

УДК 631.6:632.122

## ПРИЕМЫ СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ПРИ ХИМИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ И ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.И. ОКОНСКИЙ, Е.И. ШЕСТАКОВ, В.А. ЧЕРНИКОВ, Н.П. ПАНОВ,  
В.А. ВЕЛИЧКО

(Кафедры экологии и почвоведения)

Для химической мелиорации почв предлагается использовать высокоэффективные в агрохимическом отношении мелиоранты, прошедшие отбор в соответствии с предлагаемой нами системой агроэкологических ограничений (САО). Показаны некоторые приемы, позволяющие снизить возможное негативное влияние (с экологической точки зрения) от применения мелиорантов. Одним из таких приемов является использование цеолитов, внесение которых в почву сопровождается существенным (на 20—60%) снижением аккумуляции растениями стронция, никеля, хрома, марганца.

К важнейшим факторам низкоплодородия почв относится неблагоприятная реакция среды. Многочисленные научные исследования свидетельствуют, что наиболее действенным способом оптимизации рН кислых и солонцовых почв является их химическая мелиорация. Другие приемы, направленные на оптимизацию реакции почвенной среды этих земель, особенно сильноокислых и щелочных (внесение различных форм минеральных и органических удобрений, агромелиоративные обработки, фитомелиорация и пр.), не решают в необходимой мере эту проблему. Масштабы применения традиционных хими-

ческих мелиорантов (известняковой и доломитовой муки, гипса) в России не достигли достаточного уровня. Более того, в последнее время они сократились по различным причинам, в основном экономическим, до уровня начального этапа мелиоративных работ. В результате структура почв сельскохозяйственных угодий по кислотно-основным свойствам еще далека от оптимальной, поэтому для ее улучшения необходимо постоянно увеличивать применение кальцийсодержащих мелиорантов до объемов, адекватных увеличивающимся темпам подкисления или подщелачивания. В регионах Поволжья и За-

волжья вследствие нарушения мелиоративных технологий (прежде всего оросительных) ежегодно возрастают площади вторично-осолонцованных и засоленных земель. Проведение мероприятий по повышению плодородия земель этих территорий сдерживается дефицитом недорогих кальцийсодержащих удобрений, среди которых перспективно применение ряда альтернативных химических мелиорантов.

В качестве последних многие исследователи предлагали использовать крупнотоннажные кальцийсодержащие промышленные отходы (КПО), хранилища и отвалы которых имеются практически во всех регионах России. Их рекомендации основывались на многочисленных экспериментах, доказавших высокую почвенно-агрохимическую эффективность некоторых видов КПО, проявляющуюся в оптимизации реакции почвенной среды, коррекции состава почвенно-поглощающего комплекса в благоприятную сторону, улучшении химических и физических свойств мелиорируемых почв. Кроме того, многие отходы улучшали и пищевой режим почв, поскольку содержали ценные макро- (фосфор, калий) и микроэлементы (бор, молибден, цинк, медь, кобальт и др.). Использование КПО было и значительно более дешевым приемом по сравнению с применением традиционных мелиорантов промышленного производства.

Наряду с этим известно, что многие виды КПО содержат целый ряд нежелательных примесей, в частности тяжелых металлов

(ТМ), балластных элементов (БЭ) (табл. 1). В связи с этим есть все основания полагать, что применение КПО, особенно в высоких дозах, будет сопровождаться накоплением в агроэкосистемах ТМ. Поэтому использование конкретного промтохода в указанных целях должно основываться не только на агрохимической, но и на токсикологической оценке. Однако особо отметим, что проблему возможного загрязнения агроландшафтов ТМ и БЭ при внесении в почву отходов в качестве мелиорантов не нужно чрезмерно преувеличивать как неразрешимую. Конечно, она должна быть всегда в зоне самого пристального внимания, однако последствия, вызываемые химической мелиорацией, необходимо оценивать объективно, с реальных позиций.

Во-первых, и в природных мелиорантах содержится некоторое количество ТМ. Так, содержание свинца и марганца в известняке (из которого производят известняковую муку) и фосфорных удобрениях часто бывает выше, чем в некоторых отходах (табл. 1). Во-вторых, очевиден другой, гораздо более значимый путь поступления в агроэкосистемы ТМ — это аэральное загрязнение от различных промышленных объектов (горно-обогатительных комбинатов и карьеров по добыче полиметаллических руд, предприятий по выплавке и переработке черных и цветных металлов, цементных заводов, ТЭЦ, автотранспорта и т.д.) [13, 20, 24, 25]. Например, при оценке загрязнения почв Бельгии тяжелыми металлами установлено [23], что с

Таблица 1

Содержание потенциально опасных примесей (мг/кг)  
в некоторых промышленных отходах и удобрениях

Удобрение, отход	B	Sr	Ti	Mn	V	Ni	Cu	Zn	Pb	Cr	Co	Cd
Фосфатные удобрения [10]	—	25–500	—	40–2000	—	—	—	50–1450	7–225	66–245	—	1–170
Известняк [8]	—	600	—	40–1200	—	—	—	—	20–1250	10–15	—	—
Зола ирша-бординских углей [12]	600	20000	100	1200	2	8	40	100	30	100	—	—
Зола азейских углей [18]	200	—	800	800	70	—	60	50	6	40	6	—
Буроугольная зола различных углей [11]	182	—	—	—	75	29	63	65	19	40	29	—
Зола бурых и каменных углей различных месторождений [13]	4400	1500	9200	755	500	297	411	1226	281	70	60	—
Фосфогипс Балаковского химзавода [12]	20000–30000	—	150–400	30–200	1	—	6–80	—	3–16	0–3	—	—
Фосфогипс Невинномысского п/о «Азот» [12]	30000–35000	—	300	35–80	1	15	15	—	5–40	30	—	5–15

осадками и дымом от промышленных предприятий в почву на 1 га в год попадает мышьяка в 10 раз, кадмия — в 26, цезия — в 16, свинца — в 83, олова — в 97 раз больше, чем в результате применения минеральных удобрений. На долю плавильных заводов цветной металлургии в загрязнении окружающей среды кадмием, медью и цинком приходится 50—60%, а с учетом предприятий по производству и переработке железа и стали — до 70% и более [25]. Считается, что загрязнение окружающей среды такого рода носит импактный характер и не имеет широкого распространения. Однако некоторые авторы отмечают, что влияние подобных предприятий на загрязнение почв ТМ наблюдается в направлении преобладающего ветра примерно в 18—20 км [13, 24] и даже в 30 км [20] от источника. При этом максимальное загрязнение, когда наступает изменение реакции среды и химического состава почв, наблюдается на расстоянии до 4—6 км.

Простейшие расчеты показывают, что площадь зоны максимального загрязнения почв ТМ может достигать 5 тыс. га, а площадь зоны, за пределами которой загрязнение от деятельности одного предприятия можно считать фоновым, — около 100 тыс. га. При этом количество аэриальных выпадений зависит от профиля предприятия и составляет до нескольких тонн на 1 га в год. Так, ежегодная масса выпадений вблизи цементного завода может достигать 7,2 т/га в год [3], причем на расстоянии 1,5 км от завода

более половины таких элементов, как стронций, магний, марганец, кадмий, никель, кобальт и медь, находится в легкорастворимой форме.

В научной литературе имеются данные о возможности применения буроугольной золы и фосфогипса для химической мелиорации почв, поэтому приведем примеры загрязнения экосистем электростанциями, а также отвалами золы и фосфогипса.

Так, за 20 лет эксплуатации Назаровской ГРЭС площадь ареала техногенного рассеяния элементов, выделяемых по накоплению их в почвах, составила 20000 га, а в снеге — 50000 га [6]. В почвах этого ареала повышено содержание Ca, Sr, Ba, Ni, Cu, V, что определяется большими объемами выбросов (от 5 до 10 т/га твердого вещества ежегодно, или более 100 т/га за период эксплуатации). В связи с этим резко изменились состав грунтовых вод, свойства и состав почв, растительного покрова.

Другие данные [7] также подтверждают, что ежегодное выпадение 5—10 т выбросов Назаровской ГРЭС в расчете на 1 га значительно изменило ландшафтно-геохимические условия уже в первые 10—20 лет.

В общем виде судьба ТМ при аэральном техногенном загрязнении почв, а также при их химической мелиорации с помощью КПО может быть представлена в следующем виде. При попадании твердых промышленных выбросов в почву начинается их интенсивный гидролиз с высвобождением продуктов распада, в том чис-

ле ТМ и БЭ. При этом часть металлов может обменно или необменно сорбироваться почвенно-поглощающим комплексом, часть — оставаться в почвенном растворе. Некоторые элементы (например, йод) могут активно поступать в растения непосредственно через листья. Весьма вероятно, что количество ТМ в пахотном слое будет со временем уменьшаться, что обуславливается как их миграцией в нижележащие горизонты, так и биологическим выносом этих элементов с урожаем.

На наш взгляд, поведение ТМ при загрязнении почв твердокомпонентными промышленными выбросами, а также при использовании промтоходов в качестве мелиорантов может быть представлено в виде блок-схемы, которая дополняет схему, приведенную в работе [5].

Некоторые промышленные предприятия, например тепловые электростанции, могут не только загрязнять прилегающие территории стабильными изотопами ТМ, но и служить источником радионуклидного загрязнения. Так, вблизи одной из ТЭС радиус аномальной зоны для урана составил 3—4 км, для тория — 7 км. При загрязнении водоразделов и склонов речной долины наблюдалась миграция радионуклидов в пойму реки с жидким и твердым стоком и обогащение ими гидросети [19].

Большую опасность представляют не только сами действующие предприятия, но и отвалы и хранилища, например, золошлаковых отходов ТЭЦ, поскольку дальность перелета зольных час-

тиц в направлении господствующих ветров может достигать 30 км [1]. Часто применяющийся метод гидрозолоудаления также является опасным с экологической точки зрения, так как при этом происходит активная горизонтальная и вертикальная миграция водорастворимых элементов (в том числе ТМ), образующихся при гидролизе золы.

Отвалы и хранилища фосфогипса также существенно влияют на окружающую обстановку. Так, вода, скапливающаяся в отрицательных элементах рельефа на прилегающих к отвалам участках, имеет сильноокислую реакцию (рН 2 и меньше) за счет находящейся в этом отходе фосфорной кислоты. Кроме того, происходит заметное обогащение прилегающих территорий фтором и стронцием, в значительных количествах входящих в состав фосфогипса.

Ситуация еще более обостряется, когда техногенному загрязнению подвергаются почвы с недостаточным или избыточным содержанием тех или иных элементов (почвы так называемых биогеохимических провинций). На таких территориях могут заметно проявляться нарушения нормального обмена веществ у растений, животных и человека, что приводит к развитию специфических заболеваний — биогеохимических эндемий. Например, к ним относится своеобразное эндемическое заболевание — урвовская болезнь, характеризующаяся дисфункцией нейроэндокринной системы, полиартрозом и остеодистрофией, обусловленных дефици-

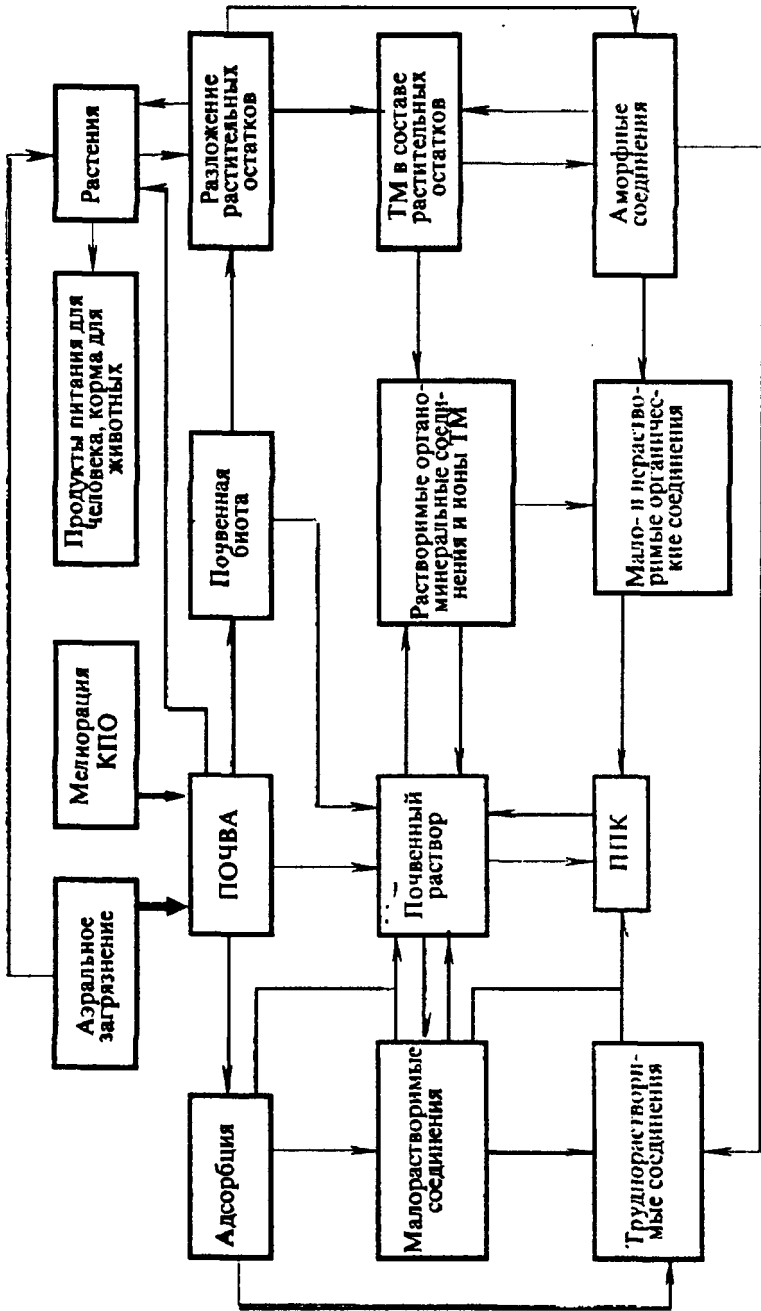


Схема поведения тяжелых металлов при химической мелиорации и аэральном загрязнении почв.

том в кормах и воде кальция, фосфора, меди, йода и избытком в них стронция, бария, марганца [21].

В зоне широкого распространения солонцов и солонцовых комплексов Барабинской низменности и северной части Кулундинской степи выделяется обширная провинция с пониженным содержанием кальция и фосфора в растительности основных сенокосов и пастбищ [14]. Имеются данные [2], что на примыкающих к этим районам солонцовых комплексах Омской области с недостаточным содержанием кальция в почве и избыточным содержанием стронция в грунтовых водах (превышающим в 2—3 раза его ПДК в.в.) отношение кальция к стронцию в сене, а также в зерне и соломе ячменя составляло соответственно 46, 30 и 44, тогда как нормальным соотношением считается 80 [12], а в злаковом сене Аскании-Нова, принятым за эталон, это отношение равняется 160.

Несмотря на это, в последние годы разработаны различные рекомендации по химической мелиорации солонцовых почв Западной Сибири фосфогипсом, дозы которого на злостных содовых солонцах могут достигать 40 т/га и более. Вместе с тем отход содержит значительное количество стронция (табл. 1), поэтому внесение его увеличивает и без того очень высокое содержание этого элемента в почвах. Тем не менее уже многие тысячи гектаров солонцовых земель улучшены именно фосфогипсом. Вероятно, в настоящее время необходимо проведение агроэкологического мони-

торинга мелиорированных земель и выделение территорий, требующих проведения мероприятий, обеспечивающих уменьшение доступности стронция сельскохозяйственным растениям.

Таким образом, анализ литературных данных свидетельствует, что техногенная нагрузка на почвы при их загрязнении в результате промышленных выбросов в атмосферу, а также пыления из отвалов может многократно превышать дозы некоторых отходов (например, золы и фосфогипса), применяющихся в качестве химических мелиорантов. С другой стороны, очевидными негативными последствиями сопровождаются и неразумное, необоснованное проведение химической мелиорации с применением высоких и сверхвысоких доз химических почвоулучшителей, в качестве которых используются промышленные отходы (например, фосфогипс), особенно в регионах со сложной биогеохимической обстановкой.

Тем не менее, на наш взгляд, в настоящее время это не должно являться основанием для полного и повсеместного отказа от применения КПО в качестве химических мелиорантов кислых и солонцовых почв — прежде всего из-за катастрофической нехватки природных кальцийсодержащих материалов (которые тоже могут содержать заметные количества ТМ [8]) и их очень высокой стоимости. При этом особо отметим, что применение КПО в сельском хозяйстве, являющееся по сути одним из путей их утилизации, не должно стать самоцелью — «ути-

лизацией любой ценой». Подчеркнем, что предусматривается именно разумное использование таких материалов, при котором должен работать хорошо известный принцип — «нет опасных элементов, есть их опасные концентрации».

Из всего многообразия промходов должны применяться лишь те, что обладают высокой агрохимической эффективностью и прошли жесткий отбор в соответствии с предлагаемой нами системой агроэкологических ограничений (САО). Данная система должна включать, по нашему мнению, по крайней мере следующие позиции:

- агроэкологический мониторинг территорий, на которых предполагается проведение химической мелиорации (с целью выяснения возможности применения этого приема с экологической точки зрения);

- химическое тестирование кальцийсодержащих промышленных отходов с целью определения их химического состава и изучения поведения нежелательных примесей в системе мелиорант (КПО) — почва — растение — грунтовые (дренажные) воды в условиях модельных, вегетационных и полевых экспериментов;

- проведение биологического тестирования промышленных отходов с использованием широкого спектра тест-объектов;

- почвенно-агрохимическая оценка конкретного КПО в сравнении с традиционным химическим мелиорантом;

- сравнительное изучение вли-

яния КПО и традиционных мелиорантов на урожайность различных сельскохозяйственных культур;

- разработка приемов регулирования поступления ТМ в растения и технологических регламентов, позволяющих снизить возможное негативное последствие от использования КПО.

Однако можно предположить, что применение даже отобранных на основе САО некоторых видов отходов в ряде случаев может сопровождаться определенными негативными последствиями. В связи с этим можно предложить некоторые приемы, которые в значительной степени снизят нежелательный эффект КПО:

- чередование применения КПО и природных мелиорантов в циклах известкования и гипсования почв;

- дробное внесение расчетной дозы КПО (часть дозы — в 1-й год, часть — во 2-й и (или) 3-й);

- применение КПО на слабокислых почвах и малонатриевых солонцах, требующих относительно невысоких доз мелиорантов (от 2—3 до 5—8 т/га);

- возделывание в первые 2—3 года на мелиорированных отходами почвах технических, а не овощных, кормовых и зерновых культур;

- применение КПО при лесоразведении (в лесопитомниках, лесонасаждениях, лесополосах) и цветоводстве (в открытом и защищенном грунте);

- комбинированное внесение химических мелиорантов (часть дозы — в виде отхода, часть — в виде природных материалов);



— совершенствование методов расчета доз мелиорантов для солонцовых почв;

— применение КПО совместно с сорбентами органической и неорганической природы, которые будут поглощать тяжелые металлы, содержащиеся в отходах.

На наш взгляд, каждый из этих путей является достаточно приемлемым и эффективным. Особое внимание мы хотим уделить последнему приему. Проведенные нами исследования позволяют сделать вывод о высокой эффективности использования в этих целях уникальных природных сорбентов — цеолитов. Сочетание этого приема с другими из перечисленных выше методов позволит, вероятно, полностью исключить возможные негативные последствия от использования КПО.

Важно отметить, что модифицированные формы клиноптилолитов (калиевые, аммонийные, натриевые) имеют большую селективность и емкость по отношению к некоторым тяжелым металлам (в частности, стронцию), чем природные цеолиты [9, 15]. Кроме того, получены обнадеживающие результаты по применению природных цеолитов в качестве носителей некоторых перспективных гербицидов [5].

В связи с отмеченным выше большой интерес представляет совместное использование КПО и модифицированных цеолитов, насыщенных различными удобрениями (калийными, азотными) и гербицидами. В этом случае полученная смесь отходов и природных сорбентов представляет по

сути новый тип мелиоранта, обладающего комплексным действием:

— экологическим (блокирование поступления ТМ из отходов-мелиорантов в растения и грунтовые воды);

— физико-химическим (обменные реакции между щелочно-земельными катионами мелиоранта и поглощенными катионами  $H^+$  и  $Na^+$  почвенно-поглощающего комплекса; сорбция ионов  $Na^+$  из почвенного раствора солонцовых почв);

— удобрительным (элементы питания растений, содержащиеся в КПО и модифицированном цеолите);

— защитным по отношению к растениям (химические средства защиты растений, содержащиеся в цеолите);

— общим почвоулучшительным (регулирование водного и водно-солевого режимов почв, улучшение их химических, физических и физико-химических свойств и пр.).

В последние годы интерес к применению цеолитов в сельском хозяйстве, в частности растениеводстве, заметно возрос. Однако целью большинства работ такого рода является лишь изучение влияния цеолитов на урожай сельскохозяйственных культур и его качество (в открытом и защищенном грунте), а также определение возможности их применения в качестве заменителей традиционных химических мелиорантов. Фундаментальным вопросам изучения кинетики и статики, а также механизмов ионного обмена между цеолитами и почвой (поч-

венным раствором) не уделяется должного внимания.

Вместе с тем широко используются методы численного и экспериментального моделирования процессов ионного обмена в многокомпонентных системах, в частности при решении задач очистки питьевой или технологической воды, газов и т.д. с помощью цеолитов [4]. Однако, по имеющимся данным [4], даже в этом случае перенос результатов экспериментов на реальные системы представляет большую трудность прежде всего из-за несоответствия их физико-химических параметров, а также изменчивости во времени. Применение же цеолитов в такой многофункциональной и поликомпонентной системе, как почва, создает огромные трудности для математического описания процессов ионного обмена даже в модельных или вегетационных опытах, где некоторые параметры можно с достаточной степенью достоверности контролировать. Эти трудности обусловлены следующими причинами:

— активным действием биотического фактора (влияние микроорганизмов, корневых выделений, бактериальных слизей, продуктов разложения растительных и животных организмов);

— активным действием антропогенного фактора (внесение минеральных и органических удобрений, мелиорантов, техногенное загрязнение и пр.), изменяющего состав и свойства почв во времени;

— наличием не одной, а трех фаз раздела: цеолит — почвенный раствор, цеолит — твердая фаза

почвы, цеолит — почвенный воздух;

— наличием в почвенном растворе самых разных форм (ионная и молекулярная формы, комплексы, ассоциаты, коллоиды) минеральных и органических (специфической и неспецифической природы) соединений различной молекулярной массы, причем один и тот же элемент может присутствовать во всех указанных формах;

— присутствием в почвенном растворе, особенно в засоленных почвах, конкурирующих ионов;

— значительной амплитудой колебаний температуры воздуха (суточной, месячной, годовой) и парциального давления газов в составе почвенного воздуха ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и т.д.);

— заметным варьированием влажности и форм влаги в почве;

— изменением реакции почвенной среды, окислительно-восстановительного и дзета-потенциала, обусловленным сезонной динамикой, а также внесением мелиорантов и удобрений.

Совершенно не разработан также вопрос о дозах цеолитов. В научной литературе имеются данные об использовании от нескольких до 150—300 т природных сорбентов на 1 га. Конечно, дозы во многом определялись задачами, стоящими перед исследователями, но общий подход к этому вопросу должен быть определен.

При использовании предлагаемого нами способа совместного внесения природных сорбентов и КПО следует иметь в виду, что количество цеолита должно быть достаточным для обеспечения эффективной сорбции ТМ и БЭ,

привносимых с КПО (в частности, Sr при использовании золы и фосфогипса). С другой стороны, доза не должна быть слишком высокой, чтобы мелиоративные работы были экономически эффективными. Кроме того, наши, а также литературные данные [16] свидетельствуют, что внесение высоких доз цеолитов сопровождается сорбцией кальция из известь- и гипсосодержащих материалов, что может привести к ослаблению мелиоративного процесса в почве. Следует также учи-

тывать, что цеолиты могут достаточно активно сорбировать элементы питания ( $K^+$ ,  $NH_4^+$ ) из почвенного раствора, что вызывает дополнительные проблемы питания растений.

Не исключая другие подходы к методам расчета дозы природных сорбентов, применяемых совместно с КПО, мы предлагаем в первом приближении определять ее исходя из дозы отхода-мелиоранта, содержания в нем тяжелых металлов и емкости катионного обмена цеолита:

$$D_{\text{ц}} = \frac{D_{\text{м}}}{e_{\text{ц}} K_{\text{ц}}} \cdot \left( \frac{C_1}{\Xi_1} + \frac{C_2}{\Xi_2} + \dots + \frac{C_i}{\Xi_i} \right), \text{ или } D_{\text{ц}} = \frac{D_{\text{м}}}{e_{\text{ц}} K_{\text{ц}}} \cdot \sum \frac{C_i}{\Xi_i},$$

где  $D_{\text{ц}}$  — доза цеолита, т/га;  $D_{\text{м}}$  — доза мелиоранта КПО, т/га;  $C_1 \dots C_i$  — содержание тяжелых металлов и балластных элементов в КПО, кг/т;  $e_{\text{ц}}$  — емкость катионного обмена цеолита, кг · экв/т;  $K_{\text{ц}}$  — содержание чистого цеолита в породе (туфе), в долях от 1 (обычно  $K_{\text{ц}} = 0,7 - 0,9$ );  $\Xi_1 \dots \Xi_i$  — эквивалентная масса тяжелых металлов и балластных элементов, содержащихся в КПО.

Так, при использовании буроугольной золы и фосфогипса в качестве химических мелиорантов, содержащих стронция существенно больше, чем других потенциально опасных примесей (содержанием которых из-за этого можно пренебречь), формула приобретает следующий вид:

$$D_{\text{ц}} = \frac{D_{\text{м}} C_{\text{Sr}}}{44 E_{\text{ц}} K_{\text{ц}}}.$$

Рассчитанные по этой формуле дозы цеолитов, применяемые

нами совместно с золой и фосфогипсом в вегетационных экспериментах, составляли соответственно 10 и 15 т/га.

Для более точного расчета дозы цеолита в формулу следует ввести несколько дополнительных коэффициентов, в частности коэффициент селективности, а также коэффициент, учитывающий изменение емкости поглощения по отношению к определенному металлу вследствие присутствия в растворе не только минеральных, но и органических соединений (специфической и неспецифической природы) и конкурирующих ионов. Для количественного определения этих коэффициентов необходимо проведение дополнительных модельных физико-химических экспериментов на конкретной почве, улучшаемой определенным мелиорантом (с известными химическими характеристиками) совместно с конкретным типом цеолита.

Необходимо отметить, что один из упомянутых выше факторов, а именно органическое вещество почвы, может играть значительную роль в процессах сорбции — десорбции на цеолитах, поскольку сами гумусовые вещества могут селективно поглощать ТМ из почвенного раствора. В молекулах гуминовых кислот установлены различные по природе функциональные группы, среди которых большое значение имеют карбоксильные и фенолгидроксильные, предопределяющие реакционную способность гуминовых кислот и их участие во всех реакциях взаимодействия с минеральной частью почвы. Содержание этих групп в гуминовых кислотах очень велико — до 600—800 мг · экв/100 г, поэтому есть все основания полагать, что при загрязнении почв ТМ последние будут представлены не только минеральными, но и органо-минеральными формами. Кроме того, при разложении растительных остатков сельскохозяйственных культур, выращенных на загрязненных ТМ почвах, также будут образовываться органо-минеральные формы тяжелых металлов. Наши, а также литературные данные свидетельствуют, что металлы в составе растительных остатков обладают повышенной биологической доступностью. Так, коэффициент использования цинка растениями риса из состава растительных остатков был в 1,5—3,0 раза больше, чем из цинк-содержащих промышленных отходов, используемых для мелиорации такыривидных засоленных

почв [26]. При этом доступность цинка в составе растительных остатков будет иметь пролонгированный характер, так как в почве остается мощная корневая система, в которой было аккумуляровано до 70% цинка, поглощенного целым растением.

В других наших экспериментах по искусственному загрязнению кислых дерново-подзолистых почв некоторыми ТМ органо-минеральные соединения образовывались, вероятно, достаточно интенсивно, поскольку металлы вносили в легкоподвижной (водорастворимой) форме. В этом случае внесение цеолита в дозах 10—15 т/га (месторождение Хекордзула) не приводило к уменьшению масштабов миграции некоторых ТМ (в частности, кадмия и свинца) по сравнению с контролем. Скорее всего сорбции ТМ цеолитом не происходило из-за того, что металлы присутствовали в почвенном растворе преимущественно в органической, а не в минеральной форме. Напротив, цеолиты обладали ярко выраженными сорбционными свойствами, когда ТМ вносили в составе промышленных отходов — химических мелиорантов почв (буроугольной золы, фосфогипса). Так, при химической мелиорации сильнокислых ( $pH_{\text{соль}} 4,0$ ) дерново-подзолистых почв буроугольной золой Ирша-Бородинского месторождения КАТЭК, содержащей заметные количества стронция, наблюдалось в 1-й и 2-й годы опыта существенное уменьшение миграции этого элемента из пахотного горизонта при использовании расчетной дозы цеолита —

соответственно на 32 и 36% по сравнению с вариантом без цеолита (табл. 2). Происходило и значительное уменьшение содержания стронция в растениях: при

внесении в почву расчетной дозы цеолита его содержание в зеленой массе кукурузы уменьшалось на 59%, а в зерне и соломе овса — на 31% (табл. 3).

Т а б л и ц а 2

**Вынос стронция (мг/сосуд) с промывными водами при химической мелиорации дерново-подзолистых почв золой бурых углей и использовании цеолита в 1-й (числитель) и 2-й (знаменатель) годы опыта**

Вариант	№ промывки вегетационных сосудов					Всего за 2 года
	I	II	III	IV	всего	
Зола	<u>0,60</u>	<u>0,29</u>	<u>0,51</u>	<u>0,41</u>	<u>1,81</u>	5,87
	1,36	1,20	1,50	—	4,06	
Зола + цеолит* (1/3 дозы)	<u>0,60</u>	<u>0,26</u>	<u>0,35</u>	<u>0,33</u>	<u>1,54</u>	5,46
	1,30	1,39	1,23	—	3,92	
Зола + цеолит (1 доза)	<u>0,47</u>	<u>0,18</u>	<u>0,35</u>	<u>0,23</u>	<u>1,23</u>	3,84
	1,07	0,85	0,69	—	2,61	

\* Размер гранул цеолита в опыте 0,3—1,6 мм.

Т а б л и ц а 3

**Содержание стронция (мг/кг) в растениях кукурузы (числитель, 1-й год) и овса (знаменатель, 2-й год) и их урожай при химической мелиорации дерново-подзолистых почв золой бурых углей и использовании цеолита**

Вариант	№ отбора проб				Урожай		
	I	II	III	IV	общий	зерно	солома
Зола	<u>483</u>	<u>340</u>	<u>341</u>	—	<u>301</u>	—	—
	373	440	284	299	354	53	579
Зола + цеолит (1/3 дозы)	<u>420</u>	<u>241</u>	<u>199</u>	—	<u>288</u>	—	—
	372	—	270	310	330	60	575
Зола + цеолит (1 доза)	<u>244</u>	<u>170</u>	<u>153</u>	—	<u>122</u>	—	—
	306	375	249	200	232	36	401

\* Средневзвешенное содержание стронция в надземной биомассе овса.

В другом вегетационном опыте, где для химической мелиорации сильнокислых дерново-подзолистых почв использовали феррохромовый шлак, внесение расчетной

дозы цеолитов привело к уменьшению содержания некоторых тяжелых металлов в зеленой массе кукурузы: стронция, никеля и марганца — на 30%, хрома — на

23, меди — на 13% (табл. 4). Наблюдалось одновременно улучшение качества сельскохозяйственной продукции по отношению

Ca : Sr, хотя даже в варианте с применением шлака без цеолита оно было достаточно благополучным (> 80).

Т а б л и ц а 4

Содержание некоторых металлов (мг/кг) в зеленой массе кукурузы при химической мелиорации дерново-подзолистых почв феррохромовыми шлаками и использовании цеолитов

Вариант	Cr	Mn	Cu	Ni	Sr	Ca : Sr
Контроль (НРК)	2,4	76,0	8,8	—	13,5	236
Феррохромовый шлак	2,2	103,0	4,6	1,7	17,2	219
Феррохромовый шлак + цеолит*	1,7	72,4	4,0	1,2	11,8	295

\* Размер гранул цеолита 0,3—1,6 мм.

Высокая эффективность действия цеолита в указанных двух экспериментах объясняется, видимо, тем, что ТМ были внесены не в водорастворимой, а в достаточно труднодоступной форме. В этом случае при постепенном гидролизе частиц мелиоранта (золы, шлака) высвобождаются прежде всего минеральные формы ТМ, которые именно на данном этапе их дальнейшей трансформации (образование ассоциатов, комплексов, органо-минеральных соединений, коллоидных осадков и пр.) сорбируются цеолитами.

Таким образом, результаты исследований позволяют сделать вывод, что для уменьшения возможных негативных последствий (с экологической точки зрения) от применения в качестве химических мелиорантов почв высокоэффективных в агрохимическом отношении кальцийсодержащих промышленных отходов, а также для рекультивации техногенно загрязненных почв могут быть

использованы уникальные природные сорбенты — цеолиты. Их вид должен определяться конкретным набором металлов-загрязнителей, поскольку эффективная сорбционная емкость и селективность к тем или иным ТМ сильно зависит от состава цеолитовых минералов (и, следовательно, месторождения природных сорбентов) [4, 9]. Заметим, что в этом случае внесение цеолитов может быть дорогостоящим мероприятием, однако полученная продукция будет соответствовать требуемому качеству (с точки зрения содержания ТМ).

Конечно, имеются и другие пути снижения подвижности ТМ в почве, в частности известкование. Весьма вероятно, что внесение известковых удобрений в сильнокислые почвы, загрязненные ТМ, заметно снизит подвижность последних, уменьшит транслокацию и будет экономически более эффективным, чем внесение цеолитов. Однако на загрязненных поч-

вах, не требующих известкования (при реакции среды, близкой к нейтральной), данный прием не может быть рекомендован, поэтому на такого рода землях использование природных сорбентов представляет, видимо, наиболее реальный путь их рекультивации.

Таким образом, применение цеолитов на техногенно загрязненных почвах отдельно, а также совместно с химическими мелиорантами почв — отходами промышленности (отобранными в соответствии с системой агроэкологических ограничений) — может служить одним из приемов, позволяющих активно регулировать поведение тяжелых металлов в системе почва — растение — дренажные (грунтовые) воды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Баснина Л.В. и др.* Рациональное использование и охрана природных ресурсов Северного и Центрального Казахстана. Алмата: Кейнар, 1981, с. 138—140. — 2. *Березин Л.В., Сабаева О.Б., Токарева Г.М.* Окультуривание и использование солонцовых и засоленных земель лесостепной зоны. — Рекомендации СибНИИСХ, Омский с.-х. ин-т. Омск: Книжн. изд-во, 1986, с. 37—44. — 3. *Берзиня Д.Ж., Берзиня А.Я.* Воздействие выпадений цементного завода на почву и растения. — Тез. докл. по теме: Влияние пром. предприятий на окружающую среду. Всес. шк., Звенигород, декабрь 1984 г. Пушкино, 1984, с. 31—33. — 4. *Богданова В.И., Белицкий И.А.* Некоторые проблемы оценки

ионообменной способности цеолитсодержащих пород и возможностей их практического использования. — В сб.: Использование природных цеолитов в народном хозяйстве. Мат. Всес. совещ. Кемерово—Новостройка, апрель 1990 г. Новосибирск, 1991, ч. 1, с. 82—97. — 5. *Давыдов А.М. и др.* Использование природных цеолитов для получения гранулированных гербицидов. — В сб.: Использование природных цеолитов в народном хозяйстве. Мат. Всес. совещ. Кемерово-Новостройка, апрель 1990 г. Новосибирск, 1991, ч. 1, с. 199—201. — 6. *Давыдова Н.Д.* Техногенное вещество выбросов ТЭС, его превращение и распределение в ландшафтах. — Тез. докл. 1-го Всес. совещ. «Геохимия техногенеза». Иркутск, октябрь 1985 г. Иркутск, 1985, т. II, с. 24—28. — 7. *Давыдова Н.Д., Волкова В.Г.* Основные аспекты прогноза воздействия ТЭС КАТЭК на ландшафты. — Тез. докл. 1-го Всес. совещ. «Геохимия техногенеза». Иркутск, октябрь 1985 г. Иркутск, 1985, т. I, с. 68—73. — 8. *Ефремов Е.А., Носиков В.В.* Контроль за содержанием тяжелых металлов в удобрениях и химических мелиорантах почвы. — В сб. науч. тр.: Влияние химизации земледелия на содержание тяжелых металлов в почвах с.-х. угодий и продукции растениеводства. М., 1988, с. 91—100. — 9. *Зайцева Е.В., Беркович С.Е., Никашина В.А.* Разработка технологии очистки подземных питьевых вод от избыточного стронция с использованием природных цеолитов. — В сб.: Ис-

пользование природных цеолитов в народном хоз-ве. Мат. Всес. совещ. Кемерово-Новостройка, апрель 1990 г. Новосибирск, 1991, ч. II, с. 158—168. — 10. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. — 11. *Китаев И.В.* Возможность применения золы углей Дальнего Востока как микроэлементных удобрений. — Тез. докл. 1-го Всес. совещ. «Геохимия техногенеза». Иркутск, октябрь 1985 г. Иркутск, 1985, т. I, с. 200—203. — 12. *Кузьмич М.А., Пушкарева М.М., Величко В.А.* Кальцийсодержащие отходы промышленности. Краткая характеристика, годовой выход и запасы. М.: ВНИПТИХИМ, 1987. — 13. *Махонько Э.П. и др.* Загрязнение почв тяжелыми металлами вокруг цинкового завода. — Тр. Ин-та эксперим. метеорол. Гос. комитет СССР по гидрометеорол. и контролю природной среды. 1983, № 11/97, с. 68—72. — 14. *Машарова Л.Г.* Биогеохимические провинции Новосибирской области с недостаточным содержанием кальция и фосфора. — Тр. биогеохим. лаборат. М.: АН СССР, 1960, т. XI, с. 189—196. — 15. *Новикова В.А., Сиявин М.М.* Сравнительное изучение клиноптилолитов различных месторождений с целью разработки ионообменного способа очистки природных вод. — В сб.: Использование природных цеолитов в народном хоз-ве. Мат. Всес. совещ. Кемерово-Новостройка, апрель 1990 г. Новосибирск, 1991, ч. II, с. 169—177. — 16. *Овчаренко Г.И. и др.* Использование природных цеоли-

тов при производстве строительных материалов. — В сб.: Использование природных цеолитов в народном хоз-ве. Мат. Всес. совещ. Кемерово-Новостройка, апрель 1990 г. Новосибирск, 1991, ч. II, с. 225—233. — 17. *Русчев Д.Д.* Химия твердого топлива. Л.: Химия, 1976. — 18. *Таусон Л.В. и др.* Золы бурых углей в сельском хозяйстве. — В сб.: Геохимия техногенеза. Новосибирск: Наука, 1986, с. 40—52. — 19. *Титаева Н.А.* Техногенная миграция естественных радионуклидов. — Тез. докл. 1-го Всес. совещ. «Геохимия техногенеза». Иркутск, октябрь 1985 г. Иркутск, 1985, т. II, с. 52—56. — 20. *Унаниян С.А.* Загрязнение почвенного и растительного покрова тяжелыми металлами в окрестности объектов цветной металлургии АрмССР. — Тр. 6-й науч. конфер. мол. ученых фак-та почвовед. МГУ. М., март 1983 г. М., МГУ, 1984, с. 218—224 (Рукоп., деп. во ВНИПИ 10.09.84. № 6124—84 Деп.). — 21. *Черкасова А.В.* Уровская болезнь животных. — Эндемические болезни животных. М.: Колос, 1968, с. 146—173. — 22. *Hadson I.F.* — Adv. Agron., 1963, vol. 15, p. 141—165. — 23. *Maas G.* — Rev. Agr., 1980, vol. 33, № 2, p. 329—336. — 24. *Miller W.P., McFee W.W.* — J. Environ. Qual., 1983, vol. 12, № 1, p. 29—33. — 25. *Pacyna D.M., Hanssen D.E.* Tellus., 1984, vol. 36, № 3, p. 163—178. — 26. *Shestakov E.I.* — Genesis and control of fertility of salt-affected soils. M., V.V. Dokuchaev Soil Institute, 1991, p. 230—233.

Статья поступила 4 апреля  
1996 г.



## SUMMARY

For chemical reclamation of soils it is suggested to use agrochemically high-efficient ameliorants which were selected according to the system of agroecological restrictions (SAR) that we propose. Some procedures which allow to reduce possible negative effect (from the point of view of ecology) from using ameliorants are shown. One of such examples is using zeolites, as applying them into the soil is accompanied by substantial (by 20—60%) lowering of accumulating strontium, nickel, chromium, manganese by plants.