

## Г л а в а 6. ФОСФОРНЫЕ УДОБРЕНИЯ

### 6.1. ФОСФОР И ЕГО РОЛЬ В ПИТАНИИ РАСТЕНИЙ

Фосфор — один из трех главных элементов питания растений. По объемам использования в качестве удобрительного элемента он идет вслед за азотом. Это важнейший биогенный элемент, необходимый 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 назвали "ключом жизни".

По некоторым литературным данным, способ получения фосфорной кислоты был известен арабским алхимикам уже в XII в. Но общепризнанной датой открытия фосфора считается 1669 г., когда немецкий аптекарь Х. Брандт, как и другие алхимики Западной Европы, искал заветный "философский камень" и при прокаливании с песком сухого остатка от выпаривания мочи и последующей перетонке его без доступа воздуха получил "удивительное" светящееся в темноте вещество, свет которого не обжигал. В 1777 г. французский химик А. Лавуазье установил, что открытое Х. Брандтом вещество представляет собой новый элемент, названный позже фосфором (от греческого *phos* — "свет", *phoros* — "несущий свет", "светоносен").

Фосфор образует несколько аллотропных форм: белый, красный и черный фосфор. При определенных условиях все три формы могут переходить друг в друга. Наибольшей химической активностью обладает белый фосфор. Красный фосфор используется в спичечном производстве. Однако красный элементарный фосфор перективен в качестве удобрения. При добавлении к нему солей меди он окисляется в почве и переходит в доступное состояние. Фосфор содержится в растениях в *органических* (обычно до 90% общего количества) и *минеральных соединениях*. Соотношение органических и минеральных соединений фосфора зависит от возраста растений и общей обеспеченности их фосфором.

В молодых растениях доля органического фосфора всегда значительно больше, чем в старых. Однако при обильном обеспечении почв фосфором доля неорганических фосфатов в более старых листьях может оказаться даже выше. В репродуктивных органах фосфора концентрируется в 3-6 раз больше, чем в вегетативных. Семена должны иметь запас фосфора, достаточный на период формирования корней, которые начнут поглощать его из почвы.

Фосфор играет исключительно важную роль в жизнедеятельности растений. Он содержится в *клеточной протоплазме*, входит в состав *хромосом, нуклеиновых кислот, фосфолипидов*, некоторых *витаминов, ферментов, эфиров, фитина*, других органических веществ и принимает активное участие в образовании *белковых веществ*. В процессах дыхания и брожения одну из центральных функций выполняет фосфорная кислота, являющаяся буфером при регуляции обмена углеводов.

Частично в живых клетках фосфор присутствует в виде орто- и пирофосфорных кислот и их производных. Фосфатная группа обладает важными связывающими свойствами и способна принимать участие в сильных (электростатических) связывающих взаимодействиях с катионами металлов и аминов. Фосфор легко образует ряд ковалентных соединений — от *простых эфиров* (триметил- или триэтилфосфат) до сложных макромолекул *дезоксирибонуклеиновой (ДНК) и рибонуклеиновой (РНК) кислот*, которые являются составной частью биологических регуляторных молекул. Фосфор является обязательным компонентом ряда коферментных систем, катализирующих ряд реакций азотного обмена.

Важными органическими фосфорсодержащими соединениями в растениях являются *нуклеиновые кислоты*, играющие большую роль в наследственной функции организма. Это сложные высокомолекулярные вещества, состоящие из азотистых оснований, молекул углеводов (рибозы или дезоксирибозы) и фосфорной кислоты. В растениях на долю нуклеиновых кислот приходится от 0,1 до 1%, а на долю фосфора в нуклеиновых кислотах (в пересчете на  $P_2O_5$ ) около 20%. Высоким содержанием нуклеиновых кислот отличаются зародыши семян, пыльца, кончики корней.

Нуклеиновые кислоты участвуют в синтезе белков, процессах роста и размножения, передаче наследственных свойств, влияют на процессы дыхания, образования ряда

ферментов. РНК играет роль "матрицы", на которую последовательно укладываются молекулы аминокислот, образующие специфический для данного организма белок. ДНК, входящая в состав хромосомного аппарата ядра, ответственна за передачу наследственных свойств и накопленной биологической информации, благодаря которой в определенном порядке и последовательности соединяются аминокислоты, образующие различные белки.

Огромную роль в обмене веществ играют макроэргические соединения, содержащие богатые энергией связи. Известно множество макроэргических соединений и в большинстве из них входит фосфор. Среди них особое место занимает *аденозинтрифосфорная кислота* (АТФ) — своеобразный хранитель и носитель энергии во многих синтетических процессах. При гидролизе АТФ, входящей в состав РНК, высвобождается около 55 кДж/моль, в то время как гидролиз обычных связей дает 8–12 кДж/моль. Макроэргические фосфатные связи принимают участие в процессах фотосинтеза, дыхания, биосинтеза белков, жиров, крахмала, сахарозы, ряда аминокислот, других соединений. Соединения фосфора с белковыми веществами — фосфоропротеиды — катализируют течение биохимических реакций.

*Сахарофосфаты-эфиры* — производные простых сахаров и фосфорной кислоты — вследствие своей мобильности играют большую роль в процессах фотосинтеза, дыхания. Их содержание изменяется в зависимости от возраста растений, условий питания и других факторов от 0,1 до 1% от сухой массы.

При участии фосфора происходит *углеводный обмен* в растениях. Превращение углеводов начинается с присоединения фосфорной кислоты к молекулам углеводов или с ее отщепления, т.е. с процессов *фосфорилирования* и *дефосфорилирования*. Самый распространенный фосфорный эфир — глюкозо-6-фосфат. Он синтезируется в растениях путем переноса фосфорной кислоты с АТФ на глюкозу. Одновременно при этом образуется АДФ.

Фосфорилированные сахара играют важную роль в процессах дыхания и гликолиза (окисления углеводов до ширвоисградной кислоты). Фосфорилирование происходит уже в самом начале фотосинтеза, как только на листья попадает свет. Принципиальное значение имеет перенос световой энергии в химическую путем образования АТФ в световой реакции фотосинтеза.

Фосфорная кислота принимает активное участие в *биосинтезе сахарозы, в ферментативных превращениях форм углеводов, переработке углеводов* (в клубни картофеля, корни сахарной свеклы и т.д.). В связи с этим фосфорные удобрения положительно влияют на накопление в растениях крахмала, сахаров, других углеводов. Фосфор также благоприятствует накоплению в плодах красящих и ароматических веществ, улучшает их лежкость.

Важную биологическую роль выполняют в растениях *фосфатиды*, или *фосфолипиды*. Это сложные эфиры глицерина, жирных кислот и фосфорной кислоты. Они входят в состав фосфолипидных мембран, которые регулируют проницаемость клеток органов и плазмолеммы для различных веществ. Более богаты фосфатидами семена бобовых и масличных культур.

Представителем группы жироподобных веществ фосфатидов является лецитин — производное диглицеридфосфорной кислоты. Лецитин встречается в цитоплазме всех деятельных клеток, но накапливается преимущественно в семенах.

Фитин — производная циклического соединения шестигатомного спирта инозита — является кальцийсодержащей солью инзитфосфорной кислоты. Он содержится во всех частях и тканях растений, но откладывается главным образом в семенах и используется как источник фосфора при прорастании семян. По данным Т. Н. Кулаковской, в зерне пшеницы и сене клевера преобладают органические соединения фосфора, прежде всего фитин (табл. 6.1).

6.1. Содержание фосфорнокислых соединений в пшенице и клевере, % Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> к сухому веществу

Соединения	Пшеница	
	(зерно)	(сено)
Органические	0,711	0,484
В том числе:		
лецитин	0,032	0,050
фитин	0,609	0,300
нуклеопротеиды	0,130	0,050
прочие	—	0,084
Минеральные	0,089	0,070
Общее содержание фосфора	0,860	0,554
Удельный вес в общем количестве:		
фосфора органических соединений	89,6	87,0
фосфора минеральных соединений	10,4	13,0

Особенно чувствительны растения к недостатку фосфора в начальных фазах роста и развития, когда корневая система еще недостаточно развилась. Большие запасы фосфора в семенах способствуют хорошему росту растений в первый период жизни за счет распада веществ семени и передвижению продуктов распада в растущие части. Оптимальное фосфорное питание способствует развитию корневой системы: корни глубже проникают в почву и больше ветвятся, благодаря чему улучшается снабжение растений влагой и питательными веществами. Фосфор способствует более экономному расходованию влаги, что особенно важно в засушливые периоды. Хорошее фосфорное питание улучшает перезимовку озимых культур, благодаря достаточному накоплению сахаров в узлах кущения с осени.

Отрицательные последствия недостатка фосфора в ранний период не могут быть исправлены впоследствии даже при обильном фосфорном питании. Растения остаются низкорослыми, замедляется их развитие, они позднее цветут и созревают. Это связано с тем, что клетки не могут делиться, если фосфора или других элементов недостаточно для образования дополнительного ядра. Таким образом, в отличие от растений, испытывающих недостаток азота и имеющих поэтому "сокращенный" пик развития, растения при недостатке фосфора "физиологически более молоды".

Во время образования и, особенно, созревания репродуктивных органов у всех культур происходит передвижение фосфора из вегетативных органов в репродуктивные. Достаточное снабжение растений фосфором в период формирования репродуктивных органов ускоряет образование и созревание последних. Так, при достаточном обеспечении фосфором на протяжении вегетационного периода зерновые созревали на 5-6 дней раньше, чем испытывавшие его дефицит. При нормальном фосфорном питании изменяется структура урожая в сторону увеличения наиболее ценной репродуктивной части: у зерновых культур возрастает доля зерна в массе биологического урожая, у корнеплодов — корней и т.д.

Большую роль в жизни растений играют минеральные соединения фосфора: *кальцийевые, магниевые, калийные, аммониевые и другие соли ортофосфорной кислоты*. Минеральный фосфор является не только резервом для синтеза органических фосфорсодержащих соединений, но и

повышает буферность клеточного сока, поддерживает тургор и другие жизненно важные процессы в клетке. Усиленная способность растительных клеток удерживать воду, фосфор тем самым повышает устойчивость растений к засухам и низким температурам.

Уровень снабжения растений фосфором зависит не только от его содержания в почве, но и от обеспеченности почвы другими элементами. Так, при недостатке цинка снижается поступление и использование растениями фосфора; высокое содержание в почве меди, наоборот, снижает потребность растений в фосфоре.

Фосфор ослабляет вредное влияние на растения подвижного алюминия на кислых почвах. Подвижные формы алюминия отрицательно влияют на обмен веществ, подавляют образование фосфатидов, тормозят превращение моносахаридов в сахарозу и более сложные органические соединения, задерживают образование белков. Фосфор, связывая подвижный алюминий почвой, фиксирует его в корневой системе, тем самым улучшается углеродный и азотистый обмен в растениях.

Фосфор легко передвигается внутри растения и из более старых листьев и тканей может поступать к зонам роста, т.е. реутилизируется (использоваться повторно). Внешними признаками недостатка фосфора являются скручивание краев листьев, их более темная, грязно-зеленая окраска. Это связано с тем, что рост листьев при недостатке хлорофилла задерживается сильнее, чем образование хлорофилла. Однако при избытке азота растения также имеют темно-зеленую окраску из-за большого содержания хлорофилла. При недостатке фосфора, кроме того, вследствие образования антоциана нередко появляются красные, фиолетовые тона, прежде всего на основных стеблях, влагалищах листьев и черенках. Сильнее признаки недостатка фосфора проявляются у старых и нижних листьев.

Избыток фосфора также неблагоприятен для растений. В этом случае они содержат много фосфора в минеральной форме, особенно в вегетативных органах, преждевременно созревают и не успевают синтезировать хороший урожай. При избытке фосфора ухудшается питание цинком, что приводит к заболеванию плодовых культур розеточностью.

Существует тесная связь между азотным и фосфорным питанием. Фосфор выступает в роли спутника азота

и белковых соединений, в растениях его содержится в два-три раза меньше, чем азота. При недостатке фосфора замедляется синтез белков, накапливается больше нитратов. Поэтому дозы азотных и фосфорных удобрений должны быть сбалансированными, особенно при внесении высоких доз азота.

Большое значение имеет фосфор в жизни человека и для сельскохозяйственных животных. Он входит в состав костной ткани и незаменим в процессах, от которых зависят основные жизненные функции (обмен веществ, размножение и т.д.). При недостатке фосфора у человека и животных развивается остеопороз и другие заболевания костей. Суточная потребность человека в фосфоре — 1–1,5 г. Существует достоверная связь между содержанием фосфора в кормах и продуктивностью животных. При этом введение в рацион скота кормовых фосфатов не может полностью компенсировать дефицит фосфора. Он должен в достатке содержаться в натуральных кормах, а значит, и в почве под посевами кормовых культур. Оптимальное содержание фосфора в кормах — 0,35–0,5% сухого вещества.

## 6.2. ИСТОЧНИКИ ФОСФОРНОГО ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ

Основной источник фосфора для растений в природе — *соли ортофосфорной кислоты*. Из *солей полифосфорных кислот* фосфор может быть использован *после их гидролиза*. Будучи трехосновной, ортофосфорная кислота может диссоциироваться на три аниона:  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  и  $\text{PO}_4^{3-}$ . Преобладание в почвенном растворе той или иной модификации иона ортофосфорной кислоты зависит от степени кислотности почвы. При слабокислой или близкой к нейтральной реакции присутствует главным образом анион  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , меньше  $\text{HPO}_4^{2-}$ , при слабощелочной (рН выше 7) доминирует  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Ион  $\text{PO}_4^{3-}$ , как и молекула  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , не имеет существенного значения для питания растений, так как ион существует в сильнощелочной среде, а  $\text{H}_3\text{PO}_4$  — в сильнокислой.

Доступность растениям различных солей ортофосфорной кислоты зависит от степени их растворимости. Хорошо растворимы в воде соли фосфорной кислоты с одновалентными катионами калия, натрия, аммония  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  и

$\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ . Двухвалентные соли кальция и магния  $\text{CaHPO}_4$  и  $\text{MgHPO}_4$  в воде нерастворимы, но растворяются в слабых кислотах, в том числе органических. Благодаря кислой реакции и корневым выделениям они также являются важным источником фосфорного питания растений. *Фосфор труднорастворимых трехвалентных фосфатов кальция* и более сложных по составу и еще менее растворимых фосфатов *недоступен для большинства растений*.

Однако существует группа культур, способных усваивать его из таких труднорастворимых соединений. Это люпин, гречиха, горчица, а также горох, донник, эспарлет и конопля, которые, хотя и в меньшей степени, чем первые три, но все же усваивают фосфор из фосфоритов. Своей способностью усваивать фосфор из труднорастворимых фосфатов эти культуры обязаны прежде всего кислым корневым выделениям.

Исследованиями Н. М. Глазуновой с использованием анионитов показано, что находящиеся в почве *обменно-адсорбированные фосфат-ионы активно участвуют в питании растений*. В ходе ионного обмена фосфат-ионы могут переходить в почвенный раствор и составлять часть запаса доступного фосфора почвы. Несмотря на то, что адсорбированные фосфат-ионы удерживаются положитель-но заряженными участками поглощающего комплекса более прочно, чем катионы, они доступнее, чем фосфор апатита, стрептита, варисцита и других минералов.

Французский ученый А. Демолон пришел к выводу, что оптимальная для растений концентрация  $\text{P}_2\text{O}_5$  в почвенном растворе — 1,2 мг/л. Однако обычно она значительно ниже (0,05–1 мг/л), и поэтому необходимо внесение фосфорных удобрений.

М. К. Домонтович установил, что минимальная концентрация  $\text{P}_2\text{O}_5$  для кукурузы, пшеницы, овса, гороха, горчицы и гречихи, при которой растения могли его усваивать, составляла 0,01–0,03 мг/л.

По данным немецкого ученого В. Матцеля, корни могут поглощать фосфор, находящийся в состоянии не более чем 2 мм от них, и даже в период максимального развития корневой системы растения используют фосфор примерно только из четверти всего объема пахотного слоя.

### 6.3. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМЫ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА В ПОЧВАХ

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 торфяно-болотных почвах — от 0,29 до 0,67%, а в пойменных низинных иногда достигает 1,7%. В исследованиях кафедры агрохимии ВСХА 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. Кузнецкой, в минеральных почвах доля органических фосфатов в валовом фосфоре колеблется от 16 до 48% и увеличивается от легких почв к тяжелым. В низинных торфяно-болотных почвах органические фосфаты преобладают над минеральными, их удельный вес достигает 70%.

*Органические фосфаты* в почве представлены различными по природе группами соединений: *индивидуальной природы* (специфические органофосфаты) и *гумусобразованная* (специфические соединения). Специфические

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 кофакторы, соединения фосфатов с жирными и аминокислотами и другие соединения.

По новейшим данным многих авторов, больше подвижны фосфорорганические 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 ВСХА показали, что в гумусе дерново-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 Метя: почва после дождя тщательно 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 Лисдала, фосфорорганические соединения представлены неустойчивыми легкоминерализующимися формами.

По данным Л. Г. Шарифа, 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 Д. М. Томпсона говорят о том, что фракция легко минерализуемого 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 возникнуть негативные односторонние процессы минерализации, ухудшающие плодородие почвы.

Длительное внесение удобрений, особенно органических, увеличивает содержание органических фосфатов, но в меньшей степени, чем минеральных. Особенности процесса минерализации органических фосфатов почвы являются 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 почвенно- → Лабильные фос- → Стабильные фос-  
го раствора (фактор ин- ← фаты (фактор ем- ← фаты  
тенсивности) кости)

*Ортофосфаты почвенного раствора* — это однокатионные 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 используют водные и солевые вытяжки из почвы.

*Лабильные фосфаты* — это фосфаты, освещенные 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 отли-

чие от первичных минералов вторичные фосфаты являются активной мобильной составной частью почвы. К ним относятся дигидратдигидрофосфат ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), октакальцийфосфат ( $\text{Ca}_8(\text{PO}_4)_3\text{Zn}_2\text{O}$ , одно- и двукратно фосфаты железа. При нарушении фосфатного равновесия твердой и жидкой частей почвы эти фосфаты могут переходить в почвенный раствор. Фосфаты второй группы характеризуют *залежи 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, анкинообменные смолы, радиоизотопный метод и другие.

*Стабильные фосфаты* — труднорастворимые соединения, заключенные в почве в первичных и вторичных минералах (окисленные гидраты титратами полтораоксид, карбонатами и другими). Наиболее устойчивой формой, медленно поддающейся химическому и биологическому воздействию, является фосфор в составе кристаллической решетки первичных минералов почвы: апатитов, фосфоритов, варисцитов ( $\text{AlPO}_4$ ), стрентитов ( $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), виванитов ( $[\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$  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 +  $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  → органическое вещество → вторичные минералы + растворимые соли. К вторичным минералам, сформировавшимся в результате выветривания, имеющим в основном размеры илестых частиц, относятся разновидности биогитов (силикатные илестые минералы, монтмориллонит, каолинит и др.) и слабо растворимые оксиды алюминия, железа и кремния. Фосфор в составе вторич-



ных минералов удерживается в результате ионных, координационных и адсорбционных связей.

#### 6.4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОРМ ФОСФОРА В ПОЧВЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТРЕБНОСТИ В ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЯХ

Для определения степени подвижности фосфатов в почве ("фактора интенсивности") широко применяется метод Карпинского — Замятиной и метод Скофилда. По методу Карпинского и Замятиной концентрация ортофосфата определяется в вытяжке 0,015 М  $K_2SO_4$ , а по методу Скофилда — в вытяжке 0,01 М  $CaCl_2$  при соотношении почвы и растворителя 1:5. Интенсивность фосфатов может быть выражена концентрацией фосфора в водных или солевых вытяжках ( $P_2O_5$ , мг/л), концентрацией отдельных фосфат-ионов ( $H_2PO_4^-$ ,  $HPO_4^{2-}$ ) и активностью отдельных фосфат-ионов ( $a_{H_2PO_4}$ ,  $a_{HPO_4}$ , моль/л).

Р. К. Скофилд, а затем И. С. Вудруфф впервые предложили использовать фосфатный потенциал в качестве показателя доступности фосфора растениям. Они высказали гипотезу, что состояние почвенного фосфора определяется соотношениями химическими потенциалами и их уменьшением при поглощении растениями, в результате ретроградации, при потерях и т.д. Фосфатный потенциал (ФП) — суммарная активность ионов кальция и отдельных фосфат-ионов в логарифмической форме:

$$ФП = 0,5rCa + (pH_2PO_4 + 0,5rHPO_4),$$

где  $r$  — знак отрицательного логарифма.

Чем меньше фосфатный потенциал, тем легче переходит фосфор в почвенный раствор, тем более благоприятны условия фосфорного питания растений.

Выбор того или иного показателя для характеристики "фактора интенсивности" зависит от целей и задач исследования. Как показали опыты, наиболее достоверную корреляцию со степенью обеспеченности почв фосфором, доступным растениям, показывает общая концентрация его в слабосолевых и водных вытяжках. К тому же определение фосфатного потенциала более трудоемко.

Для определения степени подвижности фосфатов в последнее время более широко используется вытяжка 0,01 М  $CaCl_2$  (метод Скофилда). И. М. Богдевич и В. В. Барашен-

ко считают, что концентрацию  $P_2O_5$  в 0,01 М  $CaCl_2$  вытяжке можно использовать в качестве дополнительного теста оценки фосфатного режима почв Беларуси. По их данным, наиболее высокие урожаи зерновых и клевера формируются в сравнительно узком интервале концентрации  $P_2O_5$  в 0,01 М  $CaCl_2$  — 0,2—0,4 мг/л.

В Беларуси для определения запаса подвижных фосфатов ("фактора емкости") используют метод Кирсанова, в соответствии с которым фосфор из почвы извлекается 0,2 М  $HCl$  при отношении почвы и раствора для минеральных почв 1:5, торфяно-болотных — 1:50 при температуре  $18 \pm 3^\circ C$ , так как на количество извлекаемого фосфора влияет температура. Информацией о содержании подвижного фосфора в почве располагают все хозяйства республики и исходя из этого рассчитывают дозы фосфорных удобрений. Группировка почв по обеспеченности подвижным фосфором, определенным методом Кирсанова, приведена в табл. 6.2.

6.2. Группировка почв Беларуси по содержанию подвижного фосфора (по Кирсанову)

Группы по содержанию $P_2O_5$	Содержание $P_2O_5$		
	мг/кг почвы	торфяно-болотной	к/га на 1 га в переотной торфяной (25 см) минеральной почве
I (очень низкое)	Менее 60	Менее 200	Менее 200
II (низкое)	61-100	210-400	201-300
III (среднее)	101-150	410-600	301-500
IV (повышенное)	151-250	610-1000	501-900
V (высокое)	151-400	1010-1600	901-1300
VI (очень высокое, избыточное)	Более 400	Более 1600	Более 1300

Некоторые почвы содержат много кислотнорастворимого фосфора, который искажает показатель обеспеченности почв фосфатами, если применять метод Кирсанова. В этом случае лучше использовать методы со слабосолевыми вытяжками.

Исследования кафедры агрохимии БСХА показали, что метод Кирсанова непримоден и для слабо-, средне- и сильноэродированных легкосуглинистых почв, развивающихся на мощных лёссах, так как дает результаты большие, чем истинное содержание доступного для растений фос-

фора. Это связано с тем, что верхний перегнойный горизонт смыывается и пахотный горизонт формируется с включением подзолистого и илтовоглинистого.

Метод Кирсанова является стандартным для определения подвижного фосфора только в пахотном горизонте дерново-подзолистых почв и его нельзя использовать для характеристики нижних горизонтов. Исследованиями Д. М. Хейфец было показано, что фосфаты подпахотных горизонтов менее доступны растениям, чем пахотного. Для подпахотных горизонтов неародированных дерново-подзолистых почв и эродированных сулгинистых, развивающихся на лесах, по всему профилю для оценки содержания усвояемых фосфатов лучше использовать не кислотные, а слабосолевые вытяжки (методы Скофилда или Карпинского — Заматиной).

По данным восьмого тура агрохимического обследования почв Беларуси, содержание подвижного фосфора на пашне на 1998 г. в среднем по республике составило 188 мг/кг почвы. Оптимальное содержание подвижных форм фосфора в почвах разного гранулометрического состава с учетом типов севооборотов приведено в табл. 6.3.

6.3. Оптимальные уровни содержания подвижных форм фосфора ( $P_2O_5$ ) в почвах Беларуси для разных севооборотов, мг/кг почвы

Почвы	Севообороты	
	с преобладанием зерновых многолетних и однолетних трав	с кормоплодами, овощами
Дерново-подзолистые:		
сулгинистые и глинистые	250–300	250–350
супесчаные	150–250	200–300
песчаные	100–150	150–200
Торфяно-болотные (многолетние травы)	500–800	—
Минеральные почвы севокосов и пастбищ	120–200	—

В настоящее время оптимальный уровень подвижных форм фосфора в республике имеет 26,8% сулгинистых, 27,6% супесчаных, 29,0% — песчаных и 11% торфяно-болотных почв. Однако даже на пахотных угодьях еще велика доля почв, слабообеспеченных фосфором (менее 100 мг/кг). Это 21,4%

сулгинистых и глинистых, 19,4% — супесчаных, 18,2% — песчаных и 45,9% торфяно-болотных почв. На луговых угодьях почв, бедных фосфатами, более 60%. В то же время появились почвы с содержанием подвижного фосфора более 400 мг/кг, на которых внесение фосфорных удобрений неэффективно. Внесение фосфора выше оптимальных значений приводит только к непроизводительным затратам. Таким образом, для повышения плодородия почв и рационального использования фосфорных удобрений нужно оптимизация фосфорного питания растений, внесение указанных удобрений с учетом содержания фосфора в почвах.

Для прогноза эффективности фосфорных удобрений используются также методы определения емкости поглощения фосфатов почвами, фосфатной буферной способностью и др.

Известно, что фосфор из почвенного раствора, растения тем самым уменьшают его концентрацию. Однако почвы могут поддерживать концентрацию фосфора в растворе на относительно стабильном уровне. Это зависит от запаса растворимых фосфатов на поверхности почвы и скорости растворения фосфорсодержащих минералов почвы. Способность почвы поддерживать концентрацию фосфатов на постоянном уровне С. М. Драчев назвал фосфатной буферной способностью.

Впоследствии П. Бекетт и Р. Уайт ввели понятие потенциальной буферной способности в отношении фосфатов (ПБС) как способности почвы противостоять изменению фосфатного потенциала.  $ПБС = G/d$ , где  $G$  — общий запас подвижных фосфатов почвы ("фактор емкости");  $d$  — равновесная активность  $H_2PO_4^-$ , или равновесный фосфатный потенциал почв ("фактор интенсивности"). Отношение  $G/d$  показывает, какое количество подвижных фосфатов должно или перейти из общего запаса в почвенный раствор, или быть внесено в почву для изменения активности  $H_2PO_4^-$  на единицу. Этот показатель учитывает не только общее содержание подвижных фосфатов, но и степень их подвижности и поэтому более полно характеризует фосфатный режим почв, чем фосфатный потенциал. Правда, этот метод из-за трудоемкости широкого распространения не получил.

Разделить формы почвенных фосфатов и установить их роль в питании растений очень сложно из-за большого разнообразия минеральных соединений фосфора. Ни один



из существующих методов определения состава минеральных фосфатов не позволяет строго выделить отдельные соединения фосфора.

Все фосфаты отличаются растворимостью и отношением к гидролитическому распаду, большинство из них труднорастворимые соединения. Выделение различных форм фосфатов основано на их разной растворимости. Наиболее распространенные получили методы Чирикова, Чанга — Джексона, Тинабури — Лебедевой. Более совершенен из них последний, но он используется только для минеральных почв.

По методу Тинабури — Лебедевой навеску почвы после предварительной обработки различными растворителями, постепенно выделяя фракции с различной степенью растворимости. Фракции распределяются в следующей последовательности: фракция  $\text{Ca-P}_I$  — легкорастворимые фосфаты кальция, магния и закисного железа; фракция  $\text{Ca-P}_{II}$  — равноосновные фосфаты кальция и магния, преимущественно вторичнообразованные типа октакальций-фосфатов и др.; фракция  $\text{Al-P}$  (типа варисита, диферита и др.); фракция  $\text{Fe-P}$  (типа стрентита, диферита и др.); фракция  $\text{Ca-P}_{III}$  — высокоосновные труднорастворимые фосфаты кальция типа фосфорита и апатита (природные и вторичнообразованные).

Исследования кафедры агрохимии ВСХА показали, что в слабо- и среднебульварных дерново-подзолистых суперлистных, супесчаных и песчаных почвах фосфатов полторных окислов содержится в несколько раз больше, чем фосфатов кальция (табл. 6.4). Причем в дерново-подзолистых суперлистных и супесчаных почвах фосфатов железа больше, чем фосфатов алюминия, а в песчаных почвах, наоборот, больше фосфатов алюминия. По мере окультуривания почвы в ней существенно возрастает количество доступных растениям фосфатов кальция фракций  $\text{Ca-P}_I$  и  $\text{Ca-P}_{II}$ .

6.4. Величины фосфорных удобрений на формы фосфора в дерново-подзолистых почвах, мг/кг почвы

Внесено на 1 га севооборота	$P_{\text{мн}}$	$P_{\text{оп}}$	$P_{\text{О.В.}}$ 0,2 М НСl	$P_{\text{мн}}$ по Тинабури — Лебедевой				
				$\text{Ca-P}_I$	$\text{Ca-P}_{II}$	$\text{Al-P}$	$\text{Fe-P}$	$\text{Ca-P}_{III}$
								Всего

Легкоусвояемые почвы  
Ивановский стационарный опыт, Горький район  
Московской области (картофель)

1. Без удобрения	1200	572	80	34	18	80	134	120	386
2. $N_{60} P_{60} K_{45}$	1381	621	150	45	27	108	146	125	451

Внесено на 1 га севооборота	$P_{\text{мн}}$	$P_{\text{оп}}$	$P_{\text{О.В.}}$ 0,2 М НСl	$P_{\text{мн}}$ по Тинабури — Лебедевой				
				$\text{Ca-P}_I$	$\text{Ca-P}_{II}$	$\text{Al-P}$	$\text{Fe-P}$	$\text{Ca-P}_{III}$
								Всего

3. Навоз 6 т/га + $N_{25} P_{35} K_{45}$ (эквивалентно варианту 2)	1402	655	170	54	39	110	152	204	480
--	------	-----	-----	----	----	-----	-----	-----	-----

Супесчаные почвы

Ширинский стационарный опыт, Гродненская область (озимая рожь)

1. Без удобрения	640	246	67	20	16	77	116	92	321
2. $N_{35} P_{35} K_{35}$ + навоз 810	294	185	51	34	110	124	102	422	10 т
3. $N_{65} P_{15} K_{95}$ (эквивалентно варианту 2)	820	280	191	40	30	127	133	107	457
4. $N_{35} P_{35} K_{35}$ + навоз 20 т	870	305	222	54	34	114	133	116	451

Песчаные почвы

Стационарный опыт колхоза "Путь к коммунизму" Пензенского района  
Березинской области (ячмень)

1. Без удобрения	560	180	152	38	36	85	46	27	232
2. $N_{60} P_{60} K_{60}$	693	185	224	48	50	200	73	36	407

## 6.5. СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

В отличие от азота, запасы которого можно считать неограниченными, так как он содержится в атмосфере, запасы фосфатного сырья ограничены. Сырьевой базой фосфатно-туковой промышленности являются природные залежи фосфорных руд — апатиты и фосфориты. Крупные залежи фосфоритов разведаны в США и Северной Африке. Запасы фосфоритов в США оцениваются в 10,5 млрд. т, Марокко — 9 млрд. т. Из стран СНГ наибольшими запасами фосфатного сырья обладают Россия и Казахстан. Самое крупное месторождение апатитов находится в России в горных отрогах Хибинских гор Кольского полуострова. Их запасы оцениваются в 640 млн. т. Хибинские апатиты залегают в виде апатито-нефелиновой породы.

Апатит является основным источником фосфора магматического происхождения в земной коре. Эмпирически-

кая формула апатита  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  или  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{x}(\text{CaF}_2, \text{Cl})_2$  (в зависимости от преобладания фтора или хлора различают фторапатит и хлорапатит). Нефелин — алюмосиликат состава  $(\text{K}, \text{Na})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + n\text{SiO}_2$ .

Апатиты Хибин представлены в основном фторапатитом. Однако апатито-нефелиновая порода неоднородна: в верхнем горизонте она содержит 28,5%, в среднем — 19,2% и в нижнем — 7–15%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Отсортировочная и размолотая товарная руда подвергается обогащению методом флотации — разделением в водном потоке руды на апатит и нефелин. Тонкоизмельченную руду взмучивают в воде, добавляя реагент — олеиновую кислоту с керосином и растворяют стеклом (1 кг на 1 т породы). При интенсивном продувании воздуха через пульпу частицы апатита всплывают наверх в виде пены и сливаются, а нефелин остается внизу и уносится потоком воды. Обогащенный таким образом апатитовый концентрат содержит 39–40%  $\text{P}_2\text{O}_5$  и считается лучшим в мире сырьем для производства фосфорных удобрений. Из-за плохой растворимости апатитовый концентрат непосредственно в качестве удобрения не применяется. Нефелин также используется в народном хозяйстве. На кислых почвах его можно применять как калийное удобрение.

В отличие от апатитов фосфориты являются не магматическими, а осадочными породами. Состав фосфоритов зависит от их происхождения и условий образования. Фосфориты — это сложные соединения апатитовой структуры —  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$  (фторапатит),  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$  (гидроксипатит),  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3$  (карбонапатит). Помимо этих соединений в фосфоритах имеются примеси: углекислая известь, песок, глина, полутонные окислы железа и алюминия и др. В зависимости от количества примесей содержание фосфорной кислоты в фосфоритах может колебаться в широких пределах — от 15 до 35%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Фосфориты бываю желваковые — в виде окатанных камней, и пластовые, представляющие собой слитную массу. Более распространены желваковые фосфориты.

Залежи фосфоритов (130 млн. т) в Беларуси находятся в Могилевской и Брестской областях, но они не имеют промышленного значения. Фосфатное сырье поступает к нам из России.

В России наиболее крупными месторождениями фосфоритов являются Егорьевское (Московская область), Кингисеппское (Ленинградская область), Вятско-Камское (Ки-

ровская область), Шигровское (Курская область), Брянское. Намечается разработка бедных апатитовых руд Ошурковского месторождения (Бурятия) с доведением содержания  $\text{P}_2\text{O}_5$  в концентрате до 35%. Большие залежи фосфоритов имеются в Эстонии, на Украине, в Казахстане (Каратау и Чилисайское месторождение). Из фосфоритов Каратау получают сырье, содержащее не менее 24–28%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Чилисайского месторождения — 23–24%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Выведение в переработку в последние годы менее богатых и качественных фосфатов усложняет и удорожает производство фосфорных удобрений.

Западноевропейские страны не располагают сколько-нибудь значимыми ресурсами фосфатного сырья. Поэтому промышленность фосфорных удобрений этих стран импортирует фосфаты, главным образом из Северной Африки и США.

## 6.6. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ, СОСТАВ И СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

Фосфорные и фосфорсодержащие комплексные удобрения по растворимости и усвояемости делятся на три группы: *воднорастворимые*; *цитратно-лимоннорастворимые*; *труднорастворимые*.

**Воднорастворимые** удобрения наиболее легко усваиваются растениями. К ним относятся *простой и двойной суперфосфат* и комплексные удобрения: *аммофос*, *диаммонийфосфат*, *нитроаммофоска*, *карбамидфоска*, *кристаллин* и др.

Ко второй группе удобрений относятся *растворимые в щелочном цитратном растворе*, *2%-ной лимонной кислоты*, *растворе трилона Б*, *2%-ной муравьиной кислоты* и *других растворяющих преципитат*, *обесфторенный фосфат*, *томасит*, *мареновский фосфит* и *другие термодиффаты*.

Третья группа — *труднорастворимые* фосфорные удобрения, такие как *фосфоритная и костная мука*, фосфор из которых извлекается только 20%-ной соляной кислотой или смесью соляной и азотной кислот.

Иногда выделяют группу так называемых *комбинированных фосфорных удобрений* — *суперфос* и *другие фосфориты*, частично разложившие фосфорной кислотой. Ком-

бинированными их называют потому, что они содержат и водорастворимые, и цитратнорастворимые, и труднорастворимые фосфаты.

В мировой практике фосфориты на удобрения перерабатываются *четырьмя основными способами*. Самый простой способ — это измельчение фосфоритов в фосфоритную муку. Наиболее распространенный и изученный способ переработки фосфоритов — разложение фосфатов кислотами: серной, фосфорной, азотной. Третий способ — электротермическое восстановление фосфатов углеродом в присутствии диоксида кремния с извлечением элементарного фосфора и его последующей переработкой в фосфорную кислоту и ее соли. Этим способом перерабатывается менее качественное сырье, чем при обработке кислотами, но удобрения получают с меньшим количеством примесей. Четвертый способ — термическая обработка фосфатов. Например, целочное разложение при оплавлении и спекании с солями щелочных и щелочноземельных металлов, гидротермическая переработка в присутствии пара. Вследствие дефицита соды и низкого качества удобрений этот способ широко не используется.

## 6.7. АССОРТИМЕНТ И ПРИМЕНЕНИЕ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

Фосфорсодержащие удобрения производит Гомельский химический завод. Интенсивное применение фосфорных удобрений в Беларуси началось со второй половины 60-х годов. Так, в 1966–1970 гг. на 1 га пахотных земель было внесено 30 кг  $P_2O_5$ . В дальнейшем, вплоть до 1990 г. использование фосфорных удобрений постоянно возрастало. В 1990 г. оно было максимальным и составило 69 кг/га д.в. По общему тоннажу в 1986–1990 гг. на сельскохозяйственные угодья республики было внесено 436,6 тыс. т д.в. фосфорных удобрений, причем наиболее высокого уровня применение их достигло в 1990 г. — 469,4 тыс. т д.в.

Последовавший после 1991 г. спад в экономике республики привел к тому, что потребление фосфора в сельском хозяйстве резко уменьшилось и в 1995 и 1996 гг. составило только 12–15 кг/га пашни и 1–2 кг на гектар площади сенокосов и пастбищ. В 1997 г. на 1 га пашни в Беларуси было внесено 23 кг, а в 1998 г. 26 кг  $P_2O_5$ .

Для того, чтобы поддерживать достигнутый уровень содержания подвижного фосфора в почвах на пашне и уметь-

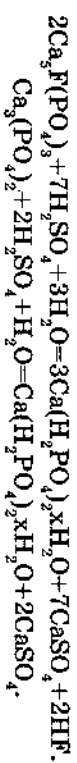
шить количество почв слабообеспеченных фосфором необходимо в 2000–2005 гг. вносить не менее 35–40 кг  $P_2O_5$  на 1 га пашни. Потребность сельского хозяйства Беларуси в фосфорных удобрениях на 2000–2005 гг. составляет 290 тыс. т д.в. В дальнейшем, при условии применения указанных объемов внесения фосфорных удобрений, возможно повышение содержания подвижного фосфора в почвах и снижение в связи с этим потребности в фосфоре до 220 тыс. т д.в.

Основными формами фосфорсодержащих удобрений в настоящее время является аммофос и простой аммонизированный суперфосфат, которые будут основными и на ближайшую перспективу. В 2005 г. планируется применить 290 тыс. т д.в. фосфорных удобрений, в том числе аммофоса 209 тыс. т, аммонизированного суперфосфата 40 тыс. т, комплексного удобрения марки 5% азота, 16%  $P_2O_5$  и 35%  $K_2O$  — 20 тыс. т и комплексных удобрений марок 16:11:19 и 13:9:12 — 22 тыс. т.

Учитывая дефицит фосфорных удобрений и чтобы не снизить производство сельскохозяйственной продукции, необходимо прямого применять минеральные удобрения, исходя из обеспеченности подвижным фосфором каждого поля.

### 6.7.1. ВОДРАСТВОРИМЫЕ ФОСФОРНЫЕ УДОБРЕНИЯ

Суперфосфат простой  $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O + 2CaSO_4 \times 2H_2O$  содержит 19–20% усвояемого фосфора в расчете на  $P_2O_5$ . При этом на усвояемый фосфор приходится 88–98% общего его содержания. Получают простой суперфосфат обработкой апатита или фосфорита серной кислотой. Количество кислоты рассчитывают таким образом, чтобы весь нерастворимый в воде трехкальциевый фосфат превратился в водорастворимый фосфат кальция:



Большая часть фосфора в простом суперфосфате содержится в виде *монофосфата кальция*  $Ca(H_2PO_4)_2$ . Кроме того, небольшое количество фосфора в нем присутствует в форме  $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ , а также *трикальцийфосфата*, *фосфатов железа и алюминия*. Помимо фосфора удобрение содержит около 50% *сульфата кальция* (гипса) и до 5,5% *свободной фосфорной кислоты*.

Для улучшения физических свойств суперфосфата и уменьшения взаимодействия с почвой его гранулируют. При грануляции и сушке содержание воды уменьшается до 1-4%, а свободная кислотность до 1-1,5%. Суперфосфат выпускается в виде светло-серой или серой массы с неодинаковыми по размеру гранулами (1-4 мм) и неприятным запахом. Гранулированный суперфосфат обладает хорошими физическими свойствами: не слеживается и хорошо рассеивается.

Простой суперфосфат можно применять под все культуры и на всех почвах. Одновременно он обеспечивает растения серой. Исследования БелНИИ земледелия и кормов показали, что в интенсивном земледелии простой суперфосфат эффективнее под культуры семейства капустных (капуста, брюква, турнепс), клевер, озимую рожь, ячмень, картофель, особенно при внесении в рядки одновременно с севом. Невысокая концентрация фосфора в удобрении позволяет вносить его равномерно в минимальных дозах — 10-15 кг/га  $P_2O_5$ . Гранулированный суперфосфат может выпускаться с добавками бора, тогда он имеет голубой цвет.

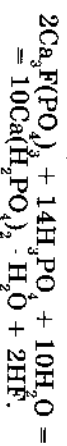
**Двойной суперфосфат**  $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$  производится в гранулированном виде, содержание усвояемой  $P_2O_5$  — 43-49%, свободная кислотность — не выше 2,5%. По классификации Международной ассоциации производителей суперфосфата и сложных удобрений (ИСМА), двойным суперфосфатом считается удобрение, содержащее 25%  $P_2O_5$  тройным — 43-48%  $P_2O_5$ . Поэтому в странах Западной Европы двойной суперфосфат называют тройным.

Фосфор в двойном суперфосфате находится в основном в виде водорастворимого *монокислотного фосфата* и небольшого количества *свободной фосфорной кислоты*. Выпускается также двойной суперфосфат с *добавками микроэлементов*.

Технология производства двойного суперфосфата распадается на две стадии. Вначале получают фосфорную кислоту. Для этого апатит (или фосфорит) обрабатывают большим количеством серной кислоты:



Затем этой фосфорной кислотой обрабатывают новую порцию фосфатного сырья и получают двойной суперфосфат:



В отличие от простого суперфосфата двойной содержит меньше примесей и совсем не содержит серы. Внешне он весьма схож с простым гранулированным суперфосфатом, но гранулы более крупные, выравненные по размеру и темнее (серого или темно-серого цвета).

Химические и физические свойства двойного суперфосфата, применение и эффективность его такие же, как и простого суперфосфата. Только при удобрении культур, положительно реагирующих на серу (капустные, клевер и др.), эффективнее простой суперфосфат. Двойной суперфосфат используется на всех почвах под все сельскохозяйственные культуры. Это ценное транспортное, экономическое выгодное удобрение. В последнее время в Беларуси налажено производство аммонизированного суперфосфата с содержанием до 8% N и 33%  $P_2O_5$ .

## 6.7.2. ЦИТРАТНО- И ЛИМОННОРАСТВОРИМЫЕ ФОСФОРНЫЕ УДОБРЕНИЯ

**Преципитат**  $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$  содержит не менее 38%  $P_2O_5$  и не более 8% влаги. Получают кислотной обработкой фосфатов при осаждении фосфорной кислоты известковыми молотком, а также как продукт отхода при желатиновом производстве. Белый или светлый сыпучий порошок без запаха, перевозится в четырехслойных бумажных мешках. Выпуск его ограничен. Содержит цитратнорастворимый фосфор и в воде не растворяется. Применяют преципитат только для основного внесения, в этом случае он не уступает двойному суперфосфату, а на кислых почвах даже его превосходит. В Беларуси это удобрение практически не применяется.

**Термофосфаты** составляют особую группу фосфорсодержащих продуктов, получаемых спеканием и сплавлением при высокой температуре (1200-1400 °C) природных фосфатов с содой, сульфатом натрия, кизеритом, бардиным углем, а также сплавлением с магнезисодержащим сырьем. Термофосфаты содержат фосфор в форме  $Na_2O \cdot 3CaO \cdot P_2O_5 + SiO_2$ . К группе термических фосфатов относят также шлак (томашлак, маргеновский шлак), *обесфторенный фосфат и др.* Большое распространение термофосфаты получили на Западе.

Растущая потребность в фосфорных удобрениях при сравнительно ограниченных ресурсах сырья и неоднородности последнего, необходимость удешевления производства фосфорных удобрений делают актуальными бескислотные способы производства и применения нерастворимых в воде фосфатов. Поэтому термофосфаты являются перспективным удобрением. Кроме того, они обладают и другими достоинствами: могут использоваться *под все культуры и на всех почвах*, их можно производить из природных фосфатов, непригодных для непосредственного применения в виде фосфоритной муки, а также трудно поддающихся химической обработке для получения водорастворимых фосфорных удобрений.

В Германии термофосфаты получают спеканием природных фосфатов с содой или сульфатом натрия. Удобрение, выпускаемое фирмой "Ренания" под названием ренаний фосфат, содержит 25–30%  $P_2O_5$ . Его применяют и отдельно, и в составе смешанных форм. В Польше производят термофосфат под названием супертомасин, содержащий 27–29%  $P_2O_5$ . Его получают спеканием (1500 °C) фосфоритов с 20% соды и добавкой доменного шлака. Во Франции выпускается плавленый фосфат под названием фоспаль, полученный прокаливанием при относительно невысоких температурах (550–600 °C) измельченного природного апломкальцийфосфата, импортируемого из Сингапоя. Удобрение содержит 27–29%  $P_2O_5$  и применяется отдельно или в составе смешанных удобрений. Исследования кафедры агрохимии БСХА показали, что на посевах ячменя на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве эффективность фосфата была на уровне 73, а на посевах озимой ржи – 70% от эффекта, который давал двойной суперфосфат.

*Фосфатшлак мартековский* содержит 8–12%  $P_2O_5$  в форме  $Ca_3P_2O_8 \cdot CaSiO_3$ . Побочный продукт переработки в мартенах богатых фосфором чугунов. Тонкий, гажелый, пылящий порошок черного цвета. Применяемый в качестве удобрения фосфатшлак марки ПФ-10 должен содержать не менее 10% усвояемого фосфора, а марки ПФ-7 – 7%  $P_2O_5$ , влаги – 1%. На фосфатшлак приходится около 1% от всех фосфатов и используется он в основном в районах, прилегающих к металлургическим заводам.

Фосфатшлак можно использовать *на всех типах почв и только для основного внесения*. Однако, так как он обладает щелочными свойствами, его эффективность выше на кислых почвах. Во избежание потерь азота (аммиака) фос-

фатшлак нельзя смешивать с аммонийными удобрениями. В опытах кафедры агрохимии БСХА при внесении под озимую рожь на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах действие фосфатшлака равнялось 70% от эффекта двойного суперфосфата, а под ячмень – только 40%.

*Томасшлак*  $4CaO \cdot P_2O_5 + 4CaO \cdot P_2O_5 \cdot CaSiO_3$  по своему составу аналогичен мартековскому фосфатшлаку. Это так же побочный продукт переработки богатых фосфором чугунов на сталь и железо по щелочному способу Томаса. Томасшлак содержит 14% растворимого в лимонной кислоте фосфора в пересчете на  $P_2O_5$ . В мировом производстве фосфорных удобрений томасшлак занимает значительное место. В странах СНГ используется мало. Применяется так же, как мартековский фосфатшлак.

*Обесфторенный фосфат* содержит 36%  $P_2O_5$ . Это продукт гидрохимической обработки смеси апатита (или фосфорита) с небольшим количеством кремнезема (2–3%  $SiO_2$ ) при температуре 1450–1550 °C. При этом разрушается кристаллическая решетка фторапатита и удаляется фтор в газобразной форме, а фосфор переходит в растворимую (лимоннорастворимую) форму. Обесфторенный фосфат – порошок серого цвета, негигроскопичен, не слеживается, легко рассеивается. Его можно применять *как основное удобрение на всех почвах*, но так же, как томасшлак, нельзя смешивать с аммонийными удобрениями. Обесфторенный фосфат применяется и как кормовой фосфат для подкормки животных.

### 6.7.3. ТРУДНОРАСТВОРИМЫЕ ФОСФОРНЫЕ УДОБРЕНИЯ

**Фосфоритная мука** – самое дешевое фосфорное удобрение. Это измельченные природные фосфориты, очищенные от пустой породы. Фосфор содержится в виде соединений фторапатита  $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot 7CaF_2$ , гидроксилапатита  $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$ , карбонатапатита  $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaCO_3$ , т.е. находится в форме трехзамещенного фосфата кальция  $Ca_3(PO_4)_2$ . Фосфоритная мука первого сорта содержит 29%, второго – 23 и третьего – 20% фосфора в пересчете на  $P_2O_5$ . Один из основных показателей качества удобрения – тонина помола. Остаток на сите с отверстиями 0,18 мм не должен превышать 10%, массы фосфоритной муки. Фосфоритная мука – тонкий, гажелый порошок темно-серого (землистого) цвета. Недостатком ее является то, что она сильно пылит при транспортировке и внесении в почву.

Большинство фосфоритов в воде почти не растворяется, но в слабых кислотах некоторые фосфориты становятся растворимыми. Под влиянием почвенной кислотности фосфоритная мука переходит в доступное для растений состояние. Ее используют и отдельно, и как добавку к различным компостам. В первом случае она применяется только в качестве основного удобрения. Эффективна под люпин, горох, гречиху, озимую рожь и овес. В связи с интенсивным известкованием фосфоритная мука в Беларуси в последние годы не завозится. В России она составляет 12,5% общего количества фосфорных удобрений.

В относительно больших количествах фосфоритная мука применяется в Бразилии. В США фосфоритную муку используют главным образом в качестве добавки к смешанным удобрениям. Япония и некоторые западноевропейские страны, не располагающие фосфатным сырьем, выпускают фосфоритную муку из импортных фосфоритов. В Беларуси тоже преждевременно отказываться от этого дешевого фосфорного удобрения, пригодного для использования на кислых почвах под культуры, способные усваивать труднорастворимые фосфаты.

**Виванит**  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  — богатая руда, фосфорнокислая закисная соль железа. В чистом виде содержит около 28%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , с примесью торфа (торфо-виванит) — от 12 до 26%. По влиянию на урожай сельскохозяйственных культур приближается к фосфоритной муке. Виванит заделывается под торфом слоями различной мощности или небольшими гнездами в виде белой массы. На воздухе быстро синее. После добычи, длительного проветривания (для перевода закисных соединений в окисные) и подсыхания масса хорошо рыхлится и удовлетворительно раскисляется. Торфовиванит хороший источник фосфора для сельскохозяйственных культур на всех типах почв, потребности от мест добычи. Его можно вносить в дозах 90–120 кг д.в. на 1 га.

#### 6.7.4. НОВЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ФОРМЫ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

**Суперфос** высшего сорта содержит 41%, первого — 38%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Гранулированное сыпучее удобрение с гранулами размером 2–3 мм. Пригодно для смешивания с различными удобрениями. Суперфосы — это фосфориты, частично разложённые экстракционной фосфорной кислотой. На

производство суперфоса расходуется на 25–30% меньше экстракционной фосфорной кислоты по сравнению с двойным суперфосфатом. По данным НИИ удобрений и инсектофунгицидов, если на получение суперфоса расходуются 70% фосфорной кислоты от необходимой для получения двойного суперфосфата, эффективность суперфоса находится примерно на одном уровне с двойным суперфосфатом.

Фосфор суперфоса на 50–65% представляет водорастворимыми формами (однозамещенные фосфаты кальция, магния и других катионов) и около 40% составляют дитрипикальные фосфаты.

Суперфос используется так же, как и двойной суперфосфат, и по действию на большинство культур они также аналогичны. Основное внесение суперфоса эффективно под ячмень, лен, картофель, овес, гречиху.

Планируется производство и применение этого удобрения в Беларуси.

**Полифосфаты кальция** — перспективные удобрения, содержащие 40–60%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . В зависимости от температур, при которых получают полифосфаты кальция, они подразделяются на плавленые и низкотемпературные.

В последнее время большое внимание уделяется кислотно-термическому способу получения полифосфатов при температуре 1100–1200 °C после взаимодействия его с фосфорной кислотой. Удобрение содержит 55–58% питательной фосфорной  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Добавление к продукту на стадии грануляции водорастворимых ортофосфатов обеспечивает необходимое содержание водорастворимого фосфора в удобрении.

Конденсированные фосфаты, входящие в состав полифосфата кальция в почве гидролизуются до ортофосфатов и таким образом становятся доступными для растений. Полифосфат кальция более эффективен на лабораторных почвах, где он по действию превосходит суперфосфат. По данным кафедры агрохимии ВСХА, действие полифосфата кальция под ячмень на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах составило 70% от двойного суперфосфата. Полифосфат кальция планируется производить в Казахстане на базе фосфоритов Караганды.

**Красный фосфор** содержит 229% фосфора в пересчете на  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Это перспективное, самое концентрированное фосфорсодержащее удобрение. Его можно вносить в запас на несколько лет. За сезон растения используют 15–17% вне-

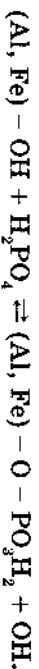


сенного в почву красного фосфора. Суммарный коэффициент использования фосфора из этого удобрения — 75–85%. Помимо прямого применения с добавками сернокислой меди  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (в качестве катализатора) из расчета 1% меди от массы фосфора или без него красный фосфор может быть использован для повышения концентрации фосфора в других фосфорных удобрениях. В частности, добавка 20% красного фосфора к простому суперфосфату из фосфоритов Каратау превращает суперфосфат в высококонцентрированное удобрение, содержащее 48–50%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , хорошо действующее как в первый, так и следующие три-четыре года после внесения.

## 6.8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ С ПОЧВОЙ

Поглощение фосфатов удобрений регулируется двумя параллельно идущими процессами — сорбции и химического осаждения. Соотношение между ними зависит от реакции почвенного раствора, содержания гумуса, степени диспергированности и реакционной способности почвенных глинистых минералов, доз удобрений и времени их взаимодействия с почвами.

Адсорбция фосфатов на поверхности почвенных частиц может происходить благодаря обмену фосфат-ионов с  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , ионами гумусовых и кремниевых кислот. С. Н. Иванов установил, что фосфат-ионы в дерново-подзолистых и торфяно-болотных почвах преимущественно связаны поверхностью-адсорбционно. Характерной чертой адсорбции является поведение адсорбированных фосфат-ионов как потенциалопределяющих с образованием внутренней части двойного электрического слоя. По мнению немецкого ученого В. Матцеля, адсорбция фосфат-ионов происходит на близких к поверхности гидроксильных группах ( $\text{OH}$ ) оксидов алюминия и железа, а также на боковых поверхностях частиц глинистых минералов:



Таким образом, обменное поглощение фосфат-ионов в почве не подлежит сомнению. Это имеет большое значение для питания растений, так как благодаря ионному обмену адсорбированные фосфат-ионы могут переходить в почвенный раствор. Поглощение фосфат-ионов растениями-

150

ми возможно потому, что они постоянно выделяют через корни при дыхании углекислый газ, который образует угольную кислоту, распадающуюся на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{HCO}_3^-$ . Последний и обменивается с коллоидами на  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Как показали исследования Р. Е. Елещева и А. Л. Иванова, степень сорбции фосфатов почвами определяется количеством фосфора, находящимся в твердой части почвы. Объем сорбированного фосфора изменяется пропорционально дозе  $\text{P}_2\text{O}_5$ . При одинаковых дозах фосфорных удобрений степень сорбции фосфатов снижается с повышением содержания фосфатов в почве.

По данным Дж. Риден, при небольших концентрациях фосфора в растворе преобладает хемосорбция фосфат-ионов у протонированной поверхности (имеющей ионы  $\text{H}^+$  или  $\text{OH}^-$ ). Хемосорбция происходит благодаря химическому взаимодействию поглощаемого вещества и поглотителя и приводит к образованию двойного электрического слоя. Этот процесс характеризуется небольшим количеством сорбционных мест и большой энергией связей.

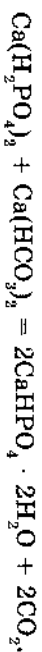
При более высоких равновесных концентрациях фосфора в растворе преобладают процессы физической адсорбции фосфатов, происходящие в потенциалопределяющем и компенсирующих слоях двойного электрического слоя, для которых характерно большое количество сорбционных мест, но с менее прочным закреплением фосфатного иона почвой.

Исследования по химии фосфора показали, что при внесении в почву монокальцийфосфата  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  вода в виде пара перемещается из окружающей почвы к удобрению. По мере растворения последнего образуется раствор, насыщенный монокальцийфосфатом и дигидратом дикальцийфосфата. Этот концентрированный раствор, содержащий много фосфора и кальция, затем передвигается по почвенным капиллярам от частиц удобрения, реагируя по пути с соседними частицами почвы и образуя свежесоздаваемые фосфаты. В этот раствор из почвенных частиц переходит довольно много ионов алюминия, железа, марганца и кальция. Последние могут вступать в реакцию с растворенным фосфором и образовывать кристаллические и аморфные продукты различной степени растворимости и доступности растениям. Остаточный фосфор растворимых фосфорных удобрений быстро включается в химические, физико-химические и биологические процессы, протекающие в почве. В труднорастворимые формы раствори-

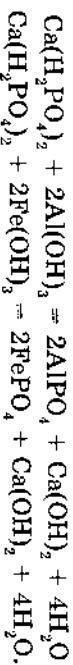
151

мые фосфаты удобрений превращаются в результате химического осаждения фосфатов из растворов. При этом образовавшиеся осадки со временем стареют, приобретая строение кристаллов.

Таким образом, превращение водорастворимых фосфорных удобрений в нейтральных почвах происходит следующим образом:



На почвах кислых, кроме того, образуются труднодоступные растениям фосфаты железа и алюминия:



Образованию фосфатов железа и алюминия кроме высокой кислотности почвы и малой концентрации ионов кальция способствует высокое содержание активных оксидов железа и алюминия. При нейтральной реакции почвы также могут образовываться фосфаты железа и алюминия вокруг частиц удобрения благодаря их подкислительному свойству. В переувлажненных почвах даже при pH выше 5,5 образуются преимущественно фосфаты железа, в песчаных — преобладают фосфаты алюминия. Протекание реакции приводит к образованию в почве фосфатных минералов: стрентита ( $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), варисцита ( $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и их изоморфной смеси баррандита, а также гидроксилапатита  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , фторапатита  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$  и других малодоступных для растений минералов.

Итак, можно выделить несколько механизмов необратимой фиксации фосфорной кислоты в почвах:

быстрый переход растворимых, доступных форм фосфатов в малодоступные для растений формы под влиянием полутвердых оксидов железа и алюминия, особенно на кислых почвах;

фиксация доступных форм фосфорной кислоты главным образом вследствие адсорбции глинистыми минералами, насыщенными кальцием и другими катионами; адсорбция растворимых фосфатов на поверхности частиц известняков и постепенное их превращение в гидроксилапатит или другие труднорастворимые соединения.

Превращение фосфоритной муки и других нерастворимых в воде форм фосфорных удобрений, в отличие от превращения рассмотренных водорастворимых форм фосфор-

ных удобрений, состоит в их растворении под действием кислотности почвы, кислотами, выделяемыми микроорганизмами и растениями, а также в поглощении фосфатов почвой. В дальнейшем процесс поглощения фосфорной кислоты, фосфоритов и других водонерастворимых форм фосфорных удобрений аналогичен поглощению почвой растворимых фосфорных удобрений.

Дерново-подзолистые почвы отличаются большой емкостью поглощения фосфат-ионов: от 800 мг/кг  $\text{P}_2\text{O}_5$  на песчаных до 3000 мг/кг на глинистых (по данным С. Н. Иванова). Наибольшей емкостью поглощения фосфат-ионов в Беларуси обладают торфяно-болотные почвы низинного типа — 13500–31000 мг  $\text{P}_2\text{O}_5$  на 1 кг сухого торфа. Органическое вещество почвы благоприятно влияет на растворимость фосфатов. Высокое содержание ионов органических соединений снижает поглощение ионов фосфатов.

Исследования кафедры агрохимии БСХА показали, что под влиянием длительного внесения органических и минеральных удобрений в дерново-подзолистой легкосуглинистой и супесчаной почве возрастает общее содержание фосфора как за счет минеральных, так и органических форм (табл. 6.4). Накопление минеральных форм фосфора происходило за счет всех фракций, извлекаемых по методу Гинзбурга — Лебедевой. На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве через 22 года после закладки опыта из фосфатов полутвердых оксидов больше выкапчивалось фосфатов алюминия, чем фосфатов железа, а в группе фосфатов кальция увеличение произошло в большей мере за счет легкорастворимых форм ( $\text{Ca-P}_1$  и  $\text{Ca-P}_2$ ). Павозо-минеральная система удобрения примерно в одинаковой мере по сравнению с контролем способствовала увеличению содержания в почве фосфатов полутвердых оксидов и кальция. В то же время в варианте, где применялись только минеральные удобрения, на долю фосфатов полутвердых оксидов приходилось около 60, фосфатов кальция — 40%. Таким образом, сочетание органических и минеральных удобрений способствует сохранению в почве фосфора в более доступной форме, чем при внесении одних минеральных удобрений.

На дерново-подзолистой супесчаной почве через 13 лет после закладки опыта в удобряемых вариантах накопление фосфора по сравнению с контрольным вариантом происходило также за счет всех форм, извлекаемых по методу Гинзбурга — Лебедевой, но в большей мере за счет фосфатов

алюминия и фракций более растворимых фосфатов кальция. На дерново-подзолистых песчаных почвах при создании искусственных фонов с различными уровнями содержания подвижного фосфора (определенного по методу Кирсанова) накопление фосфора происходило в отличие от суллинистых и супесчаных почв преимущественно за счет фосфатов алюминия (табл. 6.4).

Приведенные опытные данные не подтверждают широко распространенные суждения об относительно сильной ретроградации фосфорных удобрений.

Фосфатный режим почвы можно регулировать локальным внесением удобрений, при котором меньше их контакт с почвой и выше коэффициент использования фосфора удобрений. Сохранению фосфора удобрений в доступных формах способствует внесение извести и органических удобрений.

Долгое время считалось, что под влиянием известкования фосфаты железа и алюминия переходят в почве в более растворимые фосфаты кальция. Однако это не подтвердилось исследованиями С. Н. Иванова, кафедры агрохимии ВСХА, Н. Д. Хлыстовского и других авторов. При известковании существенно не изменяется содержание подвижных фосфатов в почве, но повышается степень их подвижности и доступность вследствие снижения кислотности, содержания обменного алюминия и общего улучшения условий роста и развития. На известкованных почвах фосфорные удобрения меньше переходят в фосфаты железа и алюминия и в большей мере сохраняются в формах, связанных с кальцием, что повышает эффективность удобрений.

## 6.9. ПРИЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

Степень растворимости фосфорных удобрений не всегда совпадает с их удобрительной ценностью. На сильно-кислых почвах легкорастворимые фосфорные удобрения (суперфосфат и др.) быстро превращаются в труднорастворимые формы и их эффективность оказывается невысокой. Поэтому в этом случае предпочтительнее фосфоритная мука и умеренно растворимые фосфорные удобрения (термофосфаты и др.). На почвах, достаточно обеспеченных подвижным фосфором, а также при выращивании культур, интенсивно его использующих (люпин, горох, пре-

чиха и др.), разная растворимость этих двух групп удобрений не имеет большого значения. Однако на почвах слабых или близких к нейтральным, с низким содержанием подвижного фосфора, особенно при возделывании культур, требующих много фосфора в начале роста, предпочтительнее легкорастворимые фосфорные удобрения.

Большое значение имеет правильное распределение и строго дифференцированное применение фосфорных удобрений исходя из их эффективности и агрохимического обследования почв. Эффективность фосфорных удобрений зависит от количества подвижного фосфора в почве. Для увеличения его содержания на 10 мг в 1 кг почвы на песчаных и супесчаных кроме возмещения вынесенного урожая нужно вносить 40–60 кг/га  $P_2O_5$ , на легко- и среднесуглинистых 60–90, тяжелосуглинистых – 90–120 кг/га. На пахотных землях в Беларуси в 1986–1989 гг. для увеличения содержания подвижного фосфора на 10 мг в 1 кг почвы потребовалось внести сверх вынесенного 86 кг/га  $P_2O_5$ .

Используя приведенные данные и сведения из истории земельного участка о сумме внесенного в предшествующие годы фосфора, можно прогнозировать обеспечение почвы этим элементом. Если довести содержание подвижного фосфора на каждом поле до оптимального (см. табл. 6.3), то в дальнейшем можно вносить фосфорные удобрения только для компенсации выносимого растениями и получать стабильные урожаи сельскохозяйственных культур. Перенасыщение же почв фосфором непроизводительно и экономически невыгодно.

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 колеблются от 45 до 120 кг д.в., более высокие применяют под плодовые, овощные и технические культуры, особенно на неплодородных почвах, средние – под картофель, кукурузу и кормовые культуры.

Непрерывным 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 зна-

чения. На кислых почвах из-за перехода водорастворимых удобрений в труднодоступное для растений состояние нельзя допускать, чтобы они долго находились в почве без растений.

Хороший эффект дает сочетание допосевного внесения и внесения небольшого количества фосфора локально в рядки во время сева (10–20 кг/га  $P_2O_5$ ). Однако семена некоторых культур (кукуруза, подсолнечник) сильно угнетаются, соприкасаясь с удобрениями. Поэтому между ними должна быть прослойка почвы, а дозы удобрения – минимальными (10 кг/га  $P_2O_5$ ). Во время сева могут вноситься простой и двойной суперфосфат, суперфос, аммофос и аммофосфат. Простой гранулированный суперфосфат вносится под зерновые культуры в дозе 10 кг/га  $P_2O_5$ , а более концентрированные удобрения – 15–20 кг/га. Под некоторые культуры на дерново-подзолистых почвах хорошо вносить фосфор с небольшой дозой азота (аммофос).

Для внесения в рядки лучше использовать комбинированные селитки. Гранулированный суперфосфат перед севом можно смешивать с семенами зерновых культур и немедленно сеять обычной рядовой селиткой, но семена и удобрения обязательно должны быть сухими, а гранулы прочными. Урожайность зерновых при рядковом внесении фосфорных удобрений повышается на 2,5–3 ц/га, а ослата 1 га фосфора урожаям примерно втрое выше, чем при основном разбросном внесении.

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, наиболее высокую прибавку дает ленточное внесение фосфора вместе с азотом, а еще лучше – всех трех главных элементов питания.

Такой прием, как внесение фосфорных удобрений в запас, на два-три года, экономичен, но, как показывают исследования, его можно использовать лишь на почвах, в которых не выражена фиксация фосфора удобрениями в трудно-растворимых для растений формах. Это связано с тем, что культуры, не получающие фосфорные удобрения, сильнее снижают урожай, чем его повышают культуры, под которые вносят высокие дозы фосфорных удобрений. При пе-

риодическом их внесении культура, высаживаемая сразу после удобрения почвы, лучше обеспечивается фосфором, поэтому это должны быть отзывчивые на фосфор культуры (озимая пшеница, картофель). Благодаря этому содержание подвижного фосфора быстрее приближается к оптимальному уровню. Эффективно также внесение в запас фосфорных удобрений под многолетние травы, высеваемые под покров, под плодовые и ягодные культуры. Однако этот способ можно использовать только в условиях достатка фосфорных удобрений.

Подкормки фосфорными удобрениями, содержащими фосфор в водорастворимой форме, при междурядной обработке пропашных культур дают неплохой эффект, если они по какой-то причине были внесены в недостаточном количестве в основное удобрение. Опыты, когда часть фосфора вносилась в подкормку, показали, что это нецелесообразно. Однако подкормки водорастворимыми фосфорными удобрениями широко применяются для многолетних трав.

Некорневые подкормки фосфорными удобрениями в дополнение к основному внесению обходятся дорого, так как приходится использовать слабые растворы, чтобы избежать ожога листьев, и практически не используются в производственных условиях.

Важно правильно выбрать форму удобрения исходя из почвенных условий и возделываемой культуры. Кафедрой агрохимии ВСХА проводилось сравнительное изучение новых форм фосфорсодержащих удобрений на дерново-подзолистой дергосушлистой почве (табл. 6.5). Под посевы горохо-овсяной смеси, картофеля, ячменя и льна суперфос был раннозачен двойному суперфосфату и превосходил фосфоритную муку. Однако под кукурузу и озимую рожь действие суперфоса было несколько ниже, чем двойного суперфосфата, правда только в засушливые годы. В исследованиях, проведенных БелНИИП на дерново-подзолистых супесчаных почвах, эффективность суперфоса по сравнению с двойным суперфосфатом также была ниже при неблагоприятных погодных условиях. Обобщение НИИФ данных большого числа опытов, поставленных на дерново-подзолистых почвах, показало, что эффективность суперфоса в среднем находится на уровне 95% от двойного суперфосфата.

## 6.5. Эффективность форм фосфорсодержащих удобрений и сельскохозяйственные культуры, ц/га

Варианты	Культура и дозы удобрений				
	горохо-овсяная смесь, $N_{90}P_{30}K_{90}$	озимая рожь (зерно), $N_{90}P_{60}K_{90}$	кукуруза (зеленая масса), $N_{90}P_{90}K_{90} + 40 \text{ т/га}$ навоза	ячмень (солома), $N_{90}P_{90}K_{90}$	лен (солома), $N_{90}P_{90}K_{90}$
Фон (НК)	429	51,3	650	37,8	54,3
Двойной суперфосфат	487	56,4	731	42,7	68,3
Суперфос	472	54,5	688	41,8	67,4
Фосфоритная мука	—	—	—	40,6	61,5
Аммофос	480	55,9	712	—	—
Аммофосфат	484	54,7	693	—	—

Действие фосфоритной муки Егорьевского месторождения в севообороте картофеля — ячмень — лен составляло 50% от двойного суперфосфата. Однако последствие фосфоритной муки на одноклетных травах и овсе оказалось выше, чем двойного суперфосфата. С учетом прямого действия и последствие эффективность двойного суперфосфата и фосфоритной муки выравнивалась.

Действие нового фосфорсодержащего удобрения аммофосфата при внесении под горохо-овсяную смесь, озимую рожь и кукурузу было аналогично эффекту от аммофоса и двойного суперфосфата. По данным ВелНИИДА, на дерново-подзолистых супесчаных почвах аммофосфат более эффективен в годы с благоприятным водным режимом и температурными условиями, при неблагоприятных погодных условиях действие его было ниже, чем двойного суперфосфата: под картофелем и ячменем — 76%, под озимую рожь — 66% от двойного суперфосфата.

В настоящее время ощущается дефицит фосфора, поэтому концепция применения фосфорных удобрений пересмотрена в сторону снижения доз. Эти дозы предусматривают более умеренные темпы увеличения содержания подвижного фосфора на достаточно окультуренных почвах.

В условиях дефицита фосфорных удобрений внесение основных доз (30–40 кг д.в.) следует сконцентрировать только на пахотных почвах респубрики с недостаточным содержанием фосфора (менее 150 мг/кг почвы).

На почвах с повышенным содержанием подвижного фосфора (151–200 мг/кг почвы) необходимо предусмотреть

158

рядковое внесение фосфора под наиболее ценные культуры (озимую и яровую пшеницу, зернобобовые, рапс, лен, сахарную свеклу). На почвах с высоким содержанием (290 мг/кг и более) фосфорные удобрения можно временно (несколько лет) не применять. Такой подход позволит получить наиболее высокую окупаемость этих дорогих туков и не приведет к снижению достигнутого уровня содержания подвижного фосфора в почвах.

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

## Вопросы для самоконтроля

1. Каково значение фосфора для растений?
2. В виде каких соединений поступает фосфор в растения?
3. В каких формах содержится фосфор в почве?
4. На какие основные группы подразделяются фосфорные удобрения?
5. Что служит сырьем для производства фосфорных удобрений?
6. Где находятся основные месторождения фосфорсодержащих пород?
7. Какие фосфорсодержащие удобрения используются в Беларуси?
8. Перечислите свойства и расскажите о применении простого и двойного суперфосфата.
9. Каковы состав и свойства преципитата, томасшлака, термофосфатов, обезфторенных фосфатов и фосфоритной муки? Как применяют эти удобрения?
10. Охарактеризуйте свойства и особенности использования новых форм фосфорных удобрений.
11. Укажите особенности превращения фосфорных удобрений в почве.
12. Что следует учитывать при использовании фосфорных удобрений, определения способов их внесения?
13. Какова степень использования фосфора из удобрений?
14. Каковы приемные эффективного использования фосфорных удобрений?