, полуторными оксидами алюминия и железа, на менее кислых почвах начинает возрастать связывание фосфора кальцием. Фосфаты в почве встречаются в виде солей различной основности. По мере ее повышения растворимость фосфатов в воде все более и более уменьшается, а вместе с тем падает доступность фосфора для растений.

Исследования показали, что природа связи поглощенных фосфат-ионов является преимущественно поверхностно-адсорбционной. При этом адсорбция по типу первичной адсорбции (хемосорбции), характерной чертой которой является поглощение фосфат-ионов как потенциалопределяющих ионов коллоидной частицы почвы (почвенно-поглощающего

комплекса), происходит с образованием внутренней частицы двойного электрического слоя, что подтверждается наличием адсорбции катионов раствора соли фосфата как противоиона. Адсорбционное поглощение дерново-подзолистыми почвами составляет примерно 70–80 % от общего количества поглощенных фосфатов. Остальная часть (20–30 %) поглощается по химическому типу с образованием отдельной твердой фазы, главным образом, труднорастворимых фосфатов алюминия, железа различной основности, а также фосфатов кальция.

По мере взаимодействия с почвами поверхностно-адсорбированные фосфат-ионы претерпевают изменения и превращаются в химические соединения, характерные для данного типа почвообразования и с различной степенью доступности растениям.

Внесенные в дерново-подзолистые почвы водорастворимые формы фосфорсодержащих удобрений, подчиняясь законам термодинамики, с течением времени превращаются в более устойчивые формы. На начальных этапах взаимодействия с почвой происходит образование рыхлосвязанных фосфатов кальция и аморфных соединений фосфатов алюминия и железа. Фосфор этих соединений сравнительно легко усваивается сельскохозяйственными растениями. При длительном взаимодействии свежесаженные фосфаты кальция и полуторных оксидов кристаллизуются и переходят соответственно в более основные и труднорастворимые соединения.

На кафедре агрохимии Белорусской государственной сельскохозяйственной академии в длительных стационарных опытах на дерново-подзолистых легкосуглинистых, супесчаных и песчаных почвах изучалось влияние применения удобрений на фосфатный режим почвы.

Установлено, что систематическое применение органических и минеральных удобрений приводит к возрастанию общего содержания фосфора как за счет минеральных, так и органических. В опыте Гродненской опытной станции на дерново-подзолистой супесчаной почве при применении в течение 13 лет $N_{30}P_{50}K_{50}$ на известкованном фоне при сильно-кислой реакции (рН в КСl 4,0) среди накопленных фосфатов в почве по сравнению с контролем на долю фосфатов полутораоксидов приходилось 79 % (54 % – на фосфаты алюминия и 22 % – на фосфаты железа), а на известкованном фоне (рН_{сол} 5,5) на фосфаты полутораоксидов лишь 48 % и фосфаты кальция 52 %.

При сочетании $N_{30}P_{50}K_{50}$ с 10 т/га навоза на известкованном фоне (при рН в КСl 5,8) фосфорные удобрения в еще большей мере переходили в формы, связанные с кальцием (59 %).

На дерново-подзолистых песчаных почвах накопление фосфора в отличие от суглинистых и супесчаных происходило преимущественно за счет фосфатов алюминия.

Таким образом, применение органических удобрений и известкование способствуют сохранению фосфатов, вносимых с удобрениями в более доступной форме, и повышают их эффективность.

Уменьшение связывания фосфатов удобрений с алюминием и железом при применении органических удобрений связано с тем, что при их использовании оксиды алюминия и железа обволакиваются и упаковываются слоем органических коллоидов («гумусовой пленкой»). По мнению ряда исследователей, в зависимости от почвенных условий органическое вещество может выполнять роль конкурента фосфат-ионов за адсорбционные места на поверхности твердой фазы почвы, препятствуя их поглощению. Кроме того, некоторые кислоты, образующиеся на различных стадиях разложения органического вещества, весьма энергично вытесняют из фосфатов алюминия, железа и кальция поглощенные фосфат-ионы, пополняя запасы подвижных фосфатов.

4. Поглощение растениями питательных элементов зависит от свойств почвы, ее водно-воздушного и теплового режимов, освещенности и других условий внешней среды. Особенно сильное влияние на поступление питательных элементов в растение оказывают реакция почвенного раствора, его концентрация и соотношение в нем солей.

Растения способны усваивать питательные элементы из почвенного раствора при невысокой их концентрации: от 0,01–0,05 до 0,1–0,2 %. При концентрации выше 0,2 % поглощение растениями воды и элементов питания резко замедляется, что приводит к их завяданию (плазмолизу клеток). Это наблюдается на засоленных почвах. Лучше усваиваются элементы питания из растворов умеренно повышенных концентраций. Чувствительность к концентрации почвенного раствора у разных растений неодинакова. Наиболее чувствительны к концентрированным растворам лен, люпин, огурцы, морковь, а также большинство молодых растений.

Важнейшее условие нормального питания растений – это оптимальное соотношение в почвенном растворе питательных элементов, т. е. соотношение катионов и анионов. Оно должно полностью отвечать потребностям конкретного растения. Такой раствор называется физиологически уравновешенным. Опытами установлено, что, когда в растворе преобладают какие-либо одни ионы над другими, создаются неблагоприятные условия для питания растений. Например, высокая концентрация кальция сдерживает поступление в растение калия. Такое явление наблюдается при известковании кислых почв и называется антагонизмом. Между анионами антагонизм проявляется слабее. Антагонизм сильнее между анионами, обладающими близкими химическими свойствами, например, между SO_4^{2-} , SeO_4^{2-} . Нет антагонизма между NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , но он возникает между анионами с одинаковыми зарядами, например, между NO_3^- и H_2PO_4^- , Cl^- и HPO_4^{2-} . Наряду с антагонизмом происходят процессы синергизма: ионы с противоположными зарядами могут активизировать поступление друг друга в растение, например, NH_4^+ и PO_4^{3-} , K^+ и SO_4^{2-} , Ca^{2+} и NO_3^- и т. д.

Большое значение для нормального питания растений имеет реакция почвенного раствора. Для большинства растений оптимальной реакцией почвы считается слабокислая и близкая к нейтральной, с pH солевой вытяжки 5,5–6,5. Однако есть растения, которые лучше растут на почвах с кислой (люпин) или слабощелочной (люцерна) реакцией среды. При повышенной кислотности почвенного раствора ухудшается развитие корневой системы, снижается поглощение питательных элементов, особенно кальция и магния, подавляется синтез белков и сахаров. При щелочной реакции затрудняется поступление анионов (например, фосфорной кислоты), но усиливается усвоение катионов.

Большую роль в питании растений играет корневая система. Она выделяет в почву угольную кислоту и некоторые органические кислоты, а также ферменты и другие вещества. Под влиянием корневых выделений элементы питания из труднодоступных соединений переходят в легкодоступную форму, в результате чего улучшается питание растений фосфором, калием, кальцием и другими элементами.

Влажность почвы также имеет большое значение для поступления питательных элементов в растение и его нормального развития. Прежде всего, вода является средой, в которой происходит диффузия ионов из почвенного раствора и почвенного поглощающего комплекса к корням растений. При оптимальном увлажнении увеличивается поступление питательных элементов в растение, при недостатке влаги – уменьшается. Избыточное увлажнение почвы отрицательно сказывается на развитии растений: усиливается поступление токсичных закисных соединений железа, марганца и уменьшается – кислорода. Вода необходима для фотосинтеза. Около 0,2 % поглощаемой растением воды расходуется на образование органических веществ, свыше 99 % ее испаряется при транспирации, при этом происходит охлаждение надземной части растения и передвижение питательных элементов по сосудам.

Важное значение в питании растений имеет воздушный режим (аэрация). Воздух необходим, прежде всего, для дыхания растений. При его недостатке нарушается питание растений. Для большинства сельскохозяйственных культур достаточным является содержание в почвенном воздухе 8–12 % кислорода. При уменьшении его содержания растения угнетаются, а при содержании менее 5 % – погибают. При недостатке кислорода в почве образуется больше восстановленных форм железа и других элементов, вредных для расте-

ний, увеличивается содержание углекислого газа, а это снижает поглощение корнями азота, фосфора и ионов аммония, а также деятельность аэробных микроорганизмов.

Воздушный режим почвы во многом определяется ее структурой, а также качеством обработки, придающей ей рыхлое состояние.

На питание растений большое влияние оказывает температура почвы. Корни растений при пониженной температуре плохо развиваются и слабо усваивают питательные элементы и воду. Поступление элементов питания усиливается с повышением температуры почвы от 10 до 25 °С. При понижении температуры ниже 10 °С снижается поступление в растение, прежде всего, азота и фосфора. Поэтому азотные подкормки озимых культур целесообразно проводить весной при достижении температуры 5–7 °С. Невысокая температура почвы меньше сказывается на поступлении калия в растения. С другой стороны, на поступление питательных элементов (например, фосфора) отрицательно влияет чрезмерно высокая температура, что, очевидно, обусловлено снижением активности ферментативных систем. Считается, что оптимальная температура для поступления в растения азота, фосфора и калия – 23–25 °С, критической для поступления основных элементов минерального питания является температура около 5–6 °С.

Интенсивность поглощения растением питательных элементов тесно связана с освещенностью. В процессе фотосинтеза растение усваивает солнечную энергию, это усиливает поглощение питательных элементов из почвы. Например, опытами установлено, что поглощение калия, кальция и фосфора растением в дневное время происходит в полтора-два раза интенсивнее, чем ночью. Даже усвоение корнями углекислого газа из почвы днем идет интенсивнее, чем в ночное время. Затенение растений в посевах, чрезмерное их загущение снижают интенсивность фотосинтеза и дыхания, а следовательно, урожайность.

В питании растений огромное значение имеют микроорганизмы, прежде всего те, которые поселяются на корнях или непосредственно около них, т. е. в ризосфере. Ризосферные микроорганизмы, используя в качестве пищи и энергетического материала выделения корней, вместе с другими почвенными микроорганизмами играют важную роль в превращении органического вещества почвы и органических удобрений в усвояемые растениями формы. Некоторые виды микроорганизмов способны также разлагать труднорастворимые минеральные соединения фосфора и калия, делая их доступными для растений. Кроме того, в почве есть бактерии (клубеньковые, свободноживущие, ризосферные), которые усваивают молекулярный азот воздуха, и он также становится доступным для растений. Наконец, с жизнедеятельностью микроорганизмов тесно связано образование гумуса.

Однако микроорганизмы могут и ухудшать условия питания растений, так как у них одни и те же источники питания – азот и зольные элементы почвы. Микроорганизмы становятся конкурентами растений в использовании питательных элементов. Например, при использовании соломы или плохо разложившегося соломистого навоза в качестве удобрения в почве создаются большие запасы энергетического материала (что очень благоприятно для бактерий), но мало азота. Из-за потребления азота микроорганизмами растения ощущают недостаток в нем, а иногда и в фосфоре. А в итоге урожайность культуры может снижаться. Правда, закрепление азота микроорганизмами носит временный характер: после их отмирания азот высвобождается и вновь становится доступным растениям.

В почве есть также бактерии-денитрификаторы, которые превращают нитраты (NO_3) в закисные формы (N_2O) и молекулярный азот (N_2), который улетучивается из почвы. Кроме того, некоторые почвенные микроорганизмы вызывают болезни растений.

Оптимальное фосфорное питание способствует развитию корневой системы растений, благодаря чему улучшается снабжение растений влагой и элементами питания. Фосфор способствует более экономному расходованию влаги, повышает устойчивость растений к засухам, низким температурам, улучшает перезимовку озимых культур, ускоряет созревание растений, увеличивает урожай и улучшает его качество.

Фосфор также стимулирует процессы оплодотворения, формирования плодов, вызревания вегетативных органов. Он является преимущественно элементом качества, существенно дополняя роль азота, который в большей степени влияет на размер урожая.

В отличие от стран Западной Европы, где достигнут оптимальный уровень содержания подвижного фосфора в почве и фосфорные удобрения вносятся только для компенсации его выноса с урожаями, в Беларуси необходимо на почвах, недостаточно окультуренных, вносить фосфорные удобрения не только для компенсации выноса, но и для увеличения его содержания в почве.

В настоящее время ощущается дефицит фосфорных удобрений, поэтому концепция их применения пересматривается в сторону снижения доз. Дозы рассчитываются исходя из более умеренных темпов увеличения содержания подвижного фосфора на недостаточно окультуренных почвах, чем это было раньше. В связи с аварией на Чернобыльской АЭС и радиоактивным загрязнением почв в ряде районов Беларуси дозы фосфорных удобрений дифференцируются в зависимости от плотности загрязнения почв.

Дозы фосфорных удобрений определяют с учетом уровня планируемой урожайности, биологических особенностей сельскохозяйственных культур, типа, гранулометрического состава и агрохимических свойств почвы, предшественников, сопутствующих удобрений. При допосевном внесении дозы фосфора колеблются от 30 до 90 кг/га д. в.; более высокие применяют под плодовые, овощные и технические культуры, средние – под картофель, кукурузу и кормовые культуры.

Урожайность зерновых культур от средних доз фосфорных удобрений возрастает на 2,5–4,0 ц/га, окупаемость 1 кг P_2O_5 составляет 4–6 кг зерна.

В условиях дефицита фосфорных удобрений внесение основных доз (30–40 кг/га д. в.) следует проводить только на пахотных землях с недостаточным содержанием P_2O_5 (менее 150 мг/кг почвы). На почвах с повышенным содержанием фосфора (150–250 мг/кг почвы) необходимо применять рядковое внесение фосфора под наиболее ценные культуры (озимую и яровую пшеницу, зернобобовые, рапс, лен, сахарную свеклу). На почвах с содержанием фосфора 250 мг/кг и более фосфорные удобрения можно временно (несколько лет) не применять. Такой подход позволит получить наиболее высокую окупаемость дорогих туков и не приведет к снижению достигнутого уровня содержания подвижного фосфора в почвах.

Хороший эффект дает внесение небольших доз фосфора во время сева. При посеве могут вноситься простой и аммонизированный, двойной суперфосфаты, аммофос, аммофосфат. Простой гранулированный суперфосфат вносится под зерновые культуры в дозе 10 кг/га P_2O_5 , а более концентрированные удобрения – 15–20 кг/га. Урожайность зерновых при рядковом внесении фосфора повышается на 2,5 ц/га, а оплата 1 кг фосфора урожаем примерно втрое выше, чем при основном разбросном внесении.

Непременным условием эффективного использования фосфорных удобрений является заделка их вспашкой или глубокой культивацией в корнеобитаемый слой почвы, так как они малоподвижны. Глубина вспашки под конкретную культуру определяет и глубину заделки.

Для почв с реакцией, близкой к нейтральной, срок внесения фосфорных удобрений не имеет существенного значения. На кислых почвах из-за перехода водорастворимых удобрений в труднодоступное для растений состояние нельзя допускать, чтобы они долго находились в почве без растений.

В год внесения из органических удобрений используется 25–30 % фосфора, из минеральных при основном внесении – лишь 15–20 %, за ротацию севооборота из органических – 40–50, из минеральных – 30–40 %.

Важным приемом повышения эффективности фосфорных удобрений является допосевное ленточное внесение. Как показали исследования кафедры агрохимии БГСХА, наиболее высокую прибавку дает ленточное внесение фосфора вместе с азотом, а еще лучше – всех трех главных элементов питания. При ленточном внесении фосфорных удобрений

коэффициенты использования фосфора растениями увеличиваются на 7–10 % по сравнению с разбросным. При локальном внесении основного удобрения дозы минеральных удобрений можно снижать на 30 %.

Внесение фосфорных удобрений в запас, на два-три года, является экономичным приемом, но его можно применять лишь на почвах, где не выражена фиксация фосфора в труднорастворимых для растений формах. Прежде всего, в запас эффективно внесение фосфорных удобрений под многолетние травы, высеваемые под покров, под плодовые и ягодные культуры. Однако этот способ целесообразно использовать только при наличии достаточного количества удобрений.

Подкормки фосфорными удобрениями применяются для многолетних трав, а также при междурядной обработке пропашных культур, но лишь если они по какой-либо причине не были внесены в основное удобрение.

Важно правильно выбрать форму удобрений исходя из почвенных условий и возделываемой культуры. На почвах, слабокислых или близких к нейтральным, с низким содержанием подвижного фосфора предпочтительнее легкорастворимые фосфорные удобрения. На почвах, достаточно обеспеченных подвижным фосфором, а также при выращивании культур, интенсивно его использующих из труднорастворимых соединений, формы удобрений не имеют большого значения.