

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОСФОГИПСА В ЗЕМЛЕДЕЛИИ

В.В. Окорков, д.с.-х.н. – Владимирский НИИСХ Россельхозакадемии

E-mail: adm@vnish.elcom.ru

В статье показаны приемы и методы использования фосфогипса для повышения плодородия почвы. Рассмотрена экономическая эффективность и экологическая безопасность применения фосфогипса.

Ключевые слова: фосфогипс, солонцы, плодородие почвы, урожай, обменный натрий, интенсивность рассоления, комплексная мелиорация.



Фосфогипс представляет собой побочный продукт производства экстракционной фосфорной кислоты, получаемой из фосфатных пород при мокром процессе разложения смесью серной и фосфорной кислот дигидратным способом. Фосфорную кислоту используют для производства легкорастворимых фосфорных удобрений, в т.ч. аммофоса, а побочный продукт гипс накапливается в отвалах. Этот тонко гранулированный, очень чистый продукт, называемый фосфогипсом, производят в очень больших количествах на комбинатах по производству фосфорных удобрений.

Фосфогипс из фосфоритного сырья содержит значительно меньше стронция (400-600 мг/кг) по сравнению с кислым фосфогипсом из хибинского апатитового концентрата (1400 мг/кг). Из элементов, относящихся к первому классу опасности в фосфогипсах, полученных при переработке обоих типов сырья, может вызывать опасение кадмий, а в фосфогипсе из фосфоритного сырья – свинец.

По воздействию на организм человека фосфогипс относится к малоопасным веществам (IV класс опасности, ГОСТ 12.1.007). В сельском хозяйстве РФ для мелиорации поставляется фосфогипс-дигидрат, получаемый из Кольского апатита (хибинский и ковдорский апатитовые концентраты). Фосфогипс, получаемый при разложении хибин-

1. Основные требования к фосфогипсу

(ТУ 113-08-418-94 «Фосфогипс для сельского хозяйства»)

Основные физико-химические свойства	Значение для сорта, %	
	первый	второй
Массовая доля основного вещества ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в пересчете на сухой дигидрат, не менее	92	92
Массовая доля гигроскопической (сверхкристаллизационной) воды на момент отгрузки, не более	6	20
Массовая доля водорастворимых фтористых соединений, в пересчете на фтор, не более	0,4	0,3
Массовая доля частиц (комков) размером:		
более 10 мм	Отсутствие	Отсутствие
от 5 до 10 мм, не более	1	20
более 1 мм, не более	6	не нормируется
Массовая доля примесей токсичных элементов, в том числе кадмия, мышьяка, ртути, свинца	При существующих нормах внесения уровень поступления примесей (мг/кг) не должен превышать ПДК или ОДК в почве (для группы почв «песчаные и супесчаные») по СанПиН 42-128-4433-87 или по Перечню ПДК или ОДК химических веществ в почве № 6229-91 и ГН 2.1.7.020-94 (дополнение к перечню ПДК и ОДК № 6629-91)	

ского апатитового концентрата, содержит несколько больше фосфора, фтора и стронция по сравнению с фосфогипсом из ковдорского сырья.

Свежий фосфогипс, поступающий из цеха переработки, имеет $\text{pH H}_2\text{O}$ 2,6-3,0. В сельском хозяйстве в качестве мелиоранта используют как кислый, так и нейтрализованный фосфогипс. Нейтрализацию фосфогипса проводят при его гидроскладировании путем ввода нейтрализующей добавки (известь) в транспортируемую в шламонакопитель суспензию фосфогипса. Величина $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ нейтрализованного фосфогипса составляет 7-8.

Поставляемый для сельского хозяйства фосфогипс должен соответствовать требованиям ТУ 113-08-418-94 «Фосфогипс для сельского хозяйства»

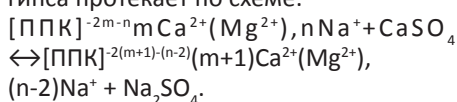
(табл. 1).

Фосфогипс для сельского хозяйства хранят в крытых неотапливаемых складах, в насыпях под навесом, исключая возможность его увлажнения и загрязнения посторонними примесями. Фосфогипс второго сорта допускается хранить в буртах под открытым небом.

Содержание радиоактивных элементов в Кольских апатитах невелико. Радиоактивность фосфогипса из Кольского апатита в 8 раз ниже допустимой нормы, принятой Организацией Объединенных Наций по промышленному развитию для материалов, утилизируемых в природной среде (Рекомендации по использованию фосфогипса для мелиорации солонцов, (2006 г.).

Основная область применения гипса или фосфогипса в сельскохозяй-

ственном производстве – мелиорация солонцовых почв, что было впервые теоретически обосновано К.К. Гедройцем (1932). На этих почвах его применяют для вытеснения из почвенного поглощающего комплекса (ППК) обменного натрия, который обуславливает их неблагоприятные физико-химические, структурно-механические и физические свойства: повышенные пептизируемость илистой и почвенной массы, твердость почвенной корки, высокая плотность почвы и низкая фильтрационная способность. Замена обменного натрия на кальций обеспечивает улучшение названных свойств солонцов и повышает их плодородие. Реакция обмена поглощенного натрия на кальций гипса протекает по схеме:



Продуктом реакции является сульфат натрия – легкорастворимая и легко вымываемая из почвы соль, которая также способствует коагуляции почвенных коллоидов. В случае присутствия в почвенном растворе нормальной соды наблюдается и ее устранение:



Гипсование остается ведущим приемом мелиоративного освоения солонцов, устраняющим целый комплекс негативных параметров. Дальнейшие исследования отечественных и за-

рубежных исследователей в целом подтвердили главенствующую роль обменного натрия и обусловленного им повышенного заряда поверхности ППК в проявлении неблагоприятных свойств солонцовых почв [1,2].

Так, изучение мелиоративного эффекта ионов водорода, кальция и железа на распаханных высококарбонатных солонцах показало, что азотная и серная кислоты, гипс, хлористый кальций и сернокислородное окисное железо практически одинаково влияли на электрокинетический потенциал и размеры вытеснения обменного натрия из иллювиальных горизонтов солонцов. С ростом доз мелиорирующих веществ, наряду с использованием действующего вещества на вытеснение обменного натрия, увеличивается и расход его на увеличение равновесной концентрации вносимых мелиорантов или продуктов их гидролиза, на вытеснение обменного магния, что снижает их коэффициент использования. При соотношении почва:жидкая фаза 1:2,5 коэффициенты использования доз мелиорантов 0,25; 0,50; 0,75 и 1,00, выраженных в долях от полной нормы, эквивалентной обменному натрию, соответственно равны 1,0; 0,90; 0,80 и 0,70. Влияние вида анионов (SO_4^{2-} , Cl^-) на взаимодействие кальция с ППК не выявлено.

Резкое увеличение скорости филь-

трации черноземных и каштановых солонцов наблюдается при снижении обменного натрия менее 10-15 % от емкости обмена. Наибольшие величины ее получены при мелиорации солонцов сернокислым окисным железом, наименьшие – при воздействии кислот, промежуточные – при обработке гипсом и хлористым кальцием. При применении кислот микроагрегаты наименее водопрочны, так как их образование обусловлено и действием слабых ван-дер-ваальсовых сил притяжения. Наиболее высокий эффект солей железа, по-видимому, связан с дополнительным влиянием гетерокоагуляции отрицательно заряженных частиц с положительно заряженными гидроксидами железа, образовавшимися при гидролизе сернокислого железа.

Вследствие низкой растворимости гипса в воде (2,5 г/л) в богарных условиях некоторыми исследователями ему отводилась весьма скромная роль в вытеснении обменного натрия. Однако при взаимодействии с солонцами из-за связывания ионов кальция ППК растворимость его существенно увеличивается. В динамических условиях (при капиллярном движении раствора через образец иллювиального горизонта солонца) растворимость гипса и фосфогипса была близкой.

В статических условиях при взаи-

2. Некоторые параметры взаимодействия гипса и карбоната кальция с ППК черноземного солонца в колонках при прохождении через них 150 мм воды

Доза внесения гипса в долях от полной	Коэффициент использования растворенного гипса на вытеснение обменного натрия		Абсолютные размеры поглощения CaCO_3 к процессу, мг-экв	Вклад растворившегося CaCO_3 в вытеснение обменных катионов	Растворившийся гипс, %
	с учетом подключения CaCO_3 к процессу	без учета подключения CaCO_3 к процессу			
Внесение гипса во все слои					
0,46	0,86	0,62	7,65	25,9	100
0,69	0,74	0,58	5,74	15,9	91,1
0,92	0,69	0,64	2,32	5,5	89,2
Внесение гипса в 2 верхних слоя					
0,46	0,80	0,59	5,39	20,6	100
0,69	0,74	0,66	2,74	8,9	95,4
0,92	0,63/0,69	0,58/0,64	1,56	4,4	81,5
Внесение гипса и CaCO_3 во все слои					
0,46	0,86	0,60	7,26	25,6	95,0
0,69	0,75	0,56	6,87	18,6	90,3
0,92	0,65	0,56	4,02	9,4	86,5

Примечание. В числителе приведены значения КИ для всего растворившегося гипса, в знаменателе – без учета вторично адсорбированных почвой сульфат-ионов. Через 4 слоя массой по 150 г пропущено 500 мл воды.

модействии с Na/Ca- и Na-глинами и суглинками растворимость гипса (г/л) в несколько раз выше, чем в воде (в 1,2-5,7 раза) [1,2]. Она увеличивается с ростом констант обмена ионов натрия на кальций, с уменьшением соотношения твердой фазы к жидкой, увеличением емкости обмена, доз гипса, содержания обменного натрия и гумуса. Повышение растворимости гипса в жидкой фазе при его взаимодействии с Na/Ca- и Na-глинами связано: 1) со смещением равновесия в сторону растворения новых порций его в связи с поглощением одного из продуктов реакции (ионов кальция) поглощающим комплексом, 2) образованием ионных пар (CaSO_4^0 , NaSO_4^-). В природных условиях растворению мелиоранта благоприятствуют удаление продуктов обмена в более глубокие слои почвы, образование других ионных пар (MgSO_4^0 , KSO_4^- , CaHCO_3^+) и растворимых комплексных соединений с ионами кальция.

Балансовые исследования (табл. 2), проведенные в динамических услови-

ях при различном размещении гипса по слоям колонок, сформированных из иллювиального горизонта черноземного средненатриевого солонца, свидетельствуют об уменьшении коэффициентов использования (КИ) растворенного мелиоранта с увеличением доз гипса от половинной до полной нормы, эквивалентной содержанию обменного натрия, с 0,80-0,86 до 0,63-0,69 и о близости их (0,56-0,64) без учета подключения CaCO_3 к процессу. Подключение CaCO_3 к мелиоративному процессу растет с уменьшением доз гипса и при размещении его во все слои колонки. Способ размещения мелиоранта слабо влиял на величину КИ растворенного гипса. Это связано с тем, что при равномерном распределении гипса по слоям колонок хотя и наблюдается более высокий вынос с фильтратом двухвалентных катионов, но он компенсируется более интенсивным подключением к мелиоративному процессу карбоната кальция. Почвенные и внесенные карбонаты кальция растворяются примерно одинаково. Дополни-

тельное внесение CaCO_3 в двойной норме не снижало количество растворенного гипса.

При прохождении через колонки с полной нормой мелиоранта 100-200 мм воды (независимо от способа размещения гипса по слоям) 1 л влаги растворял от 4,9 до 7,3 г гипса. Установлено, что повышенные концентрации первых порций почвенного раствора (порядка сотен мг-экв/л) обладают высоким коагулирующим действием и обеспечивают близкую к зональным почвам скорость фильтрации почвенной влаги. Процессы вытеснения обменного натрия наблюдаются не только в слое внесения гипса, но и в более глубоких слоях.

На контрольных вариантах за счет гидролиза ППК и растворения CaCO_3 вытеснение обменного натрия наблюдали лишь в самом верхнем слое колонок (0-4 см). Средняя растворимость карбоната кальция составила 0,56 г/л. Скорость обменных процессов в этом случае тормозится фильтрационной способностью слоев с высоким содержанием поглощенного натрия из-за слабого коагулирующего действия равновесных растворов низкой концентрации.

По данным лабораторных опытов для средненатриевых солонцов в динамических условиях была получена следующая зависимость КИ растворенного гипса (при степени его растворения 80-100 %) на вытеснение обменного натрия (с учетом подключения к процессу CaCO_3) от доз мелиоранта (м), выраженных в долях от полной нормы, эквивалентной обменному натрию:

$$\text{КИ} = (1,02 - 0,38 \text{ м}) \pm 0,025 \text{ т}, \\ r = -0,959; t_{\text{ф}} = 10,7; t_{\text{т}}^{5\%} = 2,23; n = 12.$$

Подсчеты по данным модельных исследований свидетельствуют о возможности протекания обменных процессов при гипсовании с достаточно высокими скоростями даже при накоплении за зимний период около 100-120 мм осадков, что вполне возможно при ежегодном выпадении их около 300 мм в год и более. Положительное действие гипсования лугово-черноземных средненатриевых солонцов (табл. 3) со среднегодовым количеством осадков около 340-360 мм прослежено в течение 14 лет [1,3]. С длительностью использования солонцов продуктивность и стабильность урожаев на них возрастают. Действие гипса и фосфогипса на эти показатели было близким. Не выявлено положительной роли перепашки и повторного применения фосфогипса на урожайность ячменя.

3. Влияние мелиоративных приемов на урожайность зерна ячменя на лугово-черноземных солонцах, ц/га

Варианты опыта	Годы исследований			
	1976-1980	1982-1985	1987-1988	1976-1988
Вспашка на 25-27 см в 1974 г. + ежегодное весеннее рыхление на 25-27 см				
1. Контроль	9,2	12,0	11,0	10,5
2. Гипс, 14,5 т/га под вспашку в 1974 г.	12,4	18,9	19,4	16,0
3. Фосфогипс, 14,5 т/га под вспашку в 1974 г.	12,6	17,9	19,2	15,7
4. Фосфогипс, 14,5 т/га в 1974 г. + 7,0 т/га в 1981 г.	-	17,3	19,2	-
Средняя урожайность по фону, ц/га	-	16,5	-	-
Вспашка на 25-27 см в 1974 г. + перепашка в 1981 г. + ежегодное осеннее рыхление на глубину 25-27 см с 1982 г.				
1а. Контроль	9,2	11,2	-	-
2а. Гипс, 14,5 т/га под вспашку в 1974 г.	12,4	17,6	-	-
3а. Фосфогипс, 14,5 т/га под вспашку в 1974 г.	12,6	17,4	-	-
4а. Фосфогипс, 14,5 т/га в 1974 г. + 7,0 т/га в 1981 г.	-	18,9	-	-
Средняя урожайность по фону	-	16,3	-	-
НСР ₀₅ , ц/га	1,4	1,8	1,8	1,6
НСР ₀₅ , обработка, ц/га	-	0,9	-	-
НСР ₀₅ , мелиорант, ц/га	-	1,2	-	-
Примечание. Урожайные данные за 1976-1980 гг. опубликованы в работе В.И. Кирюшина и др., 1982, за 1982-1988 гг. – в работе В.В. Окоркова, А.И. Верещагина, 1987				

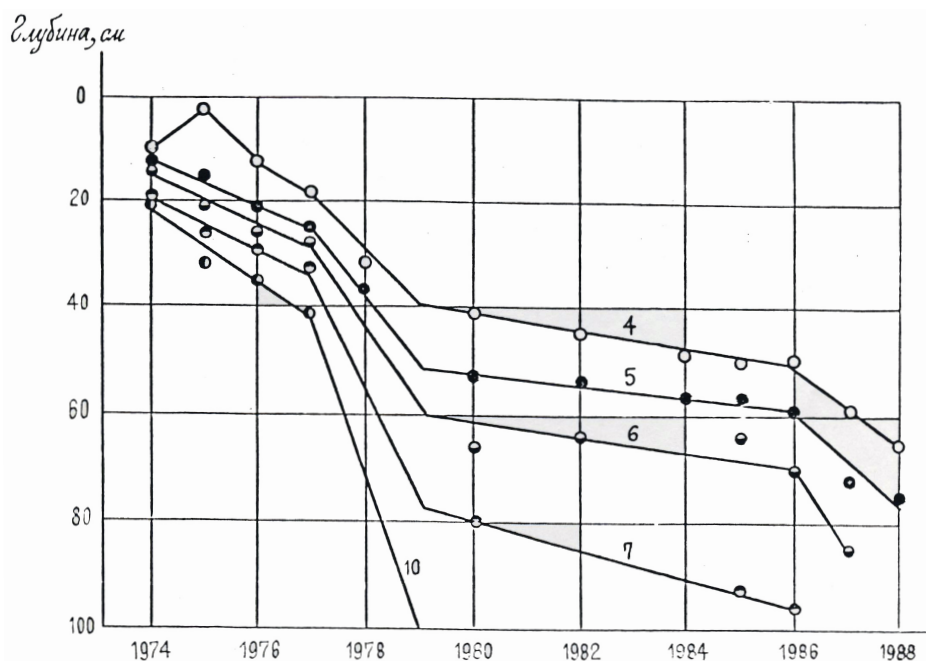


Рис. 1. Динамика изобар осмотического давления почвенных растворов на лугово-черноземных солонцах. Цифры означают величину давления в атмосферах.

Высокая эффективность гипсования солонцов связана, очевидно, с быстро идущими мелиоративными процессами. Установлено, что процессы растворения гипса, уменьшения обменного и водорастворимого натрия, снижения концентрации почвенного раствора протекают по реакциям первого порядка [1,3]. О скорости этих процессов судили по периоду, вызывающему изменение соответствующего параметра в 2 раза.

На контрольных делянках лугово-черноземных солонцов в слое почвы 0-20 см уменьшение обменного натрия в 2 раза за счет растворения карбоната кальция происходит за 16-20 лет, а на мелиорированных гипсом и фосфогипсом — за 7-9 лет. Скорости удаления обменного и общего натрия близки, а снижения концентрации почвенного раствора в 1,5-2,0 раза выше. Период растворения половинного количества гипса и фосфогипса составляет 2 года.

Вопреки существующим представлениям, несмотря на различия в фильтрационной способности контрольных и гипсованных делянок, скорость рассоления была близкой. О ней судили по изменению с глубиной изобары осмотического давления почвенного раствора 5 атм в зависимости от длительности сельскохозяйственного использования солонцов (рис. 1).

Ежегодное осеннее рыхление на глубину 25-27 см создает пористое строение обрабатываемого слоя, способного впитать весной основную мас-

су накопленных за зиму осадков как на гипсованных, так и на контрольных делянках. По мере рассоления почвенного профиля растет и мощность корнеобитаемого слоя солонцов. На гипсованных делянках это стабилизирует урожайность возделываемых культур на более высоком уровне из-за роста густоты всходов возделываемых культур. Так, густота всходов ячменя (Z , шт/м²) линейно уменьшается с увеличением твердости почвенной корки (P , кг/см²) на поверхности солонцов:

$$Z = 191 - 14,3 \cdot P, r = 0,887;$$

$$t_{\phi} = 8,80; t_{\tau}^{0,1\%} = 3,82; n = 23.$$

В свою очередь, определяющее влияние на формирование почвенной

корки помимо погодных условий оказывает обменный натрий [1,3]. Взаимосвязь между этими параметрами чаще всего экспоненциальная. Увеличение обменного натрия на 4,5-6,0 % повышает твердость почвенной корки в 2 раза.

Процессы рассолонцевания после 14-летнего сельскохозяйственного использования лугово-черноземных солонцов затронули на гипсованных делянках метровую толщу почвенного профиля, на контрольных — 75-сантиметровую глубину. И на лугово-каштановых и каштановых солонцах с выпадением около 300 мм осадков в год гипсование также высокоэффективно и является одноразовым приемом. В слое почвы 0-20 см размеры вытеснения обменного натрия гипсом и фосфогипсом в 3-4 раза более высокие, чем карбонатом кальция.

Влияние способов внесения фосфогипса (поверхностно, под вспашку, дробно) на твердость почвенной корки, КИ мелиоранта, всхожесть и урожайность ячменя было близким, хотя и отмечалась тенденция повышения всхожести при поверхностной заделке мелиоранта, а урожайности — при внесении его под вспашку и дробно (1/2 дозы — под вспашку, другая — поверхностно под луцильник). По сравнению с поверхностным внесением при этих способах полнее используется растениями фосфор фосфогипса, отмечается более интенсивное рассолонцевание слоя почвы 20-40 см. Наиболее эффективно внесение фосфогипса на мало- и средненатриевые солонцы (табл. 4). Положительная роль мелиоранта, внесенного под вспашку, на темно-каштановой почве связана

4. Влияние фосфогипса на урожайность зерна ячменя за 1984-1987 гг. на почвах каштанового солонцового комплекса, ц/га (В.В. Окорков, А.Н. Верецагин, 1987)

Вариант	Почва			Средняя урожайность по варианту
	темно-каштановая	остаточный солонец	малонатриевый солонец	
1. Рыхление на 30-33 см	17,4	15,2	9,2	13,9
2. Фосфогипс, 5 т/га под вспашку на 30-33 см	19,0	16,2	14,8	16,7
3. Фосфогипс, 5 т/га под рыхление на 30-33 см	18,5	16,0	14,3	16,3
Среднее	18,3	15,8	12,8	-
HCP_{05}	1,6			
HCP_{05} способа внесения фосфогипса, ц/га	0,9			
HCP_{05} почвенной разности	0,9			

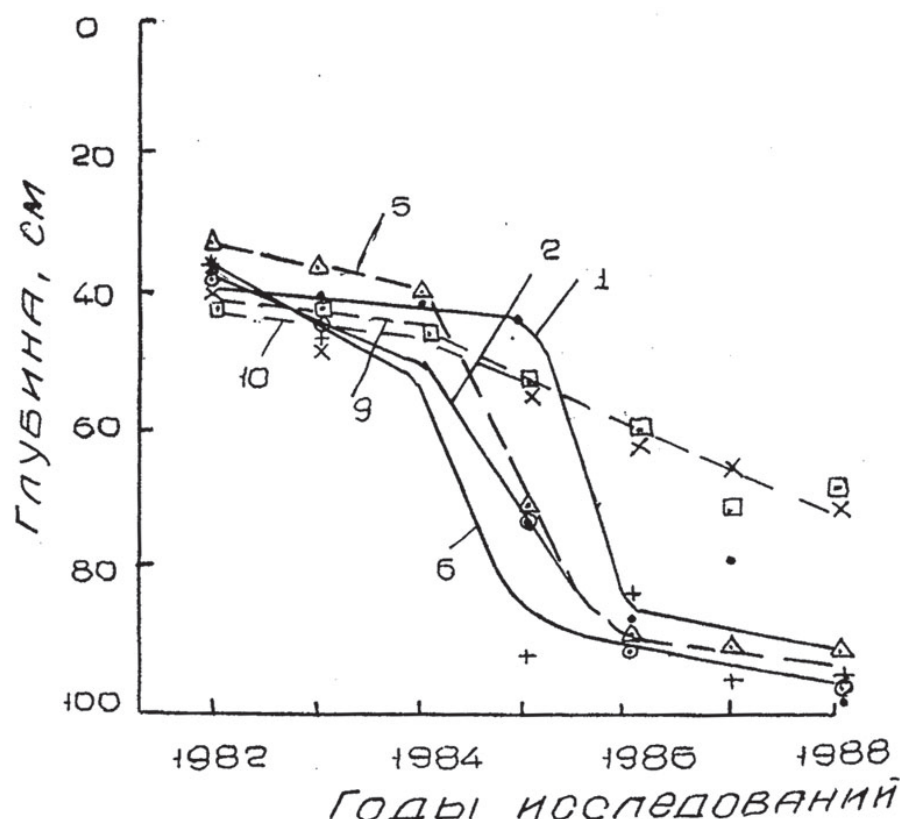


Рис. 2. Влияние комплексных приемов мелиорации лугово-черноземного солонца на динамику изобары почвенного раствора с осмотическим давлением 5 атм. 1 - трехъярусная обработка на глубину 40-42 см; 2 - то же + 7,5 т/га фосфогипса; 5 - плантажная вспашка на глубину 40-42 см; 6 - то же + 7,5 т/га фосфогипса; 9 - вспашка на глубину 25-27 см; 10 - то же + 7,5 т/га фосфогипса.

с обогащением ее подвижным фосфором.

На лугово-черноземных малонатриевых солонцах (совхоз «Подлесный»

Шортандинского района Целиноградской области) при возделывании ячменя на зерно и эспарцета на сено из-за удобрительного действия установлено

преимущество внесения фосфогипса под вспашку в сравнении с поверхностным способом. Таким образом, в ряде случаев способ внесения фосфогипса под вспашку значительно эффективнее из-за более полного использования растениями фосфора мелиоранта.

На лугово-черноземных средненатриевых солонцах (совхоз «Новорыбинский») не выявлено преимуществ увеличения степени крошения почвы и интенсивности ее перемешивания с фосфогипсом на скорость мелиоративного процесса и урожайность ячменя. Степень крошения почвы, достигаемая вспашкой плугом, достаточна для успешного протекания мелиоративного процесса. На скорость последнего не установлено влияния и степени измельчения фосфогипса.

Изучение эффективности применения различных доз гипсосодержащих мелиорантов и закономерностей взаимодействия их с ППК солонцов проводили в черноземной зоне в трех полевых и одном микрополевым опытах, в каштановой – в микрополевым, полевом и производственном опытах. Результаты исследований подтвердили правомерность использования для расчета оптимальных норм фосфогипса и гипса по формуле:

$$Г = 0,086 \cdot V \cdot h \cdot (Na - 0,1E) / K,$$

где: Г – доза гипса, т/га; V – объемная масса мелиорируемого слоя почвы, г/см³; h – мощность мелиорируемого слоя почвы, см; Na – содержание обменного натрия, мг-экв/100 г почвы; E –

5. Влияние комплексной мелиорации лугово-черноземных солонцов на урожайность зерна ячменя, ц/га

Вариант	Урожайность по годам						Средняя урожайность
	1982	1983	1984	1986	1987	1988	
Вспашка ПТН-3-40 на 40-42 см	3,9	7,3	8,7	21,9	21,1	19,1	13,7
То же + фосфогипс, 7,5 т/га	7,8	11,5	11,4	23,0	22,3	21,6	16,3
То же + фосфогипс, 7,5 т/га + навоз, 60 т/га	7,8	10,6	12,7	23,5	21,4	20,9	16,2
То же + навоз, 60 т/га	6,3	7,6	12,1	23,7	20,9	21,0	15,3
Вспашка ППН-4-40 на 40-42 см	4,7	6,7	8,8	23,8	21,4	20,2	14,3
То же + фосфогипс, 7,5 т/га	8,1	10,7	12,0	25,5	22,5	20,4	16,5
То же + фосфогипс, 7,5 т/га + навоз, 60 т/га	9,3	9,3	12,2	25,0	22,1	22,4	16,7
То же + навоз, 60 т/га	6,5	7,5	12,0	24,8	20,7	18,5	15,0
Вспашка ПН-8-35 на 25-27 см	4,0	4,7	8,1	18,5	14,7	9,3	9,9
То же + фосфогипс, 7,5 т/га	7,7	7,9	10,2	19,6	20,3	18,0	14,0
То же + фосфогипс, 7,5 т/га + навоз, 60 т/га	8,2	8,8	11,5	19,8	19,7	18,4	14,4
То же + навоз, 60 т/га	6,9	5,5	12,0	19,8	14,3	10,1	11,4
НСР ₀₅	1,9	1,0	2,3	2,5	1,8	3,3	2,1
НСР ₀₅ обработки	0,9	0,5	1,2	1,2	0,9	1,6	1,0
НСР ₀₅ мелиоранта	0,7	0,4	1,0	1,0	0,7	1,3	0,8
НСР ₀₅ навоза	0,7	0,4	1,0	1,0	0,7	1,3	0,8

6. Влияние доломитовой муки и гипса на физико-химические свойства В1-горизонта дерново-подзолистой почвы

Вариант	Слой колонки	S	H _г	H _{обм}	ЕКО	рН _{КС1}	A1 _{обм} мг/100 г почвы
		мг-экв/100 г почвы					
Контроль	0-10	6,77	8,66	4,01	15,43	3,74	34,8
	10-20	7,05	8,49	4,00	15,54	3,73	33,8
	20-30	6,30	8,40	4,20	14,70	3,73	36,0
	30-40	5,92	8,22	3,80	14,14	3,72	30,7
Гипс в слой 0-20 см по 1,0 Н _г	0-10	7,50	7,17	3,56	14,67	3,67	26,64
	10-20	6,50	7,70	3,74	14,20	3,64	23,76
	20-30	6,20	8,05	3,84	14,25	3,58	32,76
	30-40	6,47	8,22	3,80	14,70	3,57	31,70
Доломитовая мука в слой 0-20 см по 0,5 Н _г	0-10	11,3	4,29	1,01	15,59	4,30	8,75
	10-20	11,4	4,37	0,71	15,77	4,20	5,29
	20-30	7,24	8,84	4,42	16,08	3,73	36,0
	30-40	6,86	9,10	4,20	15,96	3,70	36,0
Доломитовая мука + гипс в слой 0-20 см по 0,5 Н _г	0-10	10,0	3,50	0,36	13,50	4,31	2,88
	10-20	10,6	3,67	0,40	14,27	4,20	3,24
	20-30	7,15	8,38	3,66	15,53	3,53	32,04
	30-40	7,27	7,70	3,90	14,97	3,54	33,30
Доломитовая мука в слой 0-20 см по 1,0 Н _г	0-10	13,63	1,84	0,04	15,47	5,31	0,18
	10-20	13,82	1,66	0,04	15,48	5,40	0,18
	20-24	9,37	5,77	2,40	15,14	Не опр.	20,9
	24-30	7,33	8,57	5,00	15,90	3,80	44,1
	30-40	6,58	8,57	5,21	15,15	3,74	45,0
Доломитовая мука в слой 0-20 см по 2,0 Н _г	0-10	14,25	1,22	0,04	15,47	Не опр.	Нет
	10-20	14,26	1,22	0,04	15,48	Не опр.	Нет
	20-30	7,14	8,49	4,80	15,63	3,84	42,5
	30-40	6,58	8,40	5,48	14,98	3,74	45,7

емкость обмена почвы, мг-экв/100 г; К – коэффициент использования гипса на вытеснение обменного натрия с учетом подключения к мелиоративному процессу карбоната кальция почвы.

Для мало-, средне- и многонатриевых солонцов величины К соответственно равны 0,70; 0,80 и 0,90.

При заделке мелиорантов под вспашку мощность мелиорируемого слоя совпадает с глубиной (25-30 см); при внесении под глубокое рыхление она может быть уменьшена до 20 см. Данные о тесной взаимосвязи приращений урожаев с содержанием обменного натрия в слое 0-20 см подтвердили правильность установленной мощности гипсуемого слоя почвы.

Наиболее высокая окупаемость 1 т фосфогипса прибавкой зерна ячменя установлена при применении оптимальных доз фосфогипса. Отмечена несколько более высокая скорость рас-

соления и рассолонцевания при внесении полной нормы мелиоранта, эквивалентной содержанию обменного натрия.

Химическая мелиорация рекомендуется на лугово-степных и степных мало- и среденатриевых глубококарбонатных и малонатриевых распаханых высококарбонатных глубокогипсовых солонцах, средне- и многонатриевых высококарбонатных глубокогипсовых солонцах. Наиболее эффективно осваивать солонцы нейтрального типа не выше средней степени засоления.

Комплексные приемы химической мелиорации рекомендуются на глубокогипсовых высококарбонатных средне- и многонатриевых солонцах. Они основаны на совместном применении глубоких мелиоративных обработок (на 35-40 см), вовлекающих в солонцовый горизонт карбонат кальция, и не-

больших доз фосфогипса, обеспечивающих улучшение припосевного слоя и благоприятные условия для получения нормальных всходов растений в первые годы мелиорации. В последующем рассолонцевание более глубоких слоев протекает за счет карбоната кальция почвы.

Установлено, что период снижения содержания обменного натрия вдвое в слое почвы 0-20 см при вспашке на 25-27 см и мелиоративных обработках (трехъярусная и плантажная) на 40-42 см составляет соответственно 17-21 и 11-13 лет, при гипсовании – 4,6-9,7 лет. За 7 лет процессы вытеснения обменного натрия из ППК затронули глубину 60-70 см. Не выявлено особых преимуществ какой-либо обработки и гипсования на протекание этого процесса на глубине 30-70 см.

Из-за большей мощности водовмещающего слоя для талой воды рассоление почвенного профиля по мелиоративным обработкам по сравнению со вспашкой на 25-27 см протекало интенсивнее (рис. 2). На гипсованных делянках по мелиоративным фонам скачок в рассолении почвы наблюдался раньше, чем на контрольных. Различия в мощности рассоленного корнеобитаемого слоя почвы стали основной причиной вариации урожайности ячменя во 2-й ротации зернопарового севооборота (табл. 5).

В первой ротации зернопарового севооборота урожайность зерна ячменя определялась мелиоративным и удобрительным действием фосфогипса и удобрительным (в качестве источника фосфора) действием навоза. Удобрительная ценность навоза и фосфогипса проявилась лишь в первой ротации севооборота, а их совместное применение не имело преимуществ перед внесением только фосфогипса. Положительное мелиоративное действие последнего на урожайность культуры по вспашке отмечалось в течение двух ротаций, по мелиоративным – в течение первой. Это обусловлено тем, что по обычной вспашке верхний слой в период посевной бывает более влажным и интенсивнее подвергается коркообразованию.

За счет разбавления гумусового слоя малопродуктивными, засоленными переходными горизонтами и адсорбции на их поверхности гумуса при комплексной мелиорации солонцов по сравнению с обычной химической несколько понижены биологическая активность почвы и размеры излишней минерализации органического веще-

ства.

По фону плантажной вспашки на 40-42 см скачок урожайности ячменя отмечен при поверхностном внесении 5 т/га фосфогипса. Эта доза близка к теоретической (5,5 т/га), рассчитываемой на мелиорацию слоя почвы 0-15 см по средневзвешенному содержанию обменного натрия в слое 0-40 см за вычетом 10 % его от емкости обмена и с учетом коэффициента использования мелиоранта.

Наиболее эффективна следующая технология комплексной мелиорации: 1) внесение фосфогипса разбрасывателями удобрений; 2) вспашка ПЯС-1,4 на глубину 35-40 см; 3) разделка пласта тяжелой дисковой бороной.

Основным фактором, снижающим плодородие и окупаемость удобрений на преобладающих в Нечерноземной зоне дерново-подзолистых почвах, является недостаточная мощность корнеобитаемого слоя для возделываемых культур. Это связано с повышенной кислотностью и токсическим влиянием на развитие корневых систем полевых культур в подпахотных горизонтах подвижных форм алюминия, железа и марганца. При длительном отсутствии дождей, когда запасы продуктивной влаги в пахотном слое исчерпываются, а корни растений не в состоянии проникать в глубокие слои почвы из-за токсического действия названных выше соединений, это ведет к резкому снижению продуктивности культур и окупаемости удобрений [4 - 7].

Зарубежные исследователи для увеличения мощности корнеобитаемого слоя кислых почв предлагают использовать фосфогипс. Передвигающиеся вниз по профилю почвы сульфат-ионы растворенного гипса снижают концентрацию подвижного алюминия за счет образования новой твердой фазы (урбанита), различных комплексных соединений Al с сульфат-ионами, в результате специфической адсорбции сульфатов поверхностью твердой фазы и последующей хемосорбции Al и Fe [8 - 10].

По нашему мнению, мощность корнеобитаемого слоя почвы должна возрасти и в результате известкования, особенно повышенными дозами. Образующиеся при растворении извести карбонат-ионы подвергаются щелочному гидролизу с образованием гидроксил- и бикарбонат-ионов. Первые связывают ионы водорода гидролитической кислотности в мало-диссоциированное соединение (воду), нейтрализуют обменные формы кис-

лотности пахотного горизонта, вторые - в виде бикарбоната кальция способны передвигаться вниз по профилю и связывать токсичный обменный Al в нетоксичные соединения, взаимодействовать с гидроксидами железа и алюминия, формируя отрицательный заряд на их поверхности в виде карбонатов железа и алюминия.

Более высокая мощность корнеобитаемого слоя дерново-подзолистых почв позволит возделываемым культурам без значительного ущерба для урожая и качества продукции переносить длительные периоды засухи, стабилизировать их продуктивность на более высоком уровне, повышать окупаемость удобрений, как это наблюдается на серых лесных почвах Владимирского ополья.

Механизм взаимодействия доломитовой муки и гипса с поглощающим комплексом B1-горизонта дерново-подзолистой почвы изучали в динамических условиях в колонках, в два верхних слоя которых вносились разные виды и дозы мелиорантов (табл. 6) [11]. Через колонку пропускали порциями по 32-40 мл 500 мл воды, что соответствовало выпадению ½ нормы годовых осадков.

По сравнению с контрольной колонкой (без мелиоранта) применение половинной дозы доломитовой муки снизило показатели кислотности лишь в слоях (0-10 и 10-20 см): H_e в 2 раза (с 8,5-8,7 до 4,3-4,4 мг-экв/100 г почвы), величину обменной кислотности и обменного алюминия - в 4-6 раз. Эта доза мелиоранта не обеспечивала понижения обменного алюминия до нетоксичной для растений величины (менее 3-5 мг/100 г почвы) и повышения степени насыщенности основаниями выше 80 %. Мелиорант на снижение НГ почвы был использован на 93,2 %. В силу этого в ниже расположенных слоях не установлено влияния половинной дозы на изменение физико-химических свойств почвы.

Полная доза мелиоранта в условиях опыта также растворилась полностью. Ее применение обеспечило улучшение всех физико-химических показателей в слое внесения до безвредных значений. Коэффициент использования мелиоранта на снижение НГ в слое почвы 0-20 см составил 75 %, 5,8 % мелиоранта затрачено на снижение H_e в слое почвы 20-24 см. При применении полной дозы доломитовой муки наблюдали снижение разных форм кислотности глубже слоя внесения мелиоранта.

В то же время, несмотря на более

высокую растворимость в воде гипса (примерно на 2 порядка) против карбоната кальция и тем более против доломитовой муки, влияние полной дозы гипса на снижение гидролитической кислотности было в 5-5,8 раз ниже полной дозы доломитовой муки и в 3,3 раза ниже половинной дозы. По сравнению с доломитовой мукой гипс весьма слабо снижал и обменную кислотность (на 11,0-6,5 % в слоях колонки 0-10 и 10-20 см). При применении доломитовой муки в дозе 0,5 НГ против контроля этот параметр в указанных слоях снижался в 4-5,6 раз, а полной нормы - примерно в 100 раз (на 2 порядка).

Использование доломитовой муки в половинной дозе в слоях 0-10 и 10-20 см повышало рНКCl на 0,6 единицы, а полной дозы - на 1,6-1,8 единиц рН.

При применении гипса содержание обменного Al в слоях колонки 0-10 и 10-20 см против контроля уменьшилось на 26,5 %, а при внесении доломитовой муки в половинной дозе - на 80 %, в полной - на 99,5 %.

В двух верхних слоях колонки сочетание половинных доз гипса и доломитовой муки по сравнению с половинной дозой последнего мелиоранта обеспечивало снижение обменного алюминия до нетоксичной величины для большинства растений (с 8,75-5,29 до 2,88-3,24 мг/100 г почвы), способствовало дальнейшему снижению кислотности: гидролитической с 4,30-4,40 до 3,50-3,67, а обменной - с 0,71-1,01 до 0,36-0,40 мг-экв/100 г почвы; слабо влияло на рНКCl.

Двойная доза доломитовой муки по сравнению с одинарной не способствовала дальнейшему улучшению физико-химических свойств изучаемой почвы, так как около 40 % внесенного мелиоранта осталось нерастворенным. Однако в этом случае создавались условия для улучшения физико-химических свойств слоев почвы 20-30 и 30-40 см при дальнейшем увлажнении почвы.

Несмотря на более высокую растворимость в воде гипса по сравнению с доломитовой мукой, соответственно более высокую концентрацию двухвалентных ионов кальция и магния в жидкой фазе, при применении гипса снижение как обменной, так и гидролитической кислотностей было далеко не эквивалентным внесенной дозе мелиоранта. Обменная кислотность на 94-96 % была обусловлена ионами алюминия, а H_e на 55-56 % - ионами водорода, преимущественно слабых

кислотных групп органического вещества. Очевидно, ионы кальция гипса не были в состоянии вытеснить как обменный алюминий, так и ионы водорода слабых кислотных групп органического вещества. Один из механизмов действия гипса на снижение обменной кислотности В1-горизонта, по нашему мнению, обусловлен образованием подвижных комплексов алюминия с сульфат-ионами и их передвижением с током влаги в более глубокие слои.

В вариантах контроля и внесения половинной и полной доз доломитовой муки с фильтратом выносятся сравнительно близкое количество двухвалентных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , а при применении двойной дозы – почти в 2 раза более высокое. Средняя концентрация двухвалентных катионов в фильтрате вариантов контроля и возрастающих доз мелиоранта составила соответственно 1,05; 1,13; 1,47 и 2,13 мг-экв/л. В области применения половинной – двойной доз доломитовой муки наблюдалась линейная взаимосвязь концентрации суммы катионов кальция и магния в фильтрате с дозами мелиоранта. Это подтверждает положение о более экономном использовании на снижение почвенной кислотности одинарной дозы мелиоранта против двойной.

В колонке с полной дозой гипса с инфильтрующей влагой вынесено 7,22 мг-экв сульфат-ионов, 7,10 мг-экв кальция и магния и 0,500 мг-экв (4,5 мг) ионов алюминия. Последние, очевидно, передвигались в виде растворимых комплексных соединений алюминия с ионами SO_4^{2-} . Средняя концентрация сульфат-ионов в жидкой фазе по четырем порциям составила 50,7 мг-экв/л. Концентрация фильтрата в 20-40 раз более высокая, чем в случае колонок с доломитовой мукой. Она обладает высоким коагулирующим действием на почвенные коллоиды. Поэтому смеси фосфогипса и карбоната кальция эффективно применять на кислых склоновых серых лесных почвах, характеризующихся высокой предрасположенностью к водной эрозии.

В контрольной колонке содержалось 236,8 мг обменного алюминия, а в колонке с гипсом его осталось 201,0 мг, переместилось с фильтратом – 4,5 мг. Следовательно, около 31,3 мг Al (13,2 %) перешло из обменной формы в необменную. Механизм закрепления последнего твердой фазой почвы пока не ясен. Однако можно полагать, что он связан с взаимодействием ионов Al^{3+} как с сульфатами (SO_4^{2-}), так и с ио-

нами гидроксила (OH^-). О поглощении ионов OH^- твердой фазой почвы может свидетельствовать подкисление порций фильтрата по сравнению с рН H_2O при соотношении почва : вода 1:0,5. Одним из вариантов закрепления Al^{3+} является его осаждение в виде урбани-та $[\text{Al}(\text{SO}_4)_2\text{OH}]$.

Снижение разных форм почвенной кислотности полной дозой доломитовой муки и при комплексном использовании половинных доз ее и гипса установлено и в слоях глубже слоя внесения мелиоранта. Более высокий эффект в нижних слоях почвы установлен при комплексном использовании мелиорантов.

Таким образом, на сильнокислых почвах применение одного гипса в качестве мелиоративного средства по снижению гидролитической и обменной кислотности малоэффективно. В качестве основного мелиоранта необходимо использовать традиционные гидролитически щелочные кальциевые соли или основания (пушонка). Для экономии основных мелиорантов можно дополнять их более дешевыми гипсосодержащими. Комплексное использование на кислых почвах гидролитически щелочных и гипсосодержащих мелиорантов позволит быстрее увеличивать мощность благоприятного для растений корнеобитаемого слоя, полнее обеспечивать их серой, а также фосфором при использовании в качестве гипсосодержащего компонента фосфогипса. Использование последнего улучшает экологическое состояние вблизи предприятий по производству фосфорных удобрений.

Литература

1. Окорков В.В. Коллоидно-химические исследования солонцов Северного Казахстана и опыт их химической мелиорации. Автореф. дис. ...доктора сельскохозяйственных наук. М., 1990. – 39 с.
2. Окорков В.В. Солонцы и их коллоидно-химическая природа. Владимир: Изд-во РАСХН, Владимирский НИИ-ИХХ, 1994. – 240 с.

V.V.Okorkov. THE USE OF PHOSPHOGYPSUM IN AGRICULTURE

The article shows the techniques and methods of use of phosphogypsum to improve the fertility of the soil. The economic efficiency and environmental safety of phosphogypsum are considered.

Keywords: phosphogypsum, salt licks, soil fertility, crop, exchangeable sodium, the intensity of desalination, integrated improvement.

3. Окорков В.В. Использование гипса на солонцах. Суздаль: Изд-во РАСХН, Владимирский НИИИХХ, 1995. – 282 с.

4. Известкование кислых почв. Под ред. Н.С. Авдониной, А.В. Петербургского, С.Г. Шедерова. М.: Колос, 1976. – 304 с.

5. Окорков В.В. Состояние плодородия почв и пути его стабилизации в современных условиях//Владимирский земледелец, 2002, № 1 (26).- С. 14-17.

6. Окорков В.В. Перспективы и пути использования фосфогипса для повышения плодородия кислых почв. Владимир, 2007. – 76 с.

7. Окорков В.В., Коннов Н.П. Основы химической мелиорации кислых почв. Владимир. 2008. – 248 с.

8. Farina M.P.W., Channon P. Acid-subsoil amelioration II. Gypsum effects on growth and subsoils chemical properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, № 52. P. 175-180.

9. Radcliffe D.E., Clark R.L., Sumner M.E. Effect of gypsum and deep rooting perennials on subsoil mechanical impedance. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, № 50. P. 1566-1570

10. Reeve N.G., Sumner M.E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching surface applied amendments. Agrochemophysica 4, 1972. – P. 1-6.

11. Окорков В.В., Окоркова Л.А. О взаимодействии извести и гипса с ППК кислых почв// Владимирский земледелец, 2012, № 1 (59). – С. 2-6.

12. Киришин В.И., Верещагин А.Н., Еськов А.И., Окорков В.В. Химическая мелиорация солонцов в степной зоне Казахстана//В сб.: Теоретические основы и опыт химической мелиорации солонцовых почв, ВНИИЗХ, Целиноград, 1982.

13. Окорков В.В., Верещагин А.Н. Пути повышения эффективности химической мелиорации//Вестник с.-х. науки Казахстана, 1987, № 8.