

Л. В. Моторина, А. Н. Савич,
Н. П. Васильева, Н. А. Новикова

Биологическая рекультивация отвалов с сульфидсодержащими породами в Подмосковном угольном бассейне

В практике рекультивации земель одним из наиболее трудных объектов являются отвалы, сложенные породами с резко выраженными фитотоксичными свойствами, в частности сульфидсодержащими породами (СП). Проблема рекультивации этих отвалов актуальна для многих стран мира, в том числе для ГДР, США, Англии.

В каждой стране и даже отдельном физико-географическом районе она имеет свои особенности. В СССР СП в отвалах встречаются в Подмосковном бассейне, на ряде бурогольных месторождений Украины, Урала, Сибири, Дальнего Востока. Наиболее подробно исследованы свойства СП и возможные направления рекультивации отвалов с наличием таких пород в Подмосковном угольном бассейне (Моторина, 1974).

Проблема эта — одна из наиболее сложных в рекультивации земель, исследования ведутся в течение многих лет, разработан ряд рекомендаций, однако окончательно вопрос еще не решен.

Исследованиями ЦЛОП МСХ СССР (ныне ВНИИприрода) установлено, что в Подмосковном бассейне СП представлены углистыми темно-серыми супесями, суглинками и глинами (в ряде случаев они составляют до 40—60 % вскрыши). По классификации вскрышных и вмещающих пород (ГОСТ 17.5.1.03—78) СП отнесены к группе пород, непригодных для биологической рекультивации. Характерной чертой их минералогического состава является высокое содержание дисульфидов железа (FeS_2) в виде минералов пирита и мельниковита. Установлено, что в естественном залегании эти породы не имеют фитотоксичных свойств и приобретают их в процессе окисления на поверхности отвалов, т. е. при перенесении их в процессе вскрышных работ из анаэробных условий в аэробные. Выявлена также химико-микробиологическая природа окисления дисульфидов железа и зависимость скорости этого процесса от целого ряда факторов: механического состава пород, количества и степени дисперсности пиритной серы, водно-воздушного режима и температурных условий отвалов.

Установлено, что в результате интенсивного окисления и разрушения дисульфидов железа происходит накопление сульфатов и возникает фитотоксичный комплекс, характеризующийся высокой концентрацией серной кислоты, повышенным содержанием подвижных алюминия, закисного и окисного железа. В результате pH_{KCl} снижается до 1,2—1,7; содержание подвижного алюминия достигает 100—150 мг на 100 г породы (при пороге токсичности для овса 18 мг/100 г породы), подвижного железа — до 600 мг/100 г породы (Савич, 1969).

Проведенное сравнение свойств СП в наших условиях со свойствами аналогичных пород в ГДР, ЧССР показало, что в Подмосковном бассейне в этих породах значительно более высокие концентрации подвижных алюминия и железа, что усугубляет их токсичность и трудности проведения биологической рекультивации. В результате исследований установлено, что сульфидсодержащие надугольные супеси при окислении значительно быстрее приобретают токсичные свойства, чем надугольные глины (супесь — через 1 месяц с максимумом через год, глина — в течение года с максимумом через 2 года). Наиболее интенсивное окисление идет в теплое время года при увлажнении до 60 % от полной влагоемкости пород. При 80 % от полной влагоемкости начинаются восстановительные процессы.

Естественное выщелачивание токсичных пород идет чрезвычайно медленно, в течение десятков лет. Отвалы, сложенные СП, не зарастают и являются источником водной и ветровой эрозии и загрязнения окружающей среды.

Поэтому особое внимание было обращено на изучение влияния отвалов с СП на окружающую среду, на выявление более устойчивых в этих условиях видов растений, на совершенствование методов биологической рекультивации отвалов с СП.

Существенное влияние на окружающую территорию оказывает водная эрозия отвалов с СП. Материал твердого стока, попадая на прилегающие к отвалам территории, резко изменяет химические свойства почвы и снижает урожайность сельскохозяйственных культур. Нашими исследованиями установлено, что интенсивность годового выноса продуктов водной эрозии с отвалов может достигать 7959 м³/га в год (со среднегодовыми показателями за 10—15 лет в 2000—2500 м³/га). Площадь, подверженная их влиянию, составляет на Ушаковском участке от 6,4 до 14,4 %, а на Кимовском от 8,4 до 31,2 % общей площади отвалов. При этом мощность наносов у основания конуса выноса может достигать 130—150 см (Моторина и др., 1975). Погребенная под продуктами водной эрозии почва подвергается значительным изменениям: величина pH снижается до 2,3—2,5; содержание подвижного алюминия возрастает до 60 мг/100 г почвы; сернокислых солей Ca, Mg, Al, Fe до 7—8 мг-экв/100 г (SO_4^{-2}); обменная кислотность достигает величины 11,9 мг-экв/100 г. На большем удалении от отвалов почвенный

слой сохраняет слабокислую реакцию ($pH=6,1$). Однако здесь присутствует значительное количество водорастворимых сульфатов — 2,5—7,9 мг-экв/100 г почвы.

На полях колхоза «За коммунизм», примыкающих к отвалам 1-го Кимовского участка, в пограничной полосе шириной 100 м на 77 % площади сказывается отрицательное влияние отвалов на развитие сельскохозяйственных культур. С каждого гектара площади поля, прилегающего к отвалам, теряется вследствие водной эрозии 17,4 ц сена вико-овсяной смеси или 46 % урожая.

В опыте, проведенном совместно с Институтом физиологии растений АН СССР, установлено, что примесь 8 % СП снижает урожайность растений на 25 %. При наличии 50 % примеси продуктивность сельскохозяйственных культур снижается на 80 %, при 65 % примеси наблюдается полная гибель растений.

Влияние примеси токсичных пород сказывается и на содержании в растениях хлорофиллов А и В и каротина: с увеличением примеси СП падает содержание пигментов. Минимальное их значение наблюдалось при содержании СП 33 % (хлорофилл А — 0,620; В — 0,354, каротин — 0,510 %). Однако при увеличении содержания фитотоксичных пород до 50 % наблюдается резкий скачок в накоплении пигментов (хлорофилл А — 1,326 %; В — 0,689 %, каротин — 0,888 %). Это, по-видимому, объясняется появлением в субстрате подвижного железа, стимулирующего образование пигментов.

На территориях, прилегающих к отвалам с СП, резко повышается уровень минерализации подземных, почвенно-грунтовых и поверхностных вод. Как установлено исследованиями НИИ-ОСуголь, это происходит, с одной стороны, за счет просачивания очень кислых вод из межотвальных водоемов ($pH=2,5-2,9$); с другой — в результате сброса этих вод в естественные водотоки. Значительно увеличивается минерализация почвенно-грунтовых вод (300—500 мг SO_4^{-2} /л при фоне 50—100 мг/л, т. е. в 3—5 раз по сравнению с фоновой) в полосе шириной 200—300 м, граничащей с высокими внешними отвалами СП, опоясанными каймой эрозионных шлейфов. В еще большей мере (500—1200 мг/л, т. е. в 5—12 раз по сравнению с фоновой) возрастает концентрация сульфатов на территориях, примыкающих к остаточным траншеям с близким к дневной поверхности уровнем сульфатных вод, а также в зоне поверхностных водотоков, несущих сильно минерализованные сульфатные воды из отвальных водоемов в р. Дон (на расстоянии до 4 км от отвалов). Наиболее высокая минерализация — от 1200 до 2500 мг SO_4^{-2} на литр (в 12—25 раз выше фоновой) наблюдается в местах выхода на поверхность подземных сульфатных вод; установлено 4 зоны по степени минерализации грунтовых вод.

В результате минерализации грунтовых вод происходит постепенное засоление зональных почв. Уровень засоления имею-

щихся здесь почвенных разностей позволяет отнести их к слабо- и средnezасоленным.

Повышение минерализации грунтовых вод отрицательно сказывается и на развитии естественной растительности. Обедняется видовой состав луговых и болотных сообществ, отмечается раннее усыхание растений, увеличение обилия солеустойчивых видов.

Наблюдения, проведенные за развитием растительности на эрозионных шлейфах, позволили выявить наиболее устойчивые к сульфатному засолению виды растений (*Agropyron repens*, *Poa compressa*, *Polygonum aviculare*, *P. nodosum* и т. д.).

Разработка методов рекультивации отвалов с сульфидсодержащими породами является чрезвычайно актуальным и сложным делом.

Наиболее радикальным приемом является изменение технологии вскрышных работ с целью захоронения токсичных пород — укладки их в основание отвалов или перекрытия их слоем потенциально-плодородных пород. Пока, к сожалению, эта рекомендация не реализуется. При существующей технологии вскрышных работ на поверхность отвалов продолжают выноситься сульфидсодержащие породы, приобретающие в процессе выветривания комплекс фитотоксичных свойств.

В 1976—1980 гг. заложены производственные опыты по изучению различных методов создания сельскохозяйственных и лесных угодий на отвалах с СП (Моторина и др., 1979).

По трехчленной классификации смесей вскрышных пород*, разработанной ЦЛОП, все они в зависимости от процентного содержания токсичных пород и развития растений в этих условиях делятся на слаботоксичные (СП менее 20 %); среднетоксичные (от 20 до 40 %) и сильнотоксичные (свыше 40 %). Для каждой группы пород разработаны основные методы их биологической рекультивации.

На слаботоксичных смесях возможна непосредственная сельскохозяйственная и лесохозяйственная рекультивация при условии соблюдения ряда агротехнических мероприятий. Сельскохозяйственное освоение без нанесения почвенного слоя рекомендуется ограничить созданием преимущественно сенокосных угодий, на суглинистых грунтах возможно ограниченное паст-

*

Группа пород	pH	Обменная кислотность, мг-экв/100 г пород
Слаботоксичные	6,3—4,0	до 1
Среднетоксичные	4,0—2,7	1—5
Сильнотоксичные	2,7—1,5	{ а) 5—15 б) >15—17

бищенное использование. Из испытанных нами 20 видов растений наилучшие результаты дало выращивание люцерны синегрибридной, люпина однолетнего желтого и многолетнего синего, многолетних травосмесей. При внесении удобрений урожай сена люцерны синегрибридной на смесях пород с преобладанием суглинка составлял около 46 ц/га, урожай зеленой массы люпина желтого на песчаных смесях около 240 ц/га. Из многолетних травосмесей наиболее устойчивыми и урожайными на песчаных породах оказались ежа сборная и люцерна желтая; на суглинистых — овсяница луговая и красная, костер безостый, лядвенец, клевер гибридный. Для создания пашни в этих условиях целесообразно нанесение почвенного слоя мощностью от 30 до 50 см.

При изучении роста и развития лесных культур выявлено, что по мере увеличения степени токсичности субстрата (рН от 4,5—5,0 до 2,7) меняются важнейшие показатели развития стволовой части дерева, ассимиляционного аппарата, корневых систем (Васильева, 1978). Установлены закономерности изменения ряда биометрических параметров растения, выделены основные типы роста и развития древостоев, соответствующие различным по степени токсичности местообитаниям. Сделан вывод о возможности создания на слаботоксичных смесях пород древостоев II—III бонитета. Наиболее перспективны в этих условиях культуры сосны обыкновенной, березы бородавчатой, акации желтой, смородины золотистой, спиреи калинолистной, жимолости татарской, некоторых видов тополей, облепихи. Сохранность лесокультур на песчаных смесях в этих условиях до 80—90 %, причем 50 % деревьев имеют признаки пониженной жизнеспособности. Так, в культурах сосны, наиболее приспособленной к росту в рассматриваемых условиях, общая высота пологая к 12—14 годам составляет 4,5—5,5 м, ежегодный прирост в последние годы может достигать 0,4—0,7 м. Хвоя сохраняет жизнеспособность 2—3 года. Фитомасса стволов у лучших экземпляров до 8—10 кг. Запас надземной фитомассы на гектар до 30—40 т. Для корневой системы характерен поверхностно-стержневой тип, основная масса скелетных корней располагается на глубине до 0,6—0,8 м, отдельные корни проникают до 1,5—2,0 м. На слаботоксичных смесях с примесью карбонатного суглинка лесорастительные условия по сравнению с песчаными породами лучше. Для интенсификации роста культур необходимо внесение полного минерального или азотного удобрения в дозе не менее 150 кг/га. Поставленные эксперименты показали, что более эффективным является ежегодное внесение удобрений или сплошное на 3-й год. При этом прирост в высоту уже в первые годы увеличивается на 15 % по сравнению с контролем, а по диаметру — на 25—50 %. Улучшается развитие ассимиляционного аппарата. При внесении удобрений необходим регулярный уход за культурами в течение вегета-

ции из-за бурного развития сорной растительности. Положительные результаты получены в эксперименте с посевом бобовых трав в междурядьях культур. Посевы люпина многолетнего способствовали улучшению условий питания деревьев, предохраняли от развития сорняков, увеличивали прирост по диаметру, улучшали общее состояние культур. Посевы люцерны на песчаных смесях в культурах сосны увеличили прирост сосны на 20 % в первые годы, преимущество в росте сохранялось на протяжении 10—12 лет.

На среднетоксичных участках складываются неблагоприятные условия для роста и развития культур. Сохранность не более 60 %. Преобладают деревья ограниченного роста (до 45 %) и угнетенные (30—40 %). Естественная травянистая растительность в междурядьях почти отсутствует. Фаза приживания растений. Развитие культур идет по IV—V бонитету (высота растений к 10 годам — 1,5—2,5 м). Прирост по диаметру в 3—5 раз ниже, чем в условиях слаботоксичных смесей, масса стволов снижается в 2—3 раза, корни сосредоточены преимущественно в верхнем горизонте, хвоя держится 1—2 года. Общая фитомасса не более 10 т/га. Применение перечисленных агротехнических приемов для интенсификации роста не снимает в достаточной степени последствий токсичности. Создание лесонасаждений в этих условиях возможно только после химической мелиорации и исключительно в озеленительных и противозерозионных целях.

При наличии на поверхности отвалов более 40 % СП (сильнотоксичные смеси) территории следует считать полностью непригодными для непосредственной биологической рекультивации. Установлено, что в Подмосковном бассейне освоение отвалов со средне- и сильнотоксичными смесями возможно только двумя путями: химической мелиорацией и экранированием карбонатным суглинком.

Наиболее приемлемым в условиях Подмосковного бассейна методом химической мелиорации является известкование высокими дозами извести. Нами рекомендованы (Савич, 1972) наиболее рациональные методы расчета доз извести для мелиорации СП в этих условиях (по обменной и гидролитической кислотности, по общей сере).

Установлено, что известкование эффективно только для группы среднетоксичных смесей и для сильнотоксичных при показателях обменной кислотности, не превышающих 15—17 мг-экв/100 г породы, с дозой извести до 120 т/га (СаО — 60 т/га). Рекомендуется применять нейтрализующие материалы с низким содержанием окиси магния. В противном случае развивается вторичное сульфатно-магниевое засоление, обуславливающее гибель растений.

Однако использование промелиорированных таким способом земель для сельскохозяйственных и лесохозяйственных целей ограничено. В этих условиях можно выращивать однолетние и

многолетние злаковые и бобовые культуры преимущественно для получения зеленой массы или сена.

В производственном опыте на 1-м Кимовском участке получено сена вико-овсяной смеси до 40 ц/га. При этом внесение удобрений в определенной степени компенсирует глубину мелиорации. Так, при $N_{120}P_{120}K_{120}$ и мелиорации на 20 см урожай был выше, чем при мелиорации на 40 см без внесения удобрений.

Возможно в этих условиях и создание лесонасаждений в озеленительных и защитных целях. Опыты с известкованием токсичных песчаных смесей на глубину до 40—60 см указывают на эффективность этого приема для улучшения лесорастительных условий. Нами испытываются различные дозы и способы внесения удобрений, повторность их внесения, посев бобовых трав в междурядьях и т. п. Хорошую приживаемость (до 90 %) показали береза, акация, лох, спирея, шиповник, сосна; меньшую — тополь, вишня степная, жимолость.

При рекультивации в Подмосковном бассейне раньше проводилось нанесение почвенного слоя непосредственно на СП. Нашими исследованиями установлено, что во время контакта почвенного слоя с токсичными для растений СП происходит повышение актуальной кислотности пахотного слоя (рН от 7,0 до 2,3), увеличение количества подвижного алюминия в почвенном поглощающем комплексе (до 100—130 мг/100 г). Урожай при этом снижается до 50 % (Моторина и др., 1979). В связи с этим нами в производственных условиях испытывались возможные методы восстановления продуктивности таких угодий.

Для уменьшения последствий отрицательного воздействия токсичных пород проводилось известкование в дозе от 8 до 24 т/га с запахиванием извести на глубину 30—35 см и внесением удобрений из расчета по 120 кг каждого действующего вещества.

Внесение извести обеспечило увеличение урожая сена вико-овсяной смеси с 36,7 ц/га до 47,2 ц/га (на 28,6 %), а удобрения как на известкованном фоне, так и на фоне без извести повышали урожай до 56,8—59,8 ц/га, или на 54,8—62,9 %. Известкование значительно улучшило фосфатное питание растений.

Таким образом, при известковании и, главным образом, внесении удобрений возможно повышение плодородия почвенного слоя, нанесенного на СП. Однако набор культур, пригодных для выращивания на таких полях, остается строго ограниченным. Озимые культуры и многолетние травы выращивать нецелесообразно, так как вследствие повышенного содержания подвижного алюминия в почве они выпадают в течение зимы. Яровые зерновые по этой же причине плохо завязывают зерно. Наиболее продуктивными в этих условиях являются однолетние культуры, выращиваемые на зеленую массу.

Для создания более продуктивных сельскохозяйственных

угодий на СП наиболее надежным и эффективным методом является метод экранирования, впервые предложенный в 1969 г. (Савич, 1969; 1975). В производственном опыте (1976—1980) уточнялась оптимальная мощность экрана, условия создания продуктивной пашни при помощи этого метода. Было установлено, что в условиях непромывного типа водного режима, господствующего на отвалах открытых разработок Подмосковского бассейна, экран карбонатного суглинка претерпевает лишь незначительные изменения (подкисляется за 6—7 лет лишь слой суглинка в несколько мм), очень незначительно увеличивается концентрация сульфатов в слое 10 см. Таким образом, для гарантированной защиты почвенного слоя от воздействия подстилающих СП достаточно создать экран из карбонатного суглинка мощностью в 15—20 см (Новикова, Савич, 1979).

Проведенные исследования по изучению оптимальной мощности корнеобитаемого слоя показали, что основная масса корней на удобренных вариантах (до 95 %) сосредоточена в слое 40 см, на неудобренных — в слое 60 см. Эти параметры подтверждаются и литературными данными (Новикова, Савич, 1980). В опытах, проведенных на насыпном слое из 30 см суглинка и 30 см гумусированного почвенного слоя при внесении удобрений из расчета по 120 кг каждого действующего вещества получен урожай зеленой массы вико-овсяной смеси в среднем 300 ц/га, без удобрений — 200 ц/га. Однако при указанной мощности насыпного слоя (60 см) в засушливые годы наиболее требовательные культуры (например, сахарная свекла) могут испытывать дефицит влаги, и поэтому мы не можем считать такие земли полностью кондиционными. Этот метод требует еще дальнейшей проверки.

Для получения высоких и устойчивых урожаев более целесообразно, исходя из наших исследований и накопленного в рекультивации опыта, рекомендовать отсыпать корнеобитаемый горизонт мощностью 80 см, включая экран (20 см).

При испытании различных сельскохозяйственных культур в первые годы освоения рекультивированных земель с нанесением почвенного слоя мы пришли к выводу, что наиболее целесообразно начинать освоение с посева злаково-бобовых однолетних смесей на зеленую массу. Это вызвано тем, что почвенный слой, находившийся в буртах, сильно засорен семенами сорняков. В первый год после его нанесения наблюдается бурный рост сорной растительности. Чтобы избежать этого, необходимо высевать культуры сплошного посева и скашивать их как можно раньше, до обсеменения сорняков.

При использовании экрана из карбонатного суглинка создаются долговечные и высокопродуктивные сельскохозяйственные угодья, при химической мелиорации — ограниченно продуктивные угодья. Последний способ целесообразно применять для озеленения или создания кормовых угодий.

ЛИТЕРАТУРА

- Васильева Н. П.**, 1978. Рост сосны в условиях фитотоксичных отвалов.— Экологическая кооперация. Информ. бюл. Охрана экосистем и ландшафта. Братислава.
- Моторина Л. В., Савич А. И., Васильева Н. П., Новикова Н. А.**, 1979. Особенности биологической рекультивации отвалов с сульфидсодержащими породами в Подмосковном угольном бассейне.— Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. семинара. М.
- Моторина Л. В.**, 1974. Некоторые итоги рекультивации земель в Тульской области.— В кн.: Проблемы рекультивации земель в СССР. М.
- Моторина Л. В., Ижевская Т. И., Новикова Н. А., Савич А. И., Чекина В. Н.**, 1975. Влияние эрозии отвалов на окружающую среду.— Теоретические и практические проблемы рекультивации нарушенных земель. Тез. докл. II Всесоюзн. совещания по рекультивации земель в СССР. М.
- Новикова Н. А., Савич А. И.**, 1980. Восстановление почвенного плодородия на отвалах открытых разработок при биологической рекультивации. М.
- Новикова Н. А., Савич А. И.**, 1979. Экранирование сульфидсодержащих пород как один из методов восстановления устойчивых высокопродуктивных агроценозов на отвалах угольных карьеров в Подмосковном бассейне.— Тез. докл. Всесоюзн. совещ. по экспериментальной биогеоценологии. М.
- Савич А. И.**, 1969. Агрохимические свойства вскрышных пород в отвалах Подмосковного угольного бассейна.— Агрохимия, № 6.
- Савич А. И.**, 1975. Возможность применения карбонатного суглинка в качестве экрана фитотоксичных пород при сельскохозяйственном восстановлении отвалов в Подмосковном бассейне.— Научные основы охраны природы, вып. 3.
- Савич А. И.**, 1972. Некоторые вопросы мелиорации сульфидсодержащих пород отвалов Подмосковного угольного бассейна при биологической рекультивации.— В кн.: Рекультивация промышленных пустошей. М.