

Процессы коррозии и эрозии

Термины «коррозия» и «эрозия» в своем изначальном значении «corrosio» и «erosio» совпадают: в переводе с латинского языка они означают «разъедание». Однако в современном языке эти понятия имеют различную смысловую окраску.

Термин «коррозия» в настоящее время характеризует процессы естественного разрушения под воздействием окружающей среды металлов, сплавов и неметаллических материалов, изделий из них, т.е. продукции антропогенного происхождения. Под эрозией подразумевают процессы разрушения под влиянием окружающей среды материальных объектов природного происхождения (горных пород и почв). Вместе с тем до сих пор понятие «коррозия» в некоторых случаях используют для обозначения геологических процессов разрушения, например растворения горных пород в результате воздействия воды с образованием карстовых (пустотных) форм рельефа. К процессу эрозии иногда относят постепенное разрушение поверхности материальных объектов, созданных человеком, например металлических изделий, в потоках газа или жидкости, под воздействием электрических разрядов и т.д. В данной работе оба понятия использованы в их основных значениях в современном русском языке.

5.1. Коррозия металлов и сплавов

5.1.1. Общие сведения

Коррозия металлов и сплавов выражается в их самопроизвольном необратимом разрушении под влиянием химического или электрохимического воздействия окружающей среды. Разрушение начинается всегда с поверхности материала, однако при значительном развитии может распространиться и в глубь его. Это происходит, например, при межкристаллитной коррозии, при которой в первую очередь разрушаются тонкие прослойки между кристаллами материала.

Коррозия металлов и сплавов (далее — металлов) наносит большой ущерб народному хозяйству, в частности при разрушении металлических конструкций в воздушной, водной среде и почве, корпусов судов и различных портовых сооружений, при ржавлении железнодорожных рельсов, разъедании химической аппаратуры, образовании окалина при

термической обработке и прокатке металла и т.д. Подсчитано, что $1/3$ всего металла выбывает из технического использования в результате коррозии. При этом примерно $2/3$ прокорродировавшего металла регенерируется при переплавке металлолома. Остальная часть переходит в пыль, степень переработки которой составляет $\sim 50\%$. В СССР при выплавке стали в 80-х годах 20 в. на уровне 150 млн т/год ежегодные потери металла от коррозии оценивались в 15 млн т (*Технология важнейших...*).

Большие убытки народному хозяйству наносят связанные с коррозией аварии и простои машин и сооружений, порча консервов продуктами коррозии.

Помимо прямых потерь, к убыткам от коррозии относятся расходы на борьбу с ней, например на замену обычных сталей легированными, нанесение защитных покрытий, смазок и ингибиторов. В целом убытки промышленно развитых стран от коррозии составляют 5-10% национального дохода.

Таким образом, защита от коррозии становится проблемой первостепенного народнохозяйственного значения.

5.1.2. Теоретические представления

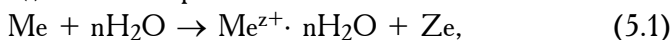
Все многообразие явлений коррозии, в зависимости от механизма их протекания, можно разделить на *электрохимические* и *химические*. Первый тип коррозии обычно возникает при контакте металлов с электролитом, второй — в газах и неэлектролитах, однако в реальных условиях оба процесса могут реализовываться одновременно.

Электрохимический механизм — наиболее распространенный вид коррозионного разрушения. Он обуславливается двумя причинами.

Коррозия возникает главным образом как результат работы многочисленных гальванических микроэлементов, появляющихся на поверхности металла при контакте его с электролитом. Причиной электрохимической гетерогенности поверхности, в результате которой возникают пространственно разделенные катодные и анодные участки коррозионных микроэлементов, является наличие в металле включений других, более электроположительных («благородных») металлов. Включения окружают чистый металл, образуя так называемые местные, или микрогальванические, электрохимические ячейки. Чистый металл в них служит анодом, а включения — катодами.

В согласии со схемой работы коррозионного элемента (рис. 5.1), электрохимическое растворение металла состоит из трех основных стадий (Левин):

1) анодного процесса — перехода ионов корродируемого металла в раствор с освобождением электронов:



где z — валентность металла;

2) омического процесса — перетекания свободных электронов по металлу от анодных участков к катодным и движения ионов в растворе;

3) катодного процесса — ассимиляции освободившихся электронов каким-либо деполяризатором, имеющимся в растворе.

В качестве деполяризатора могут выступать любые ионы и молекулы, находящиеся в растворе и способные восстанавливаться на катодных участках:

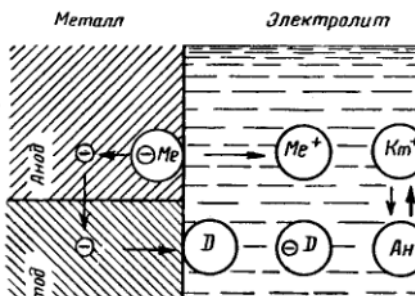


Рис. 5.1. Принципиальная схема работы коррозионного гальванического элемента

В общем случае деполяризаторы разделяют на две группы. В одну из них входят ионы водорода и металлов высшей валентности, например Fe^{3+} , а также некоторые анионы, способные отнимать у металла валентные электроны, но, как правило, не вступающие с ним в химические соединения. Основу второй группы составляют кислород и все соединения и ионы, способные его отщеплять, а также галогены.

Вещества первой группы могут быть только деполяризаторами. Вещества второй группы, кроме

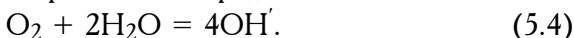
этого, при определенных условиях реагируют с металлами химически с образованием оксидных, галоидных и других пленок, тем самым существенно влияя на кинетику коррозионных процессов.

Наиболее распространенными являются два катодных процесса (*Скорелетти*):

1) разряд водородных ионов по реакции:

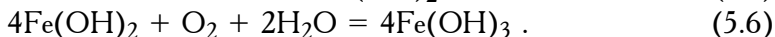
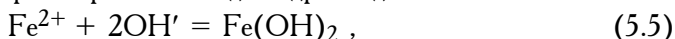


2) восстановление растворенного кислорода:



Эти процессы называют соответственно *водородной* и *кислородной* деполяризациями.

В железоуглеродистых сплавах (чугун, сталь) анодом служит феррит (твёрдый раствор сотых или тысячных долей процента углерода и других элементов в α -железе), а катодом — цементит (карбид железа) или неметаллические включения. Вторичными реакциями коррозии железа являются взаимодействие его катионов с ионами гидроксидов и образование малорастворимых в воде гидроксидов железа:



Со временем гидроксиды железа переходят в более устойчивые соединения типа $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, называемые *ржавчиной*.

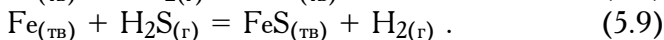
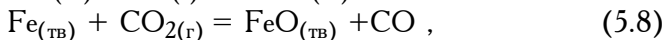
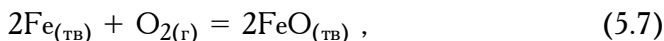
Таким образом, электрохимическая коррозия является самопроизвольным процессом, совмещающим в себе анодную реакцию растворения металла и катодную реакцию восстановления окислителя-деполяризатора, причем каждая из них возможна только при сочетании с другой.

Подобная форма коррозии происходит главным образом при возникновении и работе микрогальванических (местных) элементов, образующихся при соприкосновении металла с водой, водным раствором электролита, другой жидкой средой (*жидкостная коррозия*) или влажным воздухом (*атмосферная коррозия*), т.е. при появлении на поверхности металла хотя бы тонкой пленки влаги. В этом случае местные элементы начинают давать *паразитные гальванические токи*, приводящие к разрушению изделия.

Образование и работа коррозионного микроэлемента — наиболее выгодный, но не единственный механизм перехода металла из термодинамически неустойчивого в устойчивое состояние. Коррозия может протекать и при отсутствии микроэлементов, на совершенно гомогенной по химическому составу поверхности. Причиной электрохимической микрогетерогенности в этом случае является любая неоднородность деформаций и внутренних напряжений в металле, неоднородность внешней среды, различия в концентрации элемента и т.п.

Другой, химический, процесс коррозии, как уже отмечалось, протекает в средах, не проводящих электроток. Он часто возникает при действии на металл сухих газов.

Газовая коррозия обычно наблюдается в окислительной среде при высоких температурах как в металлической аппаратуре (нагревательные печи, двигатели внутреннего сгорания, газовые турбины, оборудование синтеза аммиака), так и на поверхности обрабатываемых металлов в различных технологических процессах (термообработка, прокатка,ковка, штамповка и т.д.). Например, стальные конструкции нагревательных печей окисляются и кислородом, и другими газами:



В большинстве случаев продукты окислительной коррозии образуются и остаются на металле в виде пленки, характер которой определяет ее защитные свойства.

Коррозионные процессы возможны и в восстановительной газовой среде, например растрескивание стали в аппаратах для крекинга нефти и нефтехимического синтеза. Это обуславливается обезуглероживанием металла под действием водорода при его высоком давлении:



Благодаря большой скорости диффузии водорода в железе при высоких температурах реакция (5.10) может развиваться не только на поверхности, но и в объеме металла. Образующийся метан имеет больший, чем у водорода, размер молекул (соответственно $4,3 \cdot 10^{-8}$ и $2,77 \cdot 10^{-8}$ см) и их меньшую среднюю скорость ($6,14 \cdot 10^4$ против $16,94 \cdot 10^4$ см/с). Это затрудняет диффузионное удаление метана из стали, и он накапливается в микропорах и микротрещинах металла. В результате в них развиваются большие давления газа (100-1000 атм.), что приводит к коррозионному растрескиванию материалов.

Химическая коррозия наблюдается и при действии на металл или его компоненты жидких неэлектролитов (нефть, бензин, расплавы и т.п.). Так, при циркулировании расплава натрия в качестве теплоносителя в промежуточном контуре трехконтурной схемы АЭС, изготовленном из нержавеющей стальных труб, их углерод растворяется в жидком металле. И хотя эта растворимость весьма мала, с течением времени концентрация углерода в поверхностном слое стали уменьшается столь сильно, что она теряет необходимые физико-механические свойства. Один из способов борьбы с таким типом разрушения заключается в легировании стали, что приводит к уменьшению термодинамической активности содержащегося в ней углерода и снижению его вымывания.

Скорость процессов коррозии любого типа в значительной степени зависит от наличия на поверхности металла оксидных или других пленок. Их подразделяют на три группы: тонкие (невидимые) толщиной от нескольких до 40 нм; средние (40-500 нм, дают цвета побежалости); толстые (видимые) слоем свыше 500 нм (к ним относится также термическая стальная окалина). Пленка может быть сплошной ($V_{\text{ок}}/V_{\text{Ме}} > 1$) и несплошной ($V_{\text{ок}}/V_{\text{Ме}} < 1$), где $V_{\text{ок}}$ и $V_{\text{Ме}}$ — соответственно объемы оксида и металла, пошедшего на его образование. В частности, для щелочных и щелочноземельных металлов (K, Na, Ca, Mg и др.) $V_{\text{ок}}/V_{\text{Ме}}$ равно 0,45-0,81; на них образуются рыхлые

пористые пленки. Для Cd, Al, Sn, Zn, Be, Cu, Fe и других металлов это соотношение составляет 1,21-2,14, что обуславливает образование на них сплошных или малопористых пленок. По мере их утолщения скорость коррозии металла замедляется.

Компактность пленок зачастую оказывает решающее влияние на развитие процессов коррозии. Например, алюминий окисляется легче железа (более электроотрицателен). Однако на воздухе он устойчивее, так как, окисляясь, покрывается плотной пленкой оксида. Ее изолирующее действие тем более значительно, что образующийся Al_2O_3 менее растворим в воде, чем оксиды железа.

Образование пленок играет существенную роль и в явлении *пассивации* металлов. Оно заключается в том, что некоторые достаточно активные элементы перестают быть таковыми после обработки сильным окислителем, например концентрированной азотной кислотой, или после анодной поляризации электрода в подходящем растворе за счет внешней электродвижущей силы (Э.Д.С.).

По масштабу поражения различают *общую* (сплошную) коррозию, захватывающую всю поверхность металла, и *местную*, поражающую лишь его отдельные участки.

Предрасположенность к коррозии оценивается по десятибалльной шкале. В соответствии с нею, нулевой балл присваивается «совершенно стойким металлам», линейная скорость коррозии которых составляет менее 0,001 мм/год, балльность 9 характеризует нестойкие металлы со скоростью коррозии более 10 мм/год.

5.1.3. Методы защиты

В настоящее время для борьбы с коррозией применяются: защитные покрытия; коррозионностойкие металлы и сплавы; обработка и изменение состава внешней среды; электрохимические способы; организационно-технические мероприятия.

Под *защитными* понимают покрытия, создаваемые на поверхности металла с целью предохранения его от коррозии. По химическому составу их подразделяют на неметаллические и металлические.

Неметаллические покрытия могут быть представлены органическими и неорганическими веществами.

К простейшим органическим покрытиям относятся *смазки*, применяемые для временной защиты в виде высоковязких, или консистентных, связок (минеральные масла, вазелин, парафины, дегти и др.).

Наиболее распространенными органическими покрытиями при защите от атмосферы и в некоторых других случаях являются краски и лаки.

Краски состоят из суспензий минеральных веществ: дисперсной фазы красителей (оксиды железа, цинка, свинца, алюминиевые порошки, сажа и др.) в дисперсионной жидкой среде пленкообразователей (олифа, масляно-смоляная смесь), с добавлением наполнителей (слода, графит, тальк и т.д.) и сиккативов (органических солей свинца, кобальта или марганца), ускоряющих окисление и высыхание красок. Их широко используют для защиты корпусов речных и морских судов, портовых сооружений, резервуаров, металлорежущих станков, крыш и т.п.).

Лаки представляют собой раствор некоторых синтетических органических веществ, например эпоксидных, кремнийорганических и формальдегидных смол, в органических жидкостях (бензине, бензоле, ацетоне, этилацетате, скипидаре и пр.). При высыхании растворителя на покрываемой поверхности остается защитная пленка с красителями и различными наполнителями. Лаки широко применяют для окраски велосипедов, кузовов легковых автомобилей и автобусов, деревянных изделий и др.

К органическим относятся также покрытия битумами, пластмассами, резинами. Их закрепляют различными способами: в нагретом состоянии жидкими (битумы), газопламенным напылением (полиэтилен, фторопласт), листовой футеровкой (фаолит, винипласт, резина) и т.п. Данный класс защитных материалов обладает высокой стойкостью во многих химически агрессивных кислых и щелочных средах.

К неорганическим покрытиям относятся: цемент и бетон, в ряде случаев применяемые для защиты трубопроводов и резервуаров; *эмали* — прочная стеклообразная защита столовой и кухонной посуды, других бытовых изделий; кислотоупорные плитки, угольные блоки, свинцовые листы, используемые для футеровки разнообразных емкостей и аппаратов в химической промышленности, пиро- и гидрометаллургии; различные пленки оксидного, фосфатного, оксихроматного, сульфидного и тому подобного характера. Рассмотрим некоторые способы нанесения пленок на примере их оксидных типов.

Защитные пленки на металле могут быть получены химической или электрохимической обработкой их поверхности в специальных растворах, например при оксидировании стали и алюминия.

Оксидирование (воронение) стали и железа реализуют, погружая изделия в ванны с очень концентрированным раствором щелочи, в который добавляют окислители (MnO_2 , NaNO_2). Способ применяют для защиты изделий при коррозии в легких эксплуатационных условиях.

Оксидирование алюминия и его сплавов осуществляют чаще всего электролитически, путем анодной обработки в растворе 20%-й серной кислоты в присутствии окислителя или при последующей дополнительной обработке им. Оксидные пленки алюминия обладают значительной микропористостью, легко окрашиваются в различные цвета в растворах анилиновых красителей. Пленки, полученные в специальных электролизерах и при особых режимах (пониженная температура, повышенное напряжение), используют для увеличения износостойкости деталей из алюминия, придания им изоляционных свойств.

В последнее время получают распространение композиционные покрытия гетерогенного типа, выделяемые из электролитов-суспензий и содержащие неметаллические включения. Они превосходят обычные покрытия по твердости, износо- и коррозионной стойкости.

Все неметаллические покрытия эффективны до тех пор, пока сохраняется герметичность покрываемого слоя. При нарушении его целостности коррозия в обнаженных местах протекает неконтролируемо.

Значительно более сложны процессы коррозии при различных *металлических покрытиях*. По используемым металлам, способам их нанесения, значению они весьма разнообразны. Помимо защиты от коррозии, их наносят для придания изделию декоративных свойств (золочение), повышения его износостойкости (хромирование), электропроводности (серебрение) и т.п. Предметом данного курса являются только антикоррозионные покрытия. Основные способы их получения: горячий, термомеханический, распыление, диффузионный, химический, гальванический.

Горячий способ заключается в кратковременном погружении изделия в ванну с расплавом металла, смачивающим его поверхность. После извлечения и остывания изделия на нем остается защитная металлическая пленка. Это наиболее простой и старейший метод нанесения на ленту, проволоку, листы и другие изделия относительно легкоплавких металлов (Zn, Sn, Pb, Al). Однако горячий способ характеризуется значительным расходом покрывающего металла, затрудненностью регулирования толщины покрытия. В настоящее время он вытесняется более эффективными методами, в частности гальваническим.

Термомеханический способ (*плакирование*) основан на совместной горячей прокатке защищаемого металла и защитного металлического покрытия. Его применяют для изготовления биметаллических листов и лент. Таким образом сталь покрывают медью или латунью, дюралюминий — чистым алюминием, углеродистую сталь — нержавеющей и т.д.

Распыление (металлизация) состоит в нанесении расплавленного металла сжатым воздухом или инертным газом на поверхность

изделия. Капли расплава быстро застывают на ней, создавая защитный слой.

Диффузионный способ сводится к выдерживанию покрываемого изделия, при температуре, несколько меньшей температуры его плавления, в контакте с металлическим порошком, его оксидами или солями. Их термодиффузия в поверхностный слой изделия создает на нем необходимую защиту.

Химический способ предусматривает образование покрытий за счет восстановления металлов (Cu, Ni, Ag и др.) из их соединений на покрываемой поверхности. Так, химическое меднение чаще всего проводят осаждением меди на диэлектрики, например при изготовлении печатных плат, а химическое никелирование — осаждением никеля на профилированные детали. Последующая термообработка значительно повышает твердость химически осажденных металлов. В частности, применительно к никелю она превосходит прочность покрытий, полученных электролизом.

В настоящее время наиболее распространенный метод получения металлических покрытий — *гальванический* (электроосаждение). Покрываемые детали после необходимой подготовки, например шлифовки и полировки поверхности, удаления различных загрязнений, на специальных подвесках погружают в ванны с электролитом, содержащим ионы наносимого металла, и подключают к катодной штанге электролизера. Пластины из осаждаемых металлов (Zn, Cd, Cr, Ni, Sn и т.д.) или сплавов (Zn-Sn, Zn-Cd и др.) служат анодами. В качестве электролитов применяют самые разнообразные растворы: кислые, щелочные и т.п.

К преимуществам электроосаждения относятся: легкость регулирования толщины осаждаемого металла за счет изменения состава электролита, режима электролиза и других факторов; высокая адгезия покрытий с основными металлами; отсутствие нагрева и, следовательно, изменения структуры металлических изделий с возможной их деформацией; плотность гальванических покрытий.

По характеру защитного действия различают *анодные и катодные покрытия*.

К анодным относятся покрытия, металл которых в данной среде более электроотрицателен, чем металл изделия. Катодные покрытия, напротив, более электроположительны, чем защищаемый металл.

Пока покрытие сохраняет целостность и полностью изолирует изделие от воздействия окружающей среды, принципиальных различий в механизме защиты анодными и катодными покрытиями нет. Они являются при нарушении целостности покрытия. В качестве иллюстрации рассмотрим поведение двух образцов.

Первый образец — стальное изделие, покрытое оловом (рис. 5.2,а). Поскольку железо в условиях атмосферной коррозии электроотрицательнее олова, то в месте повреждения покрытия железо начнет интенсивно разрушаться (ржаветь). При этом олово, образуя с основным металлом гальванический элемент, усилит процесс коррозии.



Рис. 5.2. Схема коррозии металла с покрытием

Второй образец — стальное изделие, покрытое цинком (рис. 5.2,б). Поскольку цинк более электроотрицателен, чем железо, то в образовавшемся гальваническом элементе он станет анодом, а основной металл — катодом. Цинк начнет растворяться и, образуя гидроксид $Zn(OH)_2$, защищать железо. На последнем будет также выделяться водород, дополнительно пассивируя его поверхность. Таким образом, железо не подвергнется коррозии до тех пор, пока не разрушится практически весь цинк. Именно по этой причине ведра и корыта из оцинкованного железа, несмотря на царапины и другие повреждения покрывающего слоя, не ржавеют.

В целом для железа и его сплавов при атмосферной коррозии, помимо цинкового, анодным в некоторых условиях является кадмиевое покрытие, а катодными служат медное, никелевое, хромовое, оловянное, свинцовое, серебряное, золотое и др.

Вместе с тем разделение покрытий на катодные и анодные зависит от условий среды. Так, если при атмосферной коррозии олово по отношению к железу служит катодным покрытием, то в присутствии органических кислот и без доступа кислорода, например в консервах, олово выполняет роль анодного покрытия. Поэтому для покрытий необходимо использовать металлы, наиболее стойкие против коррозии в конкретных условиях.

В ряде случаев весьма эффективным приемом защиты от коррозии является изменение свойств основного металла. Это достигается введе-

нием в его состав специальных легирующих добавок, т.е. применением коррозионностойких (нержавеющих) металлов и сплавов. В настоящее время известно значительное число таких сталей и их сплавов, прежде всего хромо-никелевых и хромистых. Характер влияния добавок может быть при этом различным. Одни из них повышают термодинамическую устойчивость анодной фазы, другие пассивируют ее, третьи влияют на свойства катодных участков поверхности или экранируют поверхность металла защитным слоем, образуемым продуктами коррозии. Нержавеющие стали нашли применение в металлических конструкциях при их работе в агрессивных растворах, при повышенных температурах и давлениях (химическая промышленность); в пищевой отрасли, где не допустимо загрязнение обрабатываемого сырья и продукции корродированными частицами; при изготовлении различных бытовых приборов; в инструментальной и машиностроительной промышленности, судостроении и т.д.

Обработка и изменение состава внешней среды как метод сокращения коррозии заключается в удалении из нее некоторых веществ, вызывающих разрушение изделия (обработка), или же в добавлении к ней специальных веществ, замедляющих коррозионные процессы (изменение состава).

Обработка среды применяется лишь при ограниченном объеме последней и используется относительно редко. Примером этого вида защиты является удаление кислорода из воды, питающей паровые котлы.

Изменение состава среды достигается введением в нее ингибиторов — веществ, замедляющих или прекращающих химические реакции.

Ингибиторы могут быть представлены органическими и неорганическими веществами и по характеру действия разделяются на замедлители типа А, создающие на поверхности металла защитную пленку, и типа Б, уменьшающие агрессивность среды. В присутствии некоторых веществ одновременно образуются защитные пленки и уменьшается агрессивность среды (замедлители АБ смешанного типа). Наиболее часто используют соединения группы А. К ним относятся, например, ингибиторы коррозии стали в серной и соляной кислотах (так называемые травильные присадки), в воде и водных растворах солей, в частности нитрит натрия NaNO_2 и бихромат калия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Замедлителями типа Б являются сульфит натрия Na_2SO_3 , добавляемый к воде для связывания растворенного в ней O_2 , и мочевины, введение которой в раствор азотной кислоты значительно снижает скорость растворения в ней меди. В настоящее время известны десятки ингибиторов солевого и кислотного составов.

В последнее время широкое распространение получили замедлители, вводимые в газовые смеси (летучие, или парофазные, ингибиторы ат-

мосферной коррозии), а также в твердые и вязкие среды. К летучим относятся в основном аминовые соединения, защищающие от коррозии стальные и другие изделия. Ингибиторами, добавляемыми в твердые и вязкие среды, пропитывают, например, оберточную бумагу, в которую завертывают стальные иглы, измерительный инструмент и т.п. Их вводят также в защитные консистентные смазки для предохранения деталей от коррозии при транспортировании и длительном хранении. К этому классу ингибиторов относятся, в частности, карбонат и бензоат моноэтаноламина.

Замедлители коррозии широко используются также при химических методах очистки черных металлов от окалины и ржавчины в растворах кислот. Эти ингибиторы уменьшают скорость растворения в кислоте основного металла, не снижая ее в отношении растворения ржавчины или накипи, элиминируют водородную хрупкость изделия, расход кислоты при травлении. Их действие объясняется тем, что они хорошо адсорбируются, снижая химическую активность поверхности защищаемого металла, но не его солей или оксидов.

Способом, близким по своей сути к методам обработки и изменения состава внешней среды, является помещение металла в защитную атмосферу (аргон, гелий, азот, водород, оксид углерода и др.). Это позволяет избежать образования окалины (до 3,5% экономии металла), повышает качество продукции за счет увеличения на 15-30% прочности и долговечности изделий.

Электрохимические способы борьбы с коррозией включают протекторную защиту и наложение внешней Э.Д.С. (катодная защита, или катодная поляризация).

Протекторная защита состоит в том, что к изделию при помощи проводника или непосредственно присоединяется пластинка более электроотрицательного металла. В образовавшейся гальванической паре основной металл по отношению к протектору является катодом и перестает разрушаться. Так, например, в паровые котлы вводят листы цинка, скрепленные металлической связью с их стенками. В получившемся гальваническом элементе более электроотрицательный в сравнении с железом цинк становится анодом, подвергается растворению и в виде пленки гидроксида $Zn(OH)_2$ покрывает корродируемые места котла. На стенках последнего и в дымогарных трубах выделяется также водород, снижающий окисление основного металла кислородом.

При *катодной защите* снижение коррозии достигается присоединением защищаемого металла к отрицательному полюсу внешнего источника постоянного тока. Изделие при этом поляризуется катодно. Иногда катодную поляризацию относят к *электрическим методам защиты от коррозии* (Левин).

Протекторная и катодная защиты широко применяются для предохранения от коррозии корпусов морских судов, паровых котлов, подземных металлических сооружений — трубопроводов, газопроводов, резервуаров и т.п.

При определенных условиях защита металла осуществляется не катодной, а анодной поляризацией. Это обеспечивает образование и сохранение на нем пассивирующей пленки в тех случаях, когда самопроизвольной пассивации не происходит (железо в концентрированной серной кислоте, нержавеющая сталь в неокислительных условиях).

Организационно-технические мероприятия используют для защиты металлических конструкций от электрокоррозии блуждающими токами.

Поля блуждающих токов образуются за счет утечек с электрифицированного рельсового транспорта, заземленных промышленных установок и станций катодной защиты. В результате в 5-10 раз повышается коррозионная активность грунтов. Как следствие, например, около 30% повреждений в трубах на территории Москвы приходится на долю электрокоррозии от блуждающих токов и около 24% ее площади отнесено к территории с высокой степенью коррозионной опасности. На ней электрические поля блуждающих токов в сотни раз превышают естественный фон (*Мазур...*).

Для борьбы с блуждающими токами предусматривают:

- удаление трасс коммуникаций тепловых сетей от рельсовых путей электротранспорта и уменьшение количеств пересечений с ними;

- увеличение переходных сопротивлений между трубопроводами и грунтом за счет применения электроизолирующих опор труб;

- установку изолирующих фланцев на трубопроводах при их подводе к объектам, являющимся источниками блуждающих токов (тяговые подстанции, ремонтные базы и т.д.);

- повышение продольной электропроводимости трубопроводов на защищаемом участке установкой продольных токопроводящих перемычек на сальниковых компенсаторах и фланцевой арматуре;

- уравнивание электрического потенциала между параллельными трубопроводами, прокладываемыми в общих строительных конструкциях; поперечные электроперемычки между смежными трубопроводами при использовании электрических методов защиты последних.

Выбор метода защиты от коррозии в общем случае зависит от условий, в которых используются металлические конструкции, материалы, заготовки. Так, для защиты изделий, не подвергающихся механическому воздействию и находящихся в жилых помещениях, зачастую достаточно однослойных лакокрасочных покрытий или химической обработки, например оксидирования. Для конструкций (железнодорожные мосты, подъемные краны, портовые сооружения, вагоны, кузова

автомобилей и т.д.) применяют более сложные по составу многослойные покрытия. Для деталей, работающих при повышенных температурах, не следует применять термически нестойкие лакокрасочные покрытия, для трущихся поверхностей нельзя использовать, например, фосфатирование, повышающее их коэффициент трения.

Выбор метода защиты предполагает также учет конструктивных особенностей изделий. Так, на детали сложной конфигурации (резкие сопряжения отдельных частей, внутренние полости и т.п.) трудно нанести равномерное по толщине гальваническое покрытие.

Методы защиты во многих случаях не только предохраняют металл от коррозии, но и придают изделиям из него высокие декоративные свойства. В частности, при отделке легковых автомобилей и мотоциклов сочетают полимерные лакокрасочные материалы с трехслойными металлическими покрытиями медь-никель-хром.

Весьма существенную роль при выборе антикоррозионных методов играют экономические соображения: стоимость защиты не должна превышать стоимости защищаемой конструкции. Наиболее дешевые варианты — это лакокрасочные покрытия и протекторы. Фосфатирование и оксидирование по стоимости близки к лакокрасочным покрытиям. Однако даже цинковое покрытие, наиболее дешевое из металлических, в несколько раз дороже лакокрасочного. Тем не менее при защите уникальных изделий, точных механизмов и приборов экономически целесообразным может оказаться применение самых дорогих методов, например золочения и серебрения (ювелирная промышленность, военная, космическая техника и пр.).

Способы, выбранные для защиты от коррозии, указываются в рабочих чертежах конструкций, в СНиПах, технических условиях и другой документации.

В процессах коррозии и при выполнении антикоррозионных мероприятий возникает значительное количество отходов. Это окалина первичных и замасленные шламы вторичных отстойников прокатных цехов, осадки и растворы травильных отделений этого передела, гальваношламы и др. В ряде случаев они представляют ценное вторичное сырье.

5.2. Коррозия неметаллических материалов

По масштабам наносимого экономического ущерба наиболее существенна коррозия строительных материалов. По химическому составу их разделяют на неорганические и органические, те и другие могут быть искусственного и естественного происхождения. Среди неоргани-

ческих материалов искусственными являются цемент, бетон, керамика, стекло, естественными — щебень, гравий, галька, песок, глина и т.п. К органическим искусственным материалам относятся битумы, дегти, композиции на их основе, к естественным — древесина и изделия из нее. Особую группу составляют комбинированные материалы: полимербетоны и бетонополимеры, древесно-цементные.

Объемы производства и коррозии строительных материалов еще более значительны, чем металлов. Так, например, ежегодное мировое производство стали превысило уровень 1 млрд т, цемента — два млрд т, круглых лесных материалов — 3500 млн м³, всех строительных материалов — 12 млрд т. При этом ущерб, наносимый коррозией памятникам культуры (скульптурным, архитектурным и др.), изготовленным из строительных материалов, вообще не имеет какого-либо приемлемого эквивалента ценности.

Наибольшие масштабы коррозии неметаллов связаны с разрушением искусственных неорганических материалов и древесины.

5.2.1. Искусственные неорганические строительные материалы

Основная масса их представлена цементами и бетонами различного состава.

К цементам относятся дисперсные порошки, которые при смешении (затворении) с водой постепенно затвердевают, превращаясь в прочное камневидное тело. Основную их долю составляют вяжущие портландцементного типа (свыше 90% всего выпуска вяжущих), а также известь и гипс (кн. 1, разд. 8).

Бетон — один из древнейших строительных материалов (кн. 1, разд. 9.2.1.1).

Изделия из цемента и бетона, как и всякий другой материал, со временем подвергаются коррозии. На них воздействуют: природные воды (речные и морские) под давлением и омывающие; промышленные и бытовые стоки; сезонные и дневные колебания температур, атмосферной влажности; физические (волны, выветривание) и микробиологические факторы. В своей совокупности они составляют внешнюю причину коррозии. К разрушению приводят также внутренние причины: водопроницаемость изделий, взаимодействие щелочей цемента с кремнеземом заполнителей бетона, различия в температурных коэффициентах расширения отдельных составляющих и т.д.

В целом вся совокупность агрессивного воздействия окружающей среды на искусственные неорганические материалы может быть сведе-

на к физическим и химическим факторам, физической и химической коррозии.

К числу *физических* факторов относятся рассматриваемые ниже температурные (попеременное замораживание и оттаивание, нагрев и охлаждение) и влажностные колебания среды, отложения растворимых солей в порах и капиллярах цементного камня и бетона (солевой фактор коррозии).

Попеременное замораживание и оттаивание испытывают практически все сооружения в условиях атмосферного воздействия. При этом возникают две разрушающие силы. Первая обусловливается увеличением объема воды ($\sim$ на 9%) при ее замерзании, что приводит к большим гидравлическим давлениям на стенки пор и капилляров; вторая повышает осмотическое давление вследствие роста концентрации растворенных веществ в воде при льдообразовании. Величина осмотического давления достигает 1-2 МПа (*Бумт...*).

Бетонные и цементные конструкции могут находиться в зоне повышенных температур, например в металлургических и химических цехах. При 300-400°C и более высоких температурах вначале разлагаются гидратные новообразования, а затем и другие составляющие цементного камня, что снижает его прочность. Для повышения жаростойкости в бетоны вводят измельченные добавки шамота, туфа, трепела и т.п., образующих термически более стойкие соединения. Так, введение хромо-магнетитового порошка позволяет получить бетоны с огнеупорностью до 1700°C. Другим разрушающим фактором являются разные коэффициенты термического расширения различных компонентов цемента и бетонов, что особенно сказывается при быстрых скоростях нагревания и охлаждения массивных конструкций.

Попеременное увлажнение и высыхание вследствие климатических особенностей региона или специфических условий работы конструкции приводит к возникновению в ней деформаций набухания и усадки, которые можно заметно нейтрализовать, изменяя количество и гранулометрический состав заполнителей, вид и расход цемента, водоцементное отношение.

Солевая коррозия материалов возникает, если в грунтовых водах содержится большая концентрация водорастворимых солей (Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , MgSO_4), а климат местности сухой и жаркий. Солевые растворы в таких условиях регулярно поступают в поры изделия, при этом вода из него испаряется, а из пересыщенного раствора выделяются кристаллогидраты, например $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Этот переход сопровождается увеличением объема твердой фазы в 1,5-3,0 раза и возникновением напряжений в теле изделия, равных десяткам мегапаскалей. В таких случаях испарение воды и разрушение,

например стеновых конструкций, обычно наблюдают на высоте 10-50 см от поверхности земли. Данный вид коррозии можно предотвратить, используя цементы и бетоны с малой открытой пористостью или защищая их гидроизоляцией.

Химические факторы коррозии включают воздействие на конструкции различных водных (растворы кислот, солей, щелочей) и кислых газовых (CO_2 , SO_2 , H_2S и т.д.) сред, а также ряда органических веществ. В этом случае разрушение происходит в основном по двум причинам: а) растворение соединений, составляющих затвердевший цемент, или продуктов их взаимодействия с компонентами внешней среды; б) образование под влиянием агрессивных сред новых веществ, имеющих больший объем, чем исходные соединения.

Выделяют несколько видов химической коррозии: выщелачивания, сульфатную, магниезальную, хлоридную, кислотную, углекислую, газовую, органическими соединениями. Их краткая характеристика дана ниже.

Коррозия выщелачивания заключается в постепенном растворении и вымывании из цементов и бетонов. Она наблюдается при фильтрации через них воды под давлением или их омывании ею. В этих условиях основные соединения цементного камня, прежде всего оксид кальция, растворяются в воде (1,3 г/л CaO при комнатных температурах). Поскольку уже через 1-3 месяца твердения в обычных условиях содержание оксида кальция в цементном камне может достигать 10-15%, то его вымывание существенно ослабляет структуру последнего. Для снижения выщелачивания извести необходимо выбирать цементы с гидравлическими добавками, использовать бетоны с повышенной плотностью.

Сульфатная коррозия состоит в том, что водные растворы, содержащие сульфаты кальция, магния и щелочных металлов, вступают в реакции с составляющими цемента (гидроксидами, гидроалюминатами кальция), образуя гипс и гидросульфалоюминаты кальция. Последние имеют значительно больший объем, чем исходные компоненты. Это вызывает разбухание и искривление элементов строительных изделий. Данный вид коррозии чаще всего проявляется в сооружениях под действием морской воды, в которой концентрация сульфатов обычно равна 2-3 г/л в пересчете на ион SO_4^{2-} . Присутствие в воде солей хлора уменьшает разрушающее действие сульфатов, так как гипс и гидросульфалоюминаты кальция повышено растворимы в растворах хлоридов и, вымываясь, устраняют причину разрушения.

Элиминирования сульфатной коррозии можно достичь снижением в цементном камне содержания гидроксида и гидроалюмината кальция, а также других составляющих, способных взаимодействовать с сульфа-

тами с образованием соединений, разрушающих структуру. Важным фактором является повышение плотности и непроницаемости бетона, особенно на стыках конструкций.

Магнезиальная коррозия обусловлена обменной реакцией между растворимой солью магния, прежде всего хлористым магнием, и гидроксидом кальция. Образующийся гидроксид магния не обладает вяжущими свойствами и менее растворим, чем $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Последнее обуславливает протекание реакции до конца, т.е. до полного израсходования гидроксида кальция, что резко снижает прочность конструкций и ведет к их разрушению. Коррозия цемента под действием хлористого магния становится значительной при его концентрации в воде 1,5-2,0%.

Еще более разрушительна комбинированная *сульфатно-магнезиальная коррозия*, в которой принимает участие сернокислый магний. В этом случае образуется не только гидроксид магния, но и двуводный гипс:



Меры снижения магнезиальной коррозии аналогичны отмеченным для сульфатной коррозии.

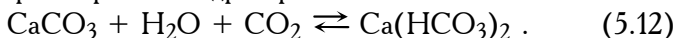
Хлоридная коррозия определяется присутствием растворов хлоридов натрия и калия. При умеренных концентрациях они не оказывают отрицательного влияния на прочность цементного камня, так как образующиеся при их взаимодействии с гидроксидом кальция растворы гидроксидов натрия и калия при концентрациях до 5% заметно не влияют на бетон нормальной плотности. Более агрессивны растворы хлористого кальция высокой концентрации. Однако хлоридная агрессия опасна для железобетонных конструкций, поскольку при воздействии на металл хлоридов натрия, калия и кальция протекает его электрохимическая коррозия. Этому способствует вымывание из изделий образующихся хорошо растворимых хлоридов железа.

Кислотная коррозия возникает под влиянием различных неорганических кислот, химически взаимодействующих с гидроксидом кальция и другими составляющими цементного камня. При этом образуются или легкорастворимые соли, которые вымываются из бетона, или нерастворимые соединения, например гидроксиды кремния или алюминия в виде рыхлых масс. Взаимодействие сопровождается снижением прочности и полным разрушением конструкций. Данный вид коррозии может протекать очень интенсивно, так как цементный камень содержит значительное число оснований и солей, которые обычно энергично взаимодействуют с кислотами.

Отрицательное действие кислых вод в безнапорных сооружениях на бетоны нормальной плотности становится заметным при pH среды

$\leq 6,5$, а на особо плотные — при $\rho H \leq 4,9-4,0$. Серная, соляная, азотные кислоты 1%-й концентрации, как и 5%-я фосфорная кислота, сильно разъедают бетон в течение небольшого периода времени.

К кислотному типу относится также *углекислая коррозия*, развивающаяся при воздействии на цементный камень и бетон воды, содержащей диоксид углерода. Первоначальное взаимодействие с ним гидроксида кальция цементного камня приводит к образованию малорастворимого карбоната кальция. Однако продолжение процесса ведет к появлению более растворимого гидрокарбоната:



Для защиты бетонов от кислых сред используют специальные кислотостойкие вяжущие (кварцевые цемента, жидкие стекла). Повышенной стойкостью обладают также полимерцементные композиции на полихлоропреновом и натуральном латексах. Кислотоупорность обычных бетонов можно повысить, обрабатывая их поверхность разбавленными серными и соляными кислотами или растворами хлоридов кальция и магния. В этом случае поверхностные поры закупориваются продуктами реакций между обрабатываемым веществом и натриевыми солями цементного камня, что повышает водостойкость последнего.

Газовая коррозия состоит в том, что бетонные конструкции разрушаются газами, содержащимися в атмосфере (SO_2 , NO_2 , H_2S и др.). Их присутствие даже на уровне ПДК или несколько более высоким, т.е. порядка сотых долей миллиграмма на метр кубический, достаточно для коррозии материалов. Практически все составляющие цементного камня и бетона термодинамически не устойчивы в присутствии этих газов. Последние наиболее агрессивны во влажной атмосфере, когда образуются растворы, выпадающие в виде кислотных дождей (разд. 5.3.2.1). В данном случае для защиты от коррозии наиболее эффективно применение многослойных лакокрасочных покрытий, которые периодически, через три-четыре года, возобновляют, или использование в качестве заполнителя бетонов карбонатов, более стойких к воздействию кислых газов.

Коррозия органическими соединениями заключается в том, что ряд из них, например уксусная, молочная, масляная и винная кислоты, обычно содержащиеся наряду с другими в пищевых продуктах и отходах их изготовления, агрессивны по отношению к искусственным неорганическим строительным материалам. Вызывает коррозию ряд растительных масел (льняное, хлопковое, тунговое) и жиров животного происхождения, например рыбьего. В этих соединениях находятся высокомолекулярные кислоты, насыщенные и ненасыщенные (олеиновая, стеариновая, пальмитиновая и др.). При взаимодействии с гидроксидом кальция цементного камня они омыляются с образованием много-

атомных спиртов и солей жирных кислот, в частности олеата и глицерата кальция, разрушающих материал. Влияние нефти и минеральных масел на коррозию выражено заметно слабее, так как они химически не взаимодействуют с компонентами цементного камня.

Таким образом, для обеспечения долговечности искусственных неорганических строительных материалов в условиях агрессивной среды обычно применяют плотные бетоны или специальные марки цемента, устойчивые к коррозии. Высокая плотность обеспечивается правильным проектированием состава бетона, высококачественными заполнителями, введением пластифицирующих и гидрофобизирующих добавок, некоторых полимеров в виде замазок, мастик и т.п.

Если перечисленные меры не могут дать требуемого эффекта, то изделие изолируют от окружающей среды. Для этого прибегают к двух-трехкратной окраске поверхностей битумными эмульсиями, покрытию их расплавленным битумом, оклейке рулонными материалами типа гидроизола, оштукатуриванию горячими асфальтовыми мастиками, различным способом гидроизоляции. Иногда, например при углекислотной коррозии, вокруг конструкции устраивают засыпку из карбонатных пород, способствующих смягчению агрессивности воды при ее фильтрации через эти материалы. Следовательно, способ защиты от коррозии в каждом конкретном случае определяется в зависимости от ее причин.

Особую группу изделий составляют памятники материальной культуры: старинные здания, внешняя скульптура, триумфальные арки, колонны, пирамиды и т.п. Для их защиты зачастую используют дорогостоящие методы, в частности пропитку специальными составами, нанесение лаковых покрытий. В музейных условиях дополнительно поддерживают оптимальные температуру и влажность среды, в ряде случаев — контролируемую атмосферу (в среде нейтральных газов, в вакууме и пр.).

5.2.2. Строительные материалы из древесины

Эти материалы относятся к числу естественных воспроизводимых ресурсов органического происхождения, нашедших широкое применение. Во многих районах России они являются единственными при жилищно-гражданском строительстве и возведении небольших жилищно-хозяйственных построек. Привлекательность древесины объясняется ее специфическими свойствами: сравнительно высокой прочностью, небольшой объемной массой, низкой теплопроводностью, легкой обраба-

тываемостью. Вместе с тем она имеет недостатки (склонность к загниванию, сгораемость и т.д.).

Для повышения био- и огнестойкости древесины обрабатывают антисептиками, антипиренами, огнестойкими красками и обмазками.

Антисептики, т.е. вещества, вызывающие гибель микробов, в том числе гнилостных, можно разделить на растворные, чистые органические жидкости и пасты. Все они представлены органическими, а также неорганическими веществами (в растворах и пастах).

К *антисептикам растворным* относятся динитрофенолят $C_6H_3(NO_2)_2ONa$ и фенолят натрия C_6H_5ONa , нафтенат меди, оксидифенол, фтористый (NaF) и кремнефтористый $[(NH_4)_2SiF_6]$ аммоний и др. Большая часть перечисленных веществ токсична. Применяют их в водных растворах 3-5%-й концентрации или растворяя в жидких нефтепродуктах (мазуте, керосине и т.п.).

Чистые органические жидкости-антисептики включают каменноугольное, каменноугольное полукоксовое, антраценовое, сланцевое масла, карболинеум. Их применяют в подогретом до 50-60°C состоянии. Пропитанная ими древесина снижает гигроскопичность и не поддается окраске. Они являются лучшими антисептиками для шпал, воздушных опор, опор мостов и т.д.

Антисептирующие пасты (битумные, силикатные, глиняные и др.) применяют для защиты деревянных конструкций, работающих в грунтах с переменной влажностью.

Антипирены предохраняют древесину от воспламенения и самостоятельного горения. Их действие определяется низкой температурой плавления, при которой образуется плотная пленка, преграждающая доступ кислорода к материалу, или разложением при нагревании с выделением инертных газов, затрудняющих горение. К наиболее распространенным антипиренам относятся фосфат $[(NH_4)_3PO_4 \cdot 3H_2O]$, сульфат $[(NH_4)_2SO_4]$ и хлорид (NH_4Cl) аммония, бура $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ и борная кислота H_3BO_3 , хлористый цинк. Их используют в виде водных растворов из расчета 50-66 кг безводного вещества на $1 м^3$ пропитываемой древесины.

Эффективны и распространены для защиты от огня *краски*, обычно силикатные. Они включают жидкое растворимое стекло, тонкомолотый кварцевый песок, мел, магнезит и другие добавки.

В качестве *обмазки* наиболее часто применяют суперфосфат-сульфитную композицию, состоящую из смеси 25% суперфосфата, 15% сульфитного щелока, 25% глины и 35% воды с пигментом. Простейшим и общедоступным средством защиты древесины и конструкций из нее от огня является обмазка на основе глины, извести, гипса и других компонентов.

В некоторых случаях для предохранения древесины от возгорания достаточно конструктивных решений: предотвращения ее непосредственного соприкосновения с огнем, удаления от источника нагревания.

5.3. Эрозионные процессы

Эти явления, ведущие к разрушению горных пород и почв, равным образом обуславливаются как природными факторами геологического характера, ведущими к изменению поверхности Земли, так и антропогенными нагрузками на окружающую среду.

5.3.1. Геологическая деятельность

5.3.1.1. Общие представления

Земная кора находится под влиянием внутренних (эндогенных) и внешних (экзогенных) сил. Первые приводят к образованию крупных форм рельефа — гор, вулканов, плоскогорий, глубоких впадин — в результате поднятия и опускания земной коры, тектонических (горообразующих) сдвигов, вулканической деятельности, землетрясений. Вторые вызывают разрушение первичных магматических и метаморфических горных пород, образование осадочных материалов вторичного происхождения. В возникновении экзогенных процессов основную роль играют энергия Солнца и, отчасти, сила тяжести.

Продукты разрушения пород ветром, водой, ледниками и т.п. перемещаются в сторону падения рельефа, что приводит к постепенному выравниванию поверхности и образованию долин.

Интенсивность эрозии горных пород принято определять временем, необходимым для разрушения их слоя высотой 1 м. Эта продолжительность меньше в горных районах и составляет, например, 1750 лет для Северных Альп, 2210 — для Кавказа, 3750 — в Средней Азии. На равнинных территориях она значительно больше (порядка 33 тыс. лет в европейской части России).

Все факторы экзогенного воздействия проявляются либо на границе атмосферы и литосферы, либо гидросферы и литосферы. В первом случае наиболее разрушительными являются колебания температуры, атмосферные осадки, замерзание воды, ветер, атмосферные разряды и т.п., объединяемые в группу *атмосферных агентов*. Их совокупность обуславливает *выветривание горных пород*, их дефляцию. Во втором случае разрушение осуществляется в основном движущимися потоками воды (*водная эрозия*).

5.3.1.2. Выветривание

Этот процесс определяется многообразными факторами. В зависимости от того, какие именно атмосферные агенты являются основными и каков при этом характер изменения горных пород, различают физическое, химическое и биологическое выветривание.

Физическое выветривание разрушает горные породы без изменения их минерального состава. Оно происходит за счет быстрой смены температур, действия льда, образующегося при замерзании воды, и ветра. Решающую роль играют температурные колебания, которые в областях с резко континентальным климатом в течение суток могут достигать 40°C и более. Частая и глубокая смена температур приводит к трещинообразованию в породах, вызванному различными коэффициентами объемного и линейного расширения их отдельных составляющих. В частности, коэффициент объемного расширения кварца вдвое больше, чем ортоклаза, одного из ведущих породообразующих минералов. Обломки породы становятся столь непрочными, что для их разрушения достаточно небольшого усилия. Так, в долинах рек Кавказа нередко можно встретить гранитные валуны, по внешнему виду почти не отличимые от той же породы в ее коренных залеганиях. Однако даже при нажатии пальцами некоторые из них рассыпаются с выделением зерен кварца, полевых шпатов и слюды.

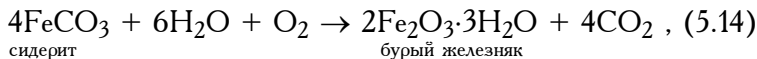
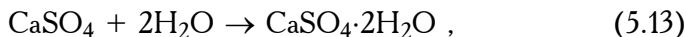
Разрушительное влияние изменения объема пород особенно возрастает при их регулярном промерзании. Как уже отмечалось (разд. 5.2.1), превращение воды в лед сопровождается 9%-м увеличением объема. Возникающее при этом давление расклинивает, углубляет и расширяет трещины.

В результате физического воздействия массивные плотные породы постепенно превращаются в *рухляк выветривания*.

Химическое выветривание имеет место при взаимодействии минералов и пород с водой и содержащимися в них веществами, с диоксидом углерода и кислородом воздуха. При этом происходит растворение минералов, изменение химического состава пород.

Хорошо растворяются, в частности, галогены (каменная соль NaCl , сильвин KCl), достаточно хорошо — сульфатные (ангидрит CaSO_4 , гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), карбонатные (известняк CaCO_3 , поташ K_2CO_3) и некоторые другие минералы. Как следствие растворения в толщах пород возникают пустоты различной величины и формы (воронки, каверны, пещеры), снижающие устойчивость первоначального массива.

Изменение химического состава пород обуславливается, например, реакциями гидратации (5.13), окисления (5.14) и гидролиза (5.15):



В результате химического выветривания порода становится еще более раздробленной и мелкодисперсной.

Обычно физическое и химическое выветривание протекают одновременно, инициируя друг друга. Первое из них преобладает в областях с континентальным сухим климатом, второе — на территориях с большим количеством атмосферных осадков.

Биологическое выветривание развивается под воздействием растительных и животных организмов, микробов, продуктов жизнедеятельности живых существ, разложения последних после отмирания. Так, способствует разрушению горных пород извлечение из них различных веществ мхами, лишайниками и корневыми системами растений. Некоторые бактерии, населяющие поры рыхлых пород на поверхности Земли и на глубинах, измеряемых сотнями метров, могут извлекать ряд элементов, в частности углерод карбонатных минералов, разрушают силикаты. Кроме того, живые организмы выделяют CO_2 и органические кислоты, способствующие растворению и гидролизу некоторых веществ литосферы. Образующиеся при разложении остатков растений и животных гумусы и низкомолекулярные органические кислоты (щавелевая, уксусная и др.) также разъедают первичные породы.

Особо следует отметить деятельность животных-землероев (мышей, сусликов, кротов и пр.). Появление большого количества нор приводит к существенному ослаблению грунтов во многих степных районах. В этом отношении примечательна история одного аэродрома в Южной Африке. До его строительства там обитали соколы, съедавшие ежедневно до шести мышей каждый. Шум самолетов разогнал птиц, что привело к спонтанному размножению грызунов. Они так разрыли грунт, что аэродром оказался не пригодным для эксплуатации.

Продукты выветривания горных пород в виде обломочного материала могут перемещаться ветрами — как во взвешенном состоянии, так и по поверхности.

Пример перемещения во взвешенном состоянии — песчаные и пылевые (чернозем) бури. Летящие по воздуху на относительно небольшой высоте частицы истирают встречающиеся на их пути выходы скальных пород, перерезают телеграфные и иные столбы, выводят из хозяйственного обращения богатые черноземные земли.

Перемещение частиц по поверхности обуславливает образование движущихся бугров: дюн по берегам рек, морей; барханов в пустынях. Скорость перемещения дюн перпендикулярно направлению господствующих ветров равна 10-30 м/год, барханов — до 20 м/сут. Все находящееся на их пути (пахотные земли, населенные пункты, дороги и т.п.) может оказаться погребенным под толщей песка. Его перенос становится особо интенсивным тогда, когда по причинам естественного и антропогенного характера нарушается дерновый покров поверхности земли.

Наиболее действенны при защите от уже начавшегося движения песков *агролесомелиоративные мероприятия*: сеяние трав, посадки кустарников и деревьев. Применяется и техническое закрепление песчаных масс с использованием различных эмульсий, например битумных. Оно используется как временная мера, необходимая на период развития корневой системы на механически укрепленных участках.

5.3.1.3. Водная эрозия

В данном виде эрозии основной разрушительной силой являются моря, потоки дождевых, талых и речных вод, грязе-каменные, ледники, оползни, карсты. Водную эрозию подразделяют на горизонтальную (плоскостную) и вертикальную (глубинную).

Горизонтальная эрозия проявляется в том, что выпадающие осадки или талые воды, стекая по уклону, захватывают и сносят вниз верхний слой рыхлой породы или почвы. В нижней части склона или у его основания снесенный материал накапливается в виде так называемых *делювиальных отложений*. Последние обычно представляют собой суглинки и супеси, по минеральному составу связанные с породами, расположенными выше по склону. Делювиальные отложения широко распространены, отсутствуя практически лишь на пустынных, бедных атмосферными осадками территориях.

Сильным средством борьбы с горизонтальной, особенно почвенной, эрозией являются лесонасаждение и травосеяние, уменьшающие поверхностный и увеличивающие подземный сток. Это обуславливается тем, что в пределах лесных участков на земле создается подстилка из опавших листьев, препятствующая стеканию воды, но достаточно водопроницаемая. Кроме того, снег, скопившийся между деревьями, тает медленнее, чем на открытых местах, что также способствует проникновению влаги в почву и повышению дебита подземных вод.

При *вертикальной эрозии* образуются *овраги* — вытянутые и разветвленные углубления, врезанные в рыхлую породу. Их образованию способствуют пересеченный рельеф местности, ливневый характер выпадающих осадков, быстрое снеготаяние, наличие легко размываемых по-

род (лесс, лессовидный суглинок, супесь). Оврагообразование приводит к потере больших площадей плодородных земель, что подтверждается примером ряда российских областей (Орловской, Курской, Воронежской и др.).



Рис. 5.3. Борьба с оврагообразованием с помощью бьфов

Основная мера предупреждения оврагообразования — снижение поверхностного и увеличение подземного стока, что достигается за счет лесозащитных насаждений. Большое значение имеют также почвозащитные приемы (разд. 5.3.2.2). Для стабилизации уже имеющихся оврагов применяют и простейшие мелиоративные мероприятия, например устройство запруд, делящих овраг в продольном направлении на ряд бьфов (рис. 5.3). Запруды устраивают из подручного материала: камня или fascин из хвороста. Дно оврага в месте переливания воды через запруду укрепляют камнями или деревьями.

При прекращении роста овраг постепенно сглаживает свои очертания, зарастает и превращается в балку.

Различные виды водных потоков вносят свои особенности в водную эрозию.

Речные воды перемещают продукты эрозии в виде растворенных веществ, взвешенных частиц песка, пыли, ила, а также волочением по дну. Часть материала уносится в озера, моря, океаны, другая

образует осадки преимущественно механического происхождения (аллювиальные наносы). Одновременно формируются *речные долины*. Вначале они развиваются в результате вертикальной, а затем расширяются вследствие плоскостной эрозии, приобретая сложное строение. В их состав входят *русло* — ложе, по которому течет река, *пойма* — часть долины, заливаемая в половодье, и *террасы* — приподнятые над поймой горизонтальные или слегка наклонные территории. Возникают также *дельты* — участки побережья при устьях рек, образуемые речными отложениями, и *водоразделы* — участки суши, отделенные друг от друга долинами рек. Аллювиальные отложения скапливаются, как правило, в пойме и руслах.

Эрозийная деятельность моря проявляется преимущественно в волновом воздействии на берег (абразия). Давление волн может достигать

10 т/м² и способно перемещать глыбы массой более 100 т. Обломочный материал, вовлеченный в движение, вызывает дополнительное разрушение горных пород. Абразия приводит к отступлению берега, иногда со скоростью 50-80 м/год.

Как следствие деятельности моря на побережьях возникают береговые валы, косы, бухты, морские террасы.

Для снижения воздействия моря на берег, особенно в пределах населенных пунктов, портов, пристаней и т.п., в ряде случаев создают искусственные и укрепляют естественные пляжи, выполняющие роль волногасителей. Это делают с помощью *бун*, устраиваемых через несколько десятков метров одна от другой. В простейшем варианте они представляют собой деревянные ряжи (срубы из бревен, заполняемые камнем), которые располагают перпендикулярно линии берега. Для изготовления бун широко используют также бетон и железобетон.

Из других защитных сооружений отметим волнорезы (волноломы) и молы. *Волнорез* представляет собой заградительную стенку или вал либо отдельные бетонные или железобетонные кубы недалеко от береговой линии. *Мол* — сооружение, возводимое обычно в районе гавани в виде прочной стены, примыкающей одним концом к берегу, а другим уходящей в море. Его используют также для причаливания судов.

К опасным природным явлениям относятся склоновые перемещения масс. Наиболее существенны из них сели, ледники, оползни и близкие к последним обвалы и осыпи. Эти перемещения — из категории гравитационных и представляют собой смещение масс вниз по рельефу под воздействием силы тяжести. Смещение усиливается наличием воды.

Сели, или *грязе-каменные (грязевые) потоки*, периодически появляющиеся в горных и предгорных областях, состоят из воды и влекомых ею крупных и мелких обломочных материалов. Масса их значительна. Один из таких потоков 1926 г. в течение четырех часов выбросил на улицы Алма-Аты около 665 тыс. м³, или порядка 1,3 млн т, грязи и камней, снес дома, фруктовые сады, привел к гибели людей и животных. Весьма мощные селевые потоки, спровоцированные извержением вулкана Эль-Руиз (Колумбия, 1985 г.) привели к гибели 23 тыс. жителей г. Армеро. Здания и деревья были буквально срезаны селом.

Возникновению селей способствует разрушение дернового покрова, вырубка деревьев и кустарников в пределах водосборных площадей, оврагов, балок и рек. Поэтому сохранение растительных форм является важнейшим профилактическим мероприятием в борьбе с селями.

Для защиты от них населенных пунктов, как и при борьбе с оврагами, устраивают запруды. В отдельных случаях создают специальные бассейны для отвода в них грязе-каменных потоков. Здесь последние освобождаются от выпадающего на дно обломочного материала. Боль-

шое значение имеет также ливневая канализация, локализующая водные потоки и снижающая возможность образования селей.

Большой разрушительный потенциал таят в себе *ледники*. Причина их образования — выпадение большого количества снега на территориях с низкой температурой. Снег в таких условиях не успевает таять, постепенно накапливается, под действием силы тяжести уплотняется и превращается в кристаллический лед. В настоящее время ледники занимают около 10% суши, причем только 0,5% из них находится в горных районах, остальные расположены в полярных областях.

Скорость перемещения ледника возрастает с увеличением массы и угла наклона местности, составляя 0,1-22 м/сут. При движении он производит громадную эрозионную работу: прорывает котловины, разрушает скалы, переносит захваченный материал. Последний при таянии льда освобождается, транспортируется ледниковыми водами далее, откладываясь в другом месте.

Ледники изымают значительное количество воды из гидросферы и, как следствие, понижают уровень Мирового океана. Их таяние приводит к обратному результату. О масштабах возможного колебания уровня воды можно судить по тому, что если бы современные льды Антарктиды полностью растаяли, то это привело бы к подъему уровня океана на более чем 60 м (разд. 1.6).

Оползни представляют собой смещение грунтов под действием силы тяжести по увлажненной поверхности скальных пород. Оно возникает при внезапном движении земли в районах с крутыми склонами и, как правило, при наличии значительных осадков. Оползни — частое явление на склонах долин рек, оврагов, берегов морей, искусственных выемок. В России оползневые процессы развиты на Черноморском побережье Кавказа, в долинах Волги, Днепра, Дона и других рек, в горных районах. Их наличие снижает устойчивость массивов горных пород, приводит к нарушению поверхностного стока, истощению ресурсов подземных вод при их вскрытии, образованию заболоченностей, гибели почвенного покрова и т.д.

Особо драматические ситуации возникают, если оползень или обвал (обрушение горных пород со скальных или относительно сухих рыхлых крутых склонов) происходят вблизи населенных пунктов.

Так, в 1903 г. в Канаде обрушилась вершина горы Тертл, низвергнув на горняцкий поселок более 30 млн м³ пород. Погибло 70 человек, была засыпана Трансканадская железная дорога. В 1959 г. оползень, вызванный землетрясением в Монтане (США), привел к образованию нового озера Эфквейн. Число жертв составило 28 человек. В Непале от оползней погибло 35 тыс. жителей. В результате

массовой активизации оползней в Чечне и Ингушетии зимой и весной 1989 и 1998 гг. без крова осталось около 27 тыс. человек.

Карсты как геологическое явление возникают в водонеустойчивых осадочных горных породах (известняках, доломитах, гипсах, каменной соли, др.) и приводят к образованию приповерхностных и подземных пустот (воронок, провалов, пещер, котловин и т.п.).

Карсты широко распространены в мире, в том числе и в России, в частности в Башкирии, в центральной части Русской равнины, в Приангарье, на Северном Кавказе — почти везде, где имеются растворимые горные породы.

5.3.2. Антропогенное воздействие

Антропогенное воздействие на процессы эрозии почв по масштабам и последствиям сравнимо с геологическим, особенно в ареалах интенсивного хозяйствования людей и невысокого уровня противоэрозионных мероприятий. Формы этого воздействия, как следует из нижеизложенного, многообразны.

5.3.2.1. Факторы деградации почв

Площадь земельных ресурсов мира составляет 129 млн км², или 86,5% суши. Из них пахотно-пригодными, по различным оценкам, являются 25-35 млн км², из которых используются около 15 млн км². Сенокосы и пастбища занимают 37,4 млн км².

Земельный фонд России в 2002 г. был равен 1709,6 млн га, в том числе (в скобках — проценты): земли сельскохозяйственных предприятий и граждан — 651 млн га (38,1); лесной фонд — 878 (51,4); территория населенных пунктов — 6,2 (0,4); земли промышленности, транспорта, связи и иного несельскохозяйственного назначения — 17,7 (1,0); природно-заповедный фонд — 20,7 (1,2); водный фонд — 18,1 (1,0); земли запаса — 117,8 (6,9).

Земельные ресурсы России сельскохозяйственного назначения, в первую очередь для земледелия, находятся в весьма различных условиях. В частности, территории вечной мерзлоты занимают более 60% общей площади страны, однако свыше половины мировых запасов чернозема также принадлежит России.

Земельный фонд неравномерно распределен по регионам. Доля пашни в них изменяется от 5 до 70-85%. При этом распашка более половины территории считается превышающей разумные пределы.

Особенно данное обстоятельство проявляется в Центральном Черноземье, на Северном Кавказе и в Поволжье.

Основные факторы деградации почв, вызывающие ее эрозию, — сельскохозяйственные и промышленные. К первым относятся уменьшение площади лесов, вторичное засоление почв, их опустынивание, нерациональное ведение сельскохозяйственных работ, использование пестицидов. Вторые обусловлены разработкой полезных ископаемых, загрязнением токсикантами, наличием водохранилищ, подтоплением почв, размыванием морских побережий, кислотными дождями и т.д. Рассмотрим основные перечисленные сельскохозяйственные и промышленные факторы деградации почв.

Сельское хозяйство развитых стран достигло весьма высокого уровня производительности и урожайности. Так, один фермер США или Западной Европы обеспечивает продовольствием 60-80 человек; на 100 га земельных угодий занят один работник. Современный уровень сельскохозяйственной науки и практики способен обеспечить пищей до 12 млрд людей (вдвое больше, чем население Земли в настоящее время) при использовании только долин двух великих индийских рек (Инда и Ганга).

Вместе с тем интенсивный, а в некоторых случаях и хищнический характер ведения сельского хозяйства привел к обострению экологических проблем, прежде всего под влиянием водной и ветровой эрозии. На долю первой приходится до 56% всех эродированных почв, второй — 28%. Если в период до неолитической революции, т.е. до появления земледелия и животноводства, объем почвы, смываемой в реки и океаны, по оценкам, составлял 9 млрд т/год, то в 1968 г. он достиг 24 млрд т, в 2002 г., по прогнозу, 55-60 млрд т.

Одна из основных причин увеличения водной и ветровой эрозии — вырубка лесов. В стремлении ввести в оборот дополнительные земли уничтожено свыше половины всех лесов в мире. Их общая ежегодная вырубка достигает 11,6 млн га. Это, в свою очередь, приводит к резкому повышению скорости смывания почвенного слоя. По имеющимся оценкам, смывание такого слоя мощностью в 20 см при наличии леса и прочих равных условиях требует 174 тыс. лет, луга — 29 тыс., при обычной обработке почвы — 100, при полном отсутствии растительности — 17 лет. Масштабный характер влияния леса на процессы деградации почв подтверждается новейшей практикой. В частности, до вырубки леса, окружавшего один из населенных пунктов морского побережья Франции, влага дождей из его окрестностей достигала побережья через 3-4 дня. После вырубки для этого достаточно 3 ч.

Особенно разрушительна эрозия почв на склоновых землях. Смывание ее увеличивается пропорционально уклону и его длине. При по-

вышении уклона с 2 до 4° оно возрастает в 1,8 раза, с 4 до 8° — в 7,2 раза. Удлинение склона с 400 до 500 м усиливает вынос почвы на 30%, а с 300 до 450 м — почти на 50% (*Земледелие...*).

В России примерно 2/3 пашни подвергаются ветровой и водной эрозии на уровне потери плодородия. Имеется, в частности, более 400 тыс. оврагов площадью свыше 1,5 млн га. Около 26,2 млн га (20,4%) расположено на смытых почвах, 2,1 млн га (1,7%) находится под совместным воздействием водной и ветровой эрозии, 7,9 млн га (6,1%) дефлировано, всего же к дефляционной опасности относится 44 млн га (32,2%). Особую тревогу вызывает рост площади эродированных черноземов. В последние два десятилетия она увеличивается на 250-300 тыс. га/год. На многих черноземных территориях 50% и более распаханых земель эродировано. Ежегодно до 25-30 тыс. га черноземов теряется в результате роста оврагов. По оценкам экспертов ООН, Россия находится в десятке мировых лидеров по темпам распространения эрозии. В частности, водной эрозии, переувлажнению и заболачиванию подвержено более 25 млн га земель сельскохозяйственного назначения и еще свыше 7 млн га подтоплено и затоплено за счет ежегодных наводнений (Карамышев).

В целом водно-ветровая эрозия привела к полной или частичной потере плодородия на более чем половине всей пашни мира. Ежегодно по этой причине из сельскохозяйственного использования выбывает 50-70 тыс. км², что составляет более 3% ее площади.

На снесенных почвах эффективность сельскохозяйственного производства снижается на 30-60%. Нередко возделывание на них пищевых и кормовых культур без проведения мероприятий по восстановлению плодородия становится убыточным.

Губительное воздействие на качество земель оказывает их *вторичное засоление*. Оно заключается в накоплении в верхних слоях почвы легкорастворимых солей (соды, хлоридов, сульфатов и т.п.). Основная причина вторичного засоления — неумеренный, бессистемный полив земель при отсутствии дренажа, нарушение водного баланса фильтрационными водами оросительных систем. Эта экологическая проблема коснулась прежде всего аридных районов. Из 270 млн га орошаемых в мире земель 40% подвержено вторичному засолению, в том числе в Пакистане — 75, Ираке и Иране — более 50%. В Нижнем Поволжье под угрозой вторичного засоления находится практически вся орошаемая территория. Если до введения орошения грунтовые воды находились здесь на глубине 5-7 м и имели минерализацию, равную 0,4-4,5 г/л, то в результате его осуществления произошел резкий подъем уровня грунтовых вод (вплоть до 0,5-1,0 м), а степень их минерализации возросла до 14 г/л. Общая площадь засоления составляет

в России 20% сельскохозяйственных угодий, в том числе пашни — ~7% (Карамышев). На площади 22,9 млн га сельскохозяйственные угодья представлены солонцовыми комплексами, включая 9,9 млн га пашни. Вместе с тем даже слабое засоление почв резко снижает урожайность сельскохозяйственных структур, например хлопчатника и пшеницы — на 50-60, кукурузы — на 40-50%.

Значительная доля деградационных процессов в почвах связана с их *опустыниванием*, достигающим 1 млрд га на всех континентах и угрожающим еще 3,2 млрд га земель с числом жителей 700 млн. Оно приводит к потере экосистемой сплошного растительного покрова и невозможности его восстановления без участия человека. Этот процесс протекает главным образом в аридных районах под влиянием таких факторов, как сведение лесов, неумеренная эксплуатация пастбищ, нерациональное использование водных ресурсов при орошении и др.

Ежегодные потери вследствие опустынивания только орошаемых земель достигают 6 млн га, а в целом от него пострадало 40 млн га сельскохозяйственных угодий. Территории с наиболее высоким опустыниванием составляют в Азии около 19%, в Африке — 23, в Австралии — 45, в Южной Америке — 10% общей площади. Особенно значительны последствия опустынивания для стран Африки. В частности, пустыня Сахара продвигается на юг со скоростью 6 км/год. Из 200 тыс. га богарных земель осталось лишь 50 тыс. га, пригодных для сельскохозяйственных работ. Под угрозой опустынивания находится свыше 30% площади Мали.

Опустыниванию подвержен ряд территорий РФ, особенно в районах пастбищного животноводства. В Калмыкии оно охватывает 4,9 млн га, или свыше 83% площади республики. Из них 1,8 млн га находится в стадии очень сильной деградации. Ежегодный прирост пустынь Калмыкии оценивается в 40-50 тыс. га. В Астраханской области площадь нарушенных пастбищ составляет 1,3 млн га, из них 400 тыс. га приходится на подвижные пески. Половина пастбищ здесь занята сильно- и среднеразмываемыми землями. Опустыниванием охвачены земли Ростовской области (до 50% территории Сальских степей), Алтайского края (треть Кулундинских степей). Аналогичное положение наблюдается на пастбищах Бурятии и тундровой зоны. В последнем случае весьма резко сказываются такие факторы опустынивания, как перевыпас оленей, нарушение почвы при широкомасштабном освоении месторождений полезных ископаемых, неконтролируемый бездорожный проезд автотранспорта и др. За 1965-1990 гг. площадь оленьих пастбищ сократилась на 20,2 млн га.

В целом опустыниванию подвергаются земли 17 субъектов РФ. Общая территория этих земель достигает 50 млн га, в том числе неза-

крепленных песков — 6,5, сбитых пастбищ и сенокосов — соответственно 12 и 2 млн га.

Сокращение площадей продуктивных кормовых угодий наблюдается также вследствие зарастания их кустарником и мелкоколесем. Соответствующие площади достигают 10 млн га, три четверти из них — пастбища. Более 2 млн га приходится на долю закороченных сенокосов и пастбищ.

Значительный вклад в деградацию почв вносит *нерациональное ведение сельскохозяйственных работ*. Оно обуславливается применением крупной тяжелой техники, ее использованием на повышенных скоростях, увеличением размера обрабатываемых полей, количества минеральных удобрений и пестицидов — химических средств защиты растений (кн. 1, разд. 13.4). В целом по России только загрязненная пестицидами почва при их весеннем обследовании обнаружена на 5,8% площадей. Загрязнение особенно заметно проявляется в Московской и Иркутской областях.

Нерациональное ведение сельскохозяйственных работ в существенной степени связано также с низкой агрохимической культурой. По агрохимическим показателям значительная доля пахотных земель России низкопродуктивна, особенно в Нечерноземье. В частности, свыше трети пашни представлено закисленными почвами, в том числе сильно- и среднекислыми (pH не более 5,0) — 13%. Рост этих площадей связан с применением физиологически кислых минеральных удобрений, несистематическим и некачественным известкованием почв. Если в 1976-1990 гг. известковали ежегодно 3,6-5,3 млн га, то в 1996 г. только 0,65 млн га.

Из промышленных факторов деградации почв весьма существенным является *разработка полезных ископаемых*.

Наибольший ущерб наносит их открывая добыча. Она связана с отчуждением значительных земельных площадей, которые в результате проведения горных работ становятся не пригодными для использования в народном хозяйстве. Так, для добычи 1 Мт железной руды требуется отчуждение 14-60 га, марганцевой руды — 76-600, угля — 2,6-43, нерудных материалов — 1,5-583 га. Общая площадь земель России, нарушенных при открытой добыче полезных ископаемых, а также занятых отходами последней, превысила 2 млн га. Из них 65% приходится на европейскую часть страны. В Кузбассе угольными карьерами отчуждено более 30 тыс., в районе Курской магнитной аномалии — свыше 25 тыс. га.

Карьеры, котлованы, отвалы пустой породы (терриконы) в районах открытой добычи угля и руд представляют собой ландшафт, практически лишенный жизни. Естественное возрождение в таких местах идет

замедленными темпами, надолго задерживаясь на стадии рудеральной растительности (крапива, лопух, белена и др.). Газовые выбросы из угольных и рудных пород часто ядовиты для растений и препятствуют формированию сколько-нибудь сложных растительных ассоциаций. В районах добычи полезных ископаемых открытым способом у населения фиксируется увеличение заболеваний раком легких, гипертонией, ишемией сердца, дыхательных путей и др.

В общей площади земель, нарушенных при открытой разработке, строительстве и геологоразведке, более 50% занимают сельскохозяйственные угодья.

Эрозия и, в более широком смысле, разрушение поверхности наблюдаются также при подземных горных работах. Каждый год шахты России выдают на поверхность около 18,5 млн м³ отвальных пород, под складирование которых отчуждается 500 га. Кроме того, 600 уже имеющихся породных терриконов занимают около 18 тыс. га земли. С учетом санитарных норм площадь прилегающих к терриконам отчужденных земель достигает 55 тыс. га.

Значительный ущерб наносят откачиваемые шахтные и карьерные воды, объем которых составляет 1,3 млрд м³/год. Они несут в себе более 7 млн т механических примесей и 1,3 млн т различных минеральных солей. Механической, химической и биологической очистке подвергается лишь 27-30% этих вод.

Наряду с твердыми и жидкими загрязнителями значительный ущерб флоре и фауне причиняют газовые выбросы шахт и рудников. Из дегазационных систем шахт в атмосферу выбрасывается более 600 млн м³/год метана. При самовозгорании шахтных терриконов отвальных пород (высота до 80-100 и более метров, объем до 2-4 млн м³) из них выделяются сернистые газы, оксиды углерода, продукты возгорания смолистых веществ. Их объемы ежесуточно составляют 320-364 м³ с 1 м³ горящей породы (180 м³/год с 1 м² террикона).

Большую опасность представляют провалы и прогибы земной поверхности в местах подземной добычи полезных ископаемых. Так, в Люнебурге (Германия) за вторую половину 20 в. в результате карстовых оседаний и провалов приведено в полную негодность 169 жилых зданий. В Алабаме (США) вследствие обрушения кровли полости под фундаментными опорами произошло крушение автодорожного моста. В штате Флорида разрушен комплекс зданий при образовании гигантской карстовой воронки. Крупнейшие провалы с большим числом человеческих жертв наблюдались в районах Йоганнесбурга и Стилфонтейна (ЮАР). В России в 1992 г. произошла крупнейшая в Европе авария, вызванная карстовым провалом, когда обрушился промышленный корпус НПО «Держжинскхиммаш». В Донецком и Подмосков-

ном угольных бассейнах величина прогибов составляет несколько метров при глубине разработок 300-1000 м.

Отдельные карстовые воронки достигают 50-60 м в диаметре и 30 м в глубину.

Однако максимальную величину и скорость просадки земной поверхности наблюдают в районах добычи нефти и газа, при больших откачках подземных вод.

Так, в Лонг-Бич (Калифорния, США) в результате добычи нефти и газа город опустился на 8,8 м, а горизонтальное смещение составило 3,7 м (*Мазур...*).

При откачке подземных вод образуются обширные депрессионные воронки, например в районе г. Брянска (радиус более 150 км, понижение уровня свыше 80 м), Курской магнитной аномалии (60-115 км; 65-77 м), Москвы (площадь более 20 тыс. км², понижение уровня на 110 м) (Госдоклад «О состоянии защиты...», 2003г.).

Провалы и прогибы земной поверхности в настоящее время становятся обыденными не только для мест подземной добычи, но и для крупных городов с их разветвленной сетью подземных коммуникаций промышленных предприятий, коммунального хозяйства и транспорта. В частности, в черте Москвы известны десятки просадочных воронок диаметром до 40 и глубиной до 8 м. Просадочные участки составляют в городе до 15% территорий, приуроченных к погребенным долинам р. Москва и Яуза. Соответственно в Северо-Восточной части Токио за 1920-1980 гг. уровень земной поверхности снизился на 4,5 м.

Понижение территории в совокупности с уменьшением инфильтрующей способности почв из-за масштабного асфальтирования приводит к подтоплению городов. В России в таком состоянии находится 800 тыс. га территорий 960 городов (из 1092), включая крупнейшие из них (*Мазур...*).

Инженерную защиту территорий от затопления и подтопления осуществляют в соответствии с требованиями СНиП 2.06.15-85.

За рубежом имеется успешный опыт борьбы с подтоплением города за счет устройства дренажного тоннеля сечением 25 м² (длина 230 м) с уклоном 0,2% и канала шириной 5 м при длине 450 м для спуска воды в реку. Уровень воды понизился на 5 м (*Drainage...*).

Возрастающую угрозу представляет *промышленное загрязнение почв*. Общая площадь сельскохозяйственных земель, загрязненных токсикантами, составляет 74 млн га, в том числе 60 млн га — за счет выбросов предприятий. По данным аэрокосмических съемок, ареалы распространения технологических выбросов непосредственно вокруг промышленных комплексов России охватывают территорию в 18 млн га, включая 0,7 млн га с чрезвычайно высоким уровнем загрязнения (Чер-

нобыль). Наибольший вклад в загрязнения вносят предприятия черной и цветной металлургии, химические и нефтехимические. В частности, площадь почвенного покрова, загрязненного цветными металлами и фтором, достигает 3,6 млн га, в том числе с высокой степенью загрязнения — 0,25 млн га. Самое значительное загрязнение в пятикилометровой зоне наблюдается вокруг городов Рудная Пристань Приморского края, Иркутск, Свирск, Черемхово, Нижнеудинск (все — Иркутская область), Верхняя Пышма Свердловской области.

В г. Чапаевске через 7 лет после прекращения деятельности химического комбината выявлено остаточное загрязнение почв диоксинами на площади в десятки квадратных километров. Оно в сотни раз превышает гигиенические нормативы.

Загрязнение ртутью с территорий комбинатов «Усольхимпром» и «Саянскимпром» (Иркутская область) превышает 3 тыс. т, а зона ее прямого воздействия — 45 км² (Морозов).

Десятикратные и большие значения ПДК свинца в почвах отмечены в Иркутске, Свирске, Рудной Пристани, Черемхово, Каменск-Уральском Свердловской области. Такое же превышение ПДК по меди обнаружено в г. Ревде Свердловской области, Ижевске, Санкт-Петербурге, Рязани, Нижнем Новгороде, Кирове, Томске, Рудной Пристани. Десятикратная величина ПДК сразу по трем компонентам (меди, никелю и кобальту) зафиксирована в г. Мончегорске Мурманской области.

Фтором загрязнены земли вокруг предприятий алюминиевой промышленности в г. Краснотурьинске Свердловской области, Братске, Новокузнецке, Волгограде, Красноярске. Концентрация фтора в этих районах больше фоновой в 4-10 раз, а содержание водорастворимого фтора в 10-30 раз превышает ПДК. По данным обследования территории вокруг Кандалакшского алюминиевого завода, содержание фтора в органогенном горизонте почвы больше фоновой в 3 раза на расстоянии до 20 км. И хотя различий в размерах бактериальной и грибковой биомассы не выявлено, однако отмечены изменения в таксонометрической структуре грибов и степени их доминирования по градиенту загрязнения.

Значительным фактором деградации почв являются предприятия нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслей. Зона их активного загрязнения составляет 1-3 км от предприятий при общем распространении загрязнителей, в том числе попадающих в сельскохозяйственные культуры, на расстояние не менее 20 км.

По суммарному показателю загрязнения почв в городе и в радиусе 5 км от него к чрезвычайно опасным относятся Мончегорск, Ревда и Белово Кемеровской области.

Особенно опасно загрязнение почв радионуклидами, достигающее на Европейской территории России 6 млн га, на Южном и Среднем Урале — 2 млн га.

Существенны масштабы загрязнения за рубежом. Так, в Германии насчитывается 50 тыс. участков загрязненной земли, в Нидерландах — 100 тыс., Дании — до 10 тыс. Площадь загрязнения в Великобритании равна 200 тыс. га. Значительным источником загрязнения территорий тяжелыми металлами являются заводы по сжиганию отходов. При этом концентрация меди, свинца, цинка, кадмия спустя 10 лет после отбора проб изменяется незначительно.

Заметное разрушение окружающей среды вызывают места размещения промышленных и бытовых отходов: шламо- и хвостохранилища, свалки, включая санитарные, полигоны и т.п. Их общая площадь в России составляет 3 млн га.

Загрязнение почв нередко тормозит ход почвообразовательных процессов, резко снижает урожайность, вызывает накопление вредных веществ в растениях. Из последних они прямо или опосредствованно (через продукты питания) попадают в организм человека. Ослабляется также самоочищающая способность почв, что повышает опасность заболеваний, вызываемых болезнетворными бактериями. Например, в обычных условиях возбудители дизентерии, тифа и паратифа сохраняются 2-3 сут. В ослабленных загрязнителями почвах возбудители дизентерии опасны несколько месяцев, а тифа и паратифа — до полутора лет.

Определенный вклад в эрозию земель вносят *гидротехнические сооружения*, особенно крупные водохранилища. В России их насчитывается более 260 с суммарной площадью водного зеркала 15 млн га. В числе их самое большое по объему вод долинное Братское водохранилище (169 км³) и второе на планете по акватории Куйбышевское (5900 км²). Водохранилища изменяют режим грунтовых вод, затопляют большие участки плодородных земель, приводят к вторичному засолению почв и т.д. Примерно 60-70% территории этих сооружений составляют затопленные земли.

С наличием гидротехнических сооружений (водохранилищ, плотин, каналов и др.) в значительной степени связана проблема *подтопления*, т.е. повышения уровня грунтовых вод. Этот процесс развивается на застроенных территориях и на участках, прилегающих к водохранилищам и орошаемым массивам. Общая территория подтопления в России достигает 9 млн га, в том числе застроенная — более 0,8 млн га. Подтопленные сельскохозяйственные угодья составляют 5,0 млн га, включая 1,6 млн га орошаемых земель.

Следует отметить аварийное состояние гидротехнических сооружений на 200 водохранилищах и 56 накопителях жидких промышленных отходов. Только за 1996-1998 гг. на гидротехнических сооружениях России произошло 400 аварий. Особенно масштабные последствия отмечены в Калмыкии, где из берегов вышло 150 водонакопителей.

Известны также проседания земель под крупными плотинами ГЭС и водохранилищами. Например, скорость оседания оснований плотин Братской и Усть-Илимской ГЭС превышает 10 мм/год. Большая часть Пермской области ежегодно оседает на 7 мм, что объясняется наличием чаши Камского водохранилища (площадь 1915 км², объем воды 12,2 км³).

Значительно антропогенное воздействие на морское побережье — пограничную полосу между сушей и морем. Общая протяженность береговой линии Мирового океана достигает 777 тыс. км, и, согласно оценкам ООН, в 2000 г. более 70% жителей планеты должно было сосредоточиться в прибрежной полосе шириной до 60 км. В настоящее время в ней находится более 10 портов с ежегодным грузооборотом свыше 10 млн т каждый. Среди них такие гиганты, как Роттердам и Иокогама (грузооборот превосходит 150 млн т), Нью-Йорк, Лондон, Марсель, Антверпен (50-100 млн т). Объем грузов, перевозимых морским транспортом, к концу 20 в. достиг 5 млрд т, что превышает аналогичные показатели железнодорожного транспорта.

Преобладающими причинами развития эрозии в прибрежной зоне, связанными с антропогенными нагрузками, являются добыча минерального сырья (песок, галька, коралловый материал для производства цемента и т.д.) и сокращение стока рек при строительстве плотин и водохранилищ. В частности, только за период 1940-1970 гг. с советского побережья Черного моря и из русел впадающих в него рек вывезено более 30 млн м³ песка и гальки. Данное обстоятельство преимущественно обусловило размыв берега со скоростью до 4 м/год со стороны г. Сочи. Для стабилизации процессов в береговой зоне здесь потребовалась периодическая искусственная отсыпка обломочного материала.

Все возрастающий ущерб наносят *кислотные дожди* — атмосферные осадки, имеющие рН менее 5,6. Своим возникновением они обязаны загрязнению атмосферы промышленными выбросами оксидов серы и азота, образующих с парами воды слабые растворы кислот. Воздействие кислотных дождей многообразно: погибают леса, сокращается количество видов гидробионтов, особенно высокоорганизованных, в озерах, наблюдается бурный рост белого мха, свидетельствующий о том, что водоем стал биологически мертвым. Весьма серьезна проблема кислотных дождей для Китая, где они загрязнили

2,8 млн км² территории, в том числе 2 млн га сельскохозяйственных угодий.

В плане развития эрозии отметим, что кислотные дожди приводят к закислению почв. В начальной стадии этого процесса значительно, в среднем на 20-30%, падает урожайность некоторых сельскохозяйственных культур (хлопчатник, томаты, виноград, цитрусовые и т.д.). При снижении рН до менее 5,0 вырождение плодородия начинает резко прогрессировать, а при рН ~3,0 почвы становятся практически потерянными для сельского хозяйства. Особенно восприимчивы к закислению подзолистые почвы таежной зоны.

Для борьбы с кислотными дождями обычно используются те же технические средства, что и для ограничения выбросов оксидов серы и азота в атмосферу.

Заметна деградация земель на территории базирования частей армии, авиации и флота, занимающих в нашей стране 13 млн га. Из территорий военных округов наиболее тревожно положение в Уральском (гарнизон Шадринск), Забайкальском (Степь, Безречный, Домна) и Дальневосточном (Анастасиевка). Необходима рекультивация почв в местах бывшей дислокации 29 шахтных пусковых установок, взорванных в соответствии с договором СНВ-1. Загрязнено побережье Северного Ледовитого океана — здесь разбросаны сотни тысяч пустых бочек из-под горючего, металлолом.

Наиболее часто в Вооруженных силах загрязнение земель нефтепродуктами. Очистке от них подлежит почти 55 тыс. га. Значительная часть нефтепродуктов просачивается в грунт из-за ветхости хранилищ и трубопроводов, при заправке авиационной техники. Под взлетными полосами некоторых аэродромов скопились «техногенные месторождения» основного авиационного топлива — керосина. Так, в подземной керосиновой линзе у г. Энгельса Саратовской области, расположенного на Волге, скопилось не менее 20 тыс. т топлива. В г. Ейске Краснодарского края на берегу Таганрогского залива аналогичная линза тянется к Азовскому морю.

Все более важной становится проблема хранения и утилизации ракетного топлива. Основным его компонентом служит гептил, вещество 1-го класса опасности, способное к накоплению и образованию аэрозолей. Площадь гептилового загрязнения только в Алтайском крае составляет более 50 тыс. км². Проблема усугубляется тем, что материальная база для транспортирования, хранения и отпуска компонентов ракетного топлива, созданная в основном в 1940-1960 гг., морально и физически устарела и уже не может обеспечить все ужесточающиеся требования экологической безопасности (Муравлев; Куденко; Сидоров...).

Для решения экологических проблем, связанных с деятельностью Вооруженных сил, в их составе созданы природоохранные войска.

Борьба с эрозией почв, вызванной антропогенным воздействием, — одна из основных задач природопользования. Осуществляется она с помощью ряда мер, среди которых главными являются почвозащитные мероприятия на землях сельскохозяйственного пользования и рекультивация.

5.3.2.2. Почвозащитные мероприятия на сельскохозяйственных землях

Система почвозащитных мероприятий базируется на совокупности агротехнических, агрохимических, агрофизических и специальных действий на основе проектов внутрихозяйственного землеустройства с противоэрозионной организацией территории.

Агротехнические приемы являются ведущими в комплексе почвозащитных мероприятий. К ним относятся создание почвозащитных севооборотов, поясное размещение культур, буферных полос, гребневых террас, промежуточных и совмещенных посевов, кулис, мульчирование, противоэрозионная обработка почв и т.д.

Группа агрохимических, агрофизических и специальных приемов играет существенную роль в предпосевной и послепосевной обработке почвы, при посеве на склонах.

Агрохимические приемы в первую очередь предусматривают, особенно на склоновых и эродированных землях, увеличение норм внесения всех видов органических, некоторых минеральных (азотных, фосфорных, калийных), а также бактериальных удобрений, мелиорирующих добавок и микроудобрений. Установлено, что эффективность использования всех этих веществ на смытых почвах выше, чем на несмытых.

Действенный агрохимический прием увеличения плодородия эродированных почв и защиты их от эрозии, особенно на смытых почвах, — возделывание на них культур на зеленое удобрение. В разных зонах России для этого используют однолетний и многолетний люпин, люцерну, клевер, кормовые бобы, горчицу белую, вику и др. Эффект достигается при запашке зеленой массы, когда повышается водопроницаемость и влагоемкость почв, усиливаются микробиологические процессы, улучшаются агрофизические свойства земель.

Агрофизические приемы ориентированы прежде всего на обработку почвы полимерами — структурообразователями типа полиакриламида и полимерных пен. Содержание водопрочных агрегатов увеличивается

таким образом в 5-6 раз. В состав пен могут включаться простые и сложные удобрения. Используют также химические препараты, создающие на поверхности почвы пленки, защищающие ее от сдувания. В этом качестве применяют битумные эмульсии, синтетические латексы, отходы нефтяной, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности.

Специальные приемы практикуют для задержания снега и регулирования снеготаяния. К ним в первую очередь относятся валкование и полосные прикатывание и зачернение снега; задержание его с помощью кулис, щитов и др. Задачи задержания и регулирования поверхностного стока талых и ливневых вод, снижения эрозии почв решают также мелиоративные мероприятия. Они предусматривают оптимизацию влажности земель путем их осушения и увлажнения (*гидромелиорация*), создание защитных лесных насаждений (*гидролесомелиорация*) и пр.

Определенную специфику имеют также мероприятия, препятствующие деградации степных пастбищ и способствующие их восстановлению. К ним относятся: ограничение и запрещение ранневесеннего выпаса скота за счет создания дополнительных запасов кормов; при предельных нагрузках исключение одновременного использования пастбищ различными видами скота; запрещение длительного выпаса на одном и том же месте; ускоренное восстановление травостоя за счет подсева трав, рыхления почв в сочетании с полным прекращением выпаса (на срок 1-2 года).

5.3.2.3. Рекультивация земель

Как уже отмечалось, широкомасштабное развитие добычи полезных ископаемых, ряда других областей народного хозяйства приводит к изъятию из сельскохозяйственного пользования и значительному уменьшению площадей плодородных земель. В связи с этим возникает проблема *рекультивации*, т.е. восстановления продуктивности нарушенных территорий. В общем случае она включает комплекс горных, мелиоративных, гидротехнических и сельскохозяйственных работ.

Первые попытки восстановления продуктивности и озеленения земель, нарушенных и загрязненных в процессе промышленного производства, были предприняты в конце 19 в. Однако широкие масштабы рекультивация приобрела в связи с внедрением открытого способа добычи полезных ископаемых. Во многих странах она рассматривается как комплексная междисциплинарная проблема реконструкции ландшафта и восстановления продуктивности нарушенных земель, их экологической сбалансированности, хозяйственной и эстетической ценно-

сти. Рекультивация стала одной из важнейших задач в проблеме сохранения природных ресурсов.

В экономически развитых странах доля рекультивируемых земель достигает 70-80% от нарушенных. В них она получила наибольшее распространение при добыче угля, строительных материалов, горнохимического сырья, цветных металлов, обогащении и переработке полезных ископаемых, прокладке нефте- и газопроводов, транспортных артерий. В нашей стране основные положения процесса восстановления продуктивности нарушенных территорий сформулированы в ГОСТе 17.5.3.04-83 «Охрана природы Земли. Общие требования к рекультивации земель».

Различают два этапа рекультивации: технический и биологический. *Техническая рекультивация* предполагает подготовку земель для последующего целевого использования и включает планировку, формирование откосов, снятие, транспортирование и нанесение почвенного слоя. *Биологическая рекультивация* предусматривает восстановление плодородия технически рекультивированных земель и состоит из комплекса агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на возобновление биоты. Общие требования к обоим типам: тщательное разравнивание поверхности нарушенных земель; нанесение плодородных и потенциально плодородных пород (гумусированных почвенных слоев, лессов и лессовидных суглинков) мощностью до 1,0 м; регулирование водного режима и баланса питательных веществ с применением глубокой обработки поверхностного слоя, внесением минеральных и органических удобрений; правильный подбор культур и мелиоративных севооборотов в сочетании с различными агротехническими приемами.

Работа по технической рекультивации требует наибольших затрат. Ее эффективность значительно увеличивается при включении в качестве обязательного этапа в технологический процесс предприятия. Обычно полагают, что на этой стадии предприятия должны снять с отведенных под обработку участков плодородный слой для дальнейшего его использования в восстановительных мероприятиях. Выемка плодородного слоя должна опережать вскрышные работы не менее чем на 1 год. Его высота определяется содержанием гумуса, которое рекомендуется не ниже чем 1-2%. Гумусированный слой хранят сроком до 20 лет в буртах или штабелях высотой 10-15 м. Для предохранения от эрозии штабели подвергают планировке и засевают травой.

Биологическая рекультивация проводится по двум вариантам: с *нанесением гумусированного поверхностного слоя* на тщательно спланированную поверхность земель; *без нанесения почвенного слоя*. В последнем случае предусматривается создание сельскохозяйственных угодий непосредственно на вскрышных породах, относимых к группе потенциально плодородных.

Наиболее распространен первый вариант, используемый для восстановления земель под пашню. В этом случае на спланированную поверхность нарушенной территории наносят гумусированный почвенный слой мощностью 30-50 см. Лучшими подстилающими породами являются лессы и лессовидные суглинки. В первые годы освоения обычно выращивают многолетние бобовые травы (люцерну, донник, люпин, красный клевер и т.д.). Они дают высокий урожай и способствуют относительно быстрому восстановлению плодородия почвы. После трав выращивают зерновые и кормовые культуры, наиболее продуктивные в данной местности. Достижимые при этом урожаи близки к собираемым на старопахотных землях или превышают их, особенно при мощных насыпных слоях (до 80-90 см).

Одной из важных задач биологической рекультивации является восстановление структуры, физических, агрохимических, физико-химических и других свойств нанесенной почвы, ее гомогенности. Последнюю создают, применяя орудия роторного типа (плуги, фрезы, комбинированные), глубокую обработку земли с последующим дискованием и культивацией. В некоторых странах после дискования и культивации мульчируют поверхностный слой соломой, корой, золой, хворостом. Также благоприятно влияет на восстановление свойств почвы орошение.

В последние годы разработаны составы наносимых потенциально плодородных и плодородных пород, в том числе с использованием отходов производства. В частности, предложена смесь для рекультивации шламохранилищ, включающая компоненты в следующем массовом соотношении, частей: шлам-осадок очистки бытовых и промышленных стоков — 15-20; мелкозернистый наполнитель и алюмосиликатная порода — по 10-30 (Кнатко...).

Существенное значение имеют разработка и внедрение технологий ускоренного образования природного слоя на рекультивируемых землях, базирующиеся на использовании микроорганизмов. Одна из них внедрена на гидроотвале «Балка Чуфичева» площадью 420 га Лебединского ГОКа. Здесь из поверхностного слоя были отобраны пробы пород, из которых выделили несколько видов микроорганизмов, необходимых для почвообразования и жизни растений и одновременно способных существовать в неблагоприятных условиях. Эти микроорганизмы размножили, затем комплексный бактериальный препарат внесли в поверхностный слой рекультивированных территорий.

Аналогичные механизмы внедрены на Невьянском золотодобывающем прииске (1993 г.) и на Первоуральском железорудном карьере (1994 г.). В Невьянске таким образом был рекультивирован участок на дамбе гидроотвала, сложенный из глины и суглинков. Выяснилось,

что уже на второй год количество сапрофитовой флоры возросло в 200 раз, азотобактерий и фосфатрастворяющих бактерий — соответственно в 18 и 2600 раз. Увеличилось также количество видов бактерий, рН почвы возрос с 5,2 до 6,6. Из закисленной она превратилась в нейтральную, гораздо более благоприятную для развития жизни. Высаженные на ней растения дали дружные всходы, намечился обильный выход видов за пределы опытных делянок. Высота травостоя на них достигла 70-90 см, а на контрольных участках — 50-60 см. Наилучшие показатели получены с овсяницей луговой, клевером ползучим и травосмесью.

Мощный фактор повышения плодородия восстанавливаемых земель с нанесением почвенного слоя — использование удобрений, особенно в первые годы освоения. Их дозы, а также нормы высева семян увеличиваются при этом на 30-50% против обычных.

В остальном возделывание сельскохозяйственных культур на восстанавливаемых территориях существенно не отличается от принятого на старопахотных участках, однако большое внимание уделяется обработке почвы в начальный период освоения (на техническом этапе рекультивации она сильно уплотняется).

Объекты рекультивации с нанесением почвенного слоя достаточно многочисленны и в качестве основных включают в себя торфяники, внутренние отвалы, отсыпаемые в отработанное пространство карьеров при открытой добыче полезных ископаемых, а также шламохранилища обогатительных фабрик, золоотвалы электростанций и т.п.

Торфяники являются первоочередными объектами рекультивации, составляя около половины всех восстанавливаемых земель. Обычно используют отработанные участки фрезерной добычи торфа. Их рекультивируют под пахотные и сенокосно-пастбищные угодья, коллективные сады. При проведении необходимых агротехнических и мелиоративных мероприятий, внесении извести для раскисления почвы и удобрений за несколько лет на рекультивированных территориях бывших торфяников добиваются хороших урожаев различных культур (зерновых, овощей, картофеля, многолетних трав и т.п.).

Другие категории нарушенных земель по химическому составу и физическим свойствам менее пригодны для вовлечения в хозяйственную деятельность. Это становится возможным лишь при проведении всего комплекса восстановительных мероприятий. В частности, для улучшения агрономических свойств применяют посев и заправку сидеральных культур с одновременным внесением торфа, минеральных и органических удобрений, выращивание многолетних бобовых трав.

Один из наиболее трудных объектов рекультивации — отвалы, сложенные породами с резко выраженными фитотоксическим действи-

ем, в частности сульфид- и углеродсодержащие. При наличии таких пород перед нанесением на них почвенного слоя применяют экранирование поверхности карбонатными материалами. Достаточная толщина экрана равна ~20 см, но общая высота корнеобитаемого пространства должна составлять не менее 80 см. На шахтных отвалах во многих случаях работа начинается с покрытия токсичной породы «замковым» слоем глинистого состава, отсекающим зону корневой системы растений от контакта с фитофобным материалом. Далее поверх замкового слоя создается почвенный горизонт.

Шламохранилища обогатительных фабрик и золоотвалы ТЭС являются одним из наиболее опасных источников загрязнения окружающей среды. Однако для них также разработаны приемы биологической рекультивации.

Шламохранилища обогатительных фабрик (площадь 60 тыс. га) подразделяют на фитотоксичные и нетоксичные. Их вовлекают в оборот в основном как сенокосные угодья. Фитотоксичные шламы рекомендуются закрывать экраном из песка или гравия, других нейтральных пород (высота 0,4 м) и наносить на него потенциально плодородные материалы мощностью 0,5-0,8 м. На нетоксичных шламохранилищах обычно ограничиваются покрытием из потенциально плодородной породы.

На рекультивированных золоотвалах выращивают полевые и кормовые культуры, создают сенокосы. В первом случае восстанавливаемую поверхность покрывают потенциально плодородной породой слоем 0,4-0,5 м с последующим нанесением 0,2 м плодородной почвы торфа или ила очистных сооружений. При организации сенокосов поверхность золоотвала покрывают слоем в 20 см потенциально плодородной почвы с внесением полных минеральных удобрений или ограничиваются только последними. Наиболее пригодны для сенокосов различные виды донников, люцерн, овсяниц и др. Если цель рекультивации заключается только в стабилизации золоотвалов, то в этом случае практикуют выращивание на них деревьев и кустарников, внося в посадочные ямы плодородную почву или минеральные и органические удобрения. Для посадок рекомендуются береза, клен, осина, ива. На предназначенных для консервации золоотвалах их поверхность закрывают слоем почвы, торфа или потенциально плодородной породы высотой 2-3 см.

Значительные площади нарушаются при прокладке линейных сооружений, в основном трубопроводов различного назначения. По окончании их строительства обязательное восстановление земель включает укладку на реконструированную поверхность ранее снятого по фронту работ плодородного почвенного слоя.

Снятие плодородного слоя предусматривается также при строительстве нефтяных и газовых скважин. Кроме того, с целью исключить загрязнение почвы нефтью создают замкнутые системы очистки буровых сточных вод. После окончания буровых работ снятый слой используют в процессе рекультивации. Самостоятельная проблема — создание эффективных методов восстановления почв, загрязненных нефтепродуктами (разд. 5.3.2.4).

Существенным источником выбросов в окружающую среду служат терриконы угольных шахт. В данном случае технология подготовки и рекультивации включает тушение и переформирование терриконов с последующим их озеленением. Для этого пригоден ряд деревьев и кустарников: клен, абрикос, акация, смородина, шиповник и т.д. Наиболее крутые склоны засевают дикорастущими травами, например синяком обыкновенным, донником желтым.

Рекультивация терриконов — пример восстановления земель без нанесения почвенного слоя. И хотя этот вариант получил меньшее распространение, он может быть успешным и в ряде других случаев.

Одним из них является создание сельскохозяйственных угодий, включая пашни, на спланированных территориях. Для этого наиболее пригодны лессы и лессовидные породы. В первые годы на них возделывают многолетние бобовые травы, а затем с применением азотно-, фосфорно-, калиевого удобрения выращивают зерновые культуры, картофель, овощи, фрукты, виноград. Получаемые урожаи находятся на уровне зональных и более высоких. Такая технология применена на месторождениях марганца в Днепропетровской области, угля — в Кировградской, огнеупорных глин — в Донецкой (все — Украина), фосфоритов — в Подмосковье.

Отвалы, сложенные потенциально плодородными породами, часто без нанесения гумусированного почвенного слоя отводят под сенокосы и пастбища. Урожай бобовых и злаковых травяных смесей в этом случае обычно выше, чем среднестепные. Такая технология перспективна, в частности, для дражных отвалов россыпных месторождений в долинах рек Сибири и Урала.

Таким образом, основные направления использования восстановленных земель — сельскохозяйственное и лесохозяйственное. Преимущественное развитие того или иного из них зависит от типа нарушенных земель, природных условий, экономической целесообразности и ожидаемого социального эффекта. Однако при прочих равных условиях приоритет имеет сельскохозяйственное применение, в первую очередь создание пашни, поскольку в данном качестве полнее реализуется ценность земли как средства производства. Это направление получило широкое распространение в нашей стране и в других европейских странах. Так, в

СССР к 1989 г. было восстановлено 1712 тыс. га. Из них под пашню отведено 464 тыс. га, под другие сельскохозяйственные угодья — 555 тыс. га, остальное составили лесонасаждения, водоемы и т.п.

Лесохозяйственная рекультивация приоритетна на отвалах с почвенно-грунтовыми условиями, неблагоприятными для выращивания сельскохозяйственных культур, или требующих существенных затрат на почвозащитные, водоохранные и природоохранные мероприятия. В различных зонах и на других типах месторождений в настоящее время установлена приемлемость вскрышных и вмещающих отвальных пород для выращивания древесно-кустарниковых насаждений определенного ассортимента. Выявлены также оптимальные параметры посадочного материала, схемы посадки, приемы выращивания лесонасаждений на отвалах различного типа.

Так, в Кузбассе большинство земель, нарушенных при открытой и подземной добыче угля, признано пригодными для лесохозяйственной рекультивации. На ее долю приходится 80% всех восстановленных площадей. Приживаемость и рост лесопосадок аналогичны показателям для ненарушенных земель. В посадках из деревьев обычно используют лиственницу, сосну, березу, из кустарников — облепиху, акацию желтую, иву, жимолость.

В степных районах создают лесопарки вокруг промышленных центров и защитные насаждения на сельскохозяйственных угодьях, в лесостепи — промышленные посадки для получения деловой древесины. Широко внедряется посев в междурядьях бобовых культур, главным образом люпина, чередование основных пород деревьев (сосна, береза, вяз) с азотфиксирующими видами (ольха, акация, облепиха). В целом доказана возможность выращивания на отвалах более 40 видов древесных и кустарниковых растений. При их формировании практикуется создание лесопригодного слоя мощностью не менее 1 м. На спланированных относительно горизонтальных участках применяются механизированные посадки и уход, на крутых склонах — ручные работы.

Наряду с сельскохозяйственным и лесохозяйственным в ряде случаев эффективны другие виды использования восстановленных земель:

водохозяйственное — сооружение различных водоемов для хозяйственных, питьевых, коммунально-бытовых нужд;

рыбохозяйственное — создание на базе карьеров водоемов для разведения рыб;

рекреационное и охотничье — устройство баз отдыха и спорта, парков, зеленых и туристических зон, архитектурно-ландшафтных комплексов и т.д.;

природоохранное и санитарно-гигиеническое — противоэрозионные лесонасаждения, сооружение водоемов для животных подводного мира и пернатых;

строительное — во всех его видах.

Примером последнего является рекультивация иловых площадок станций аэрации по очистке сточных вод в г. Москве и Московской области (Храменков....; Рекультивация...). В частности, на территории бывших Люблинских полей фильтрации внедрен природоохранный комплекс в Марьином парке г. Москвы. При этом рекультивировано 800 га, расположенных в черте города, переработано 15 млн м³ осадков сточных вод. На освобожденной территории возведен благоустроенный жилой комплекс на 300 тыс. человек (площадь более 6 млн м²), в том числе 35 школ, 13 поликлиник, 9 спортивных сооружений.

Резюмируя, можно констатировать, что в большинстве случаев возможно эффективное восстановление нарушенных земель и быстрое их возвращение в народнохозяйственное, в частности сельскохозяйственное, пользование — при условии научно обоснованного подбора и чередования культур, рациональной агротехники и создания высококультурного почвенного слоя.

Отдельной, до конца не решенной проблемой является очистка загрязненных техногенными выбросами почв. Работы в этом направлении, рассматриваемые ниже, начаты относительно недавно.

5.3.2.4. Очистка загрязненных почв

Проблема относится к числу наиболее актуальных в связи с общим ухудшением среды обитания человека и непосредственно — селитебных территорий. В зависимости от масштаба и характера загрязнения возможны два основных направления санации почв: удаление верхнего слоя грунта на свалку или для переработки на специальных установках; разрушение вредных веществ различными способами непосредственно на месте. Отметим, что известные методы иммобилизации загрязнений в почве, например цементирование отдельных участков, их обвалование и др., часто рассматриваемые как способы очистки территорий, ими не являются, так как не обеспечивают удаления вредных веществ.

Способы очистки почв от загрязнений можно разделить на физические, химические, физико-химические и биохимические.

Физические методы предусматривают удаление верхнего слоя грунта с загрязненных территорий на свалку или в специально отведенные места. К ним же следует отнести все варианты промывки почвы с растворением загрязнителей в промывающей жидкости (воде).

Химические методы включают термические способы, процессы выщелачивания, связывания загрязнителей в различные соединения, электрохимические и т.д.

Термические способы используют для удаления органических веществ и некоторых цветных металлов, химической стабилизации грунтов. Их реализуют в различных вариантах: нагрев на воздухе, в вакууме, пиролиз и др.

Нагревание на воздухе применяют для земель, загрязненных нефтью, маслами, бензином, галогеносодержащими и другими органическими соединениями. Термообработка обычно заключается в выдержке материала при 400-800°C с выгоранием углеводов. Физико-химические свойства почвы при этом изменяются незначительно. Биологическую активность термически обработанных почв восстанавливают, добавляя при необходимости компост и другие минеральные вещества.

Так, для очистки нефтезагрязненных грунтов ООО «Лукойл-Пермнефть» на Осинском нефтешламовом амбаре применил метод *термической десорбции* при 200°C с использованием отечественного оборудования. Был получен гидрофобный гранулированный материал (размер частиц 10-20 мм) с содержанием нелетучих и нерастворимых в воде веществ не более 5-6%. Он пригоден для приготовления битумогрунтов, соответствующих ГОСТу 30491-97 и используемых в дорожном строительстве (Сергеев...).

Термообработку на воздухе применяют также к загрязненным грунтам, предназначенным к использованию при производстве смешанных цементах и растворов (Cement...). В этом случае к загрязненному грунту добавляют 25-35% извести, оксидов железа и алюминия, плавней. Смесь расплавляют при 1300-1350°C, через расплав продувают воздух для полного разложения органики. При выпуске из печи расплав подвергается водной грануляции с образованием волокон размером 5-40 мкм. Их смешивают с портландцементом в количестве 10-70% от его массы. Полученное вяжущее по прочности на сжатие близко к цементам общестроительного назначения. Предложенная технология утилизации загрязненного грунта в 1,2-8 раз дешевле, чем захоронение отходов.

Нагревание на воздухе положено в основу процесса MRS удаления ртути из почв и отходов, разработанного фирмой Mercury Recovery Services (США). В этом процессе загрязненный материал дробят, смешивают с оксидами или пероксидами щелочных металлов и подвергают двухстадийному нагреву: вначале при ~100°C для удаления воды и летучих веществ, затем при 540-560°C для испарения ртути с последующей ее конденсацией в виде чистого металла. Выбрасываемые

газы подвергают очистке. Метод позволяет снизить содержание ртути в материале с 15000 до менее чем 1 млн^{-1} (Two-stage...).

В настоящее время стационарные и передвижные установки для термообработки почв на воздухе очищают миллионы тонн загрязненных земель. В частности, общая годовая производительность установок только фирмы Nord (Германия) составляет 300 тыс. т при их единичной мощности 50-80 тыс. т. Емкость хранилищ равна суммарной годовой производительности установок (Massive...).

Вакуумно-термический метод санации почвы реализован в США в варианте передвижной установки. Загрязненный органическими соединениями грунт загружают в вакуумный барабан типа бетоносмесителя, установленный на шасси автомобиля. Длина барабана 4,5 м, диаметр 2,4 м, частота вращения $10-18 \text{ мин}^{-1}$. При нагревании летучие органические соединения испаряются и далее ожижаются в конденсаторе, размещенном на прицепе автомобиля. Конденсат после очистки на фильтре пригоден к использованию по целевому назначению. Продолжительность цикла обработки одной загрузки грунта составляет 45 мин (Crosby).

Пиролиз как технологию очистки почв от ртути и других металлов в 90-е годы разработали в Германии. С 1992 г. здесь эксплуатируется установка по очистке 40 тыс. т/год почвы. Исходный грунт дезинтегрируют до крупности 20 мм, затем подвергают его магнитной обработке для удаления черных металлов и сушат до влажности 5%. Собственно пиролиз, т.е. термообработку без доступа воздуха, проводят при 600°C в барабанной печи. Здесь в газовую фазу возгоняются летучие соединения ртути, мышьяка и других металлов. Газы далее нагревают в окислительной среде при 1200°C , затем их обеспыливают, адсорбируя соединения-загрязнители. Грунт после охлаждения увлажняют и используют как рекультивируемый материал (Riese; Courtois).

Термические способы реализуются не только на специальных установках, к которым доставляют подлежащую очистке почву, но и могут осуществляться непосредственно на месте. Один из таких методов предусматривает *остекловывание почвы*. В последнюю вводят электроды и, пропуская ток, нагревают ее до высоких температур (2160°C). Грунт при этом расплавляется, органика пиролизруется, образующиеся газы поступают на очистку. Последующее охлаждение почвы приводит к ее остекловыванию и связыванию в устойчивые от вымывания формы таких загрязнителей, как, например, радионуклиды и тяжелые металлы (In situ...).

Выщелачивание как химический метод очистки почв заключается в обработке грунта 2%-м раствором соляной кислоты при pH, равном 2, в течение 10 мин. Содержание таких загрязнителей, как мышьяк, кадмий, медь, никель, цинк и свинец снижается при этом на 86-98% (Acid...).

Перспективный способ химической очистки почв разработан российской фирмой Special Biological Technology Corp (SBTC). Для очистки в нем используется органо-неорганическое комплексное соединение стабилит (stabilite) — суспензия из ~93% гуминовых кислот и неорганической смеси, содержащей оксиды алюминия, железа, кремния. Исходным сырьем для производства стабилита является лигнит — разновидность молотого бурого угля, содержащая 65-71% углерода и имеющая хорошо сохранившуюся структуру. При обработке почвы и воды стабилит служит комплексообразователем для ионов тяжелых металлов, в том числе радионуклидов. Положительные результаты его применения получены в полевых испытаниях в районе Серпухова на территории химического комбината, загрязненного полихлорированными дифенилами. После вспашки и обработки реагентом опытных участков почвы содержание загрязнителей в них за два года уменьшилась в 20 раз. Для производства и сбыта стабилита в США организовано совместное предприятие с участием SBTC и четырех американских фирм (North...).

Фирма Kobe Steel (Япония) разработала *гидротермический (автоклавный)* процесс обработки загрязненной почвы с иммобилизацией тяжелых металлов (шестивалентный хром, свинец, ртуть, кадмий, мышьяк). Технология заключается в смешении отходов с известью или цементом, гранулировании смеси, упрочнении гранул в автоклаве при 180-200°C и давлении пара 10-15 бар. Затем гранулы измельчают до крупности песка или формируют из них строительные блоки (Metals...).

Сущность *электрохимического метода* заключается в подаче в грунт на первой стадии очистки жидких реагентов, переводящих загрязнители в подвижную ионную форму. Затем в грунт помещают электроды и пропускают через них постоянный электрический ток. Под его воздействием загрязнители, в зависимости от знака зарядов их ионов, разряжаются на аноде или катоде. Метод с начала 80-х годов 20 в. применялся в практике электроразведки нашей страны.

В странах ЕС как технология очистки загрязненных почв метод стал использоваться позднее (запатентован в Германии в 1992 г.), получив известность в качестве способа «Elektroremediation». Начато его практическое освоение. В частности, французская фирма EdF в конце прошлого века провела пробную очистку почв, загрязненных ПАУ, при их концентрациях 0,6 и 0,2%. Через 80 суток они снизились до 0,05 и 0,01% (Дезактивация...).

Другая разновидность электрохимического способа — *биоэлектрическая очистка* грунтов от нефтепродуктов. Оборудование для очистки грунта (объем до 1000 м³) включает источник постоянного тока мощностью 30-40 кВА, водяной насос, компрессор для закачки воздуха в почву, масляный сепаратор, стальные водопроводные и перфорирован-

ные дренажные трубы. Технология применена для очистки территории бывшей автозаправочной станции в г. Хювинка (Финляндия) в 2000-2001 гг. Исходная загрязненность грунта составляла по дизтопливу до 10 г/кг почвы, по бензолу до 9 г/кг. Был сформирован штабель объемом около 600 м³ и высотой 4 м. Менее чем за 2 месяца содержание нефтепродуктов в грунте снизилось примерно в 70 раз (Ивлиев...).

Физико-химические методы включают экстракцию, фотоллиз и флотацию.

В методах *экстракции* в качестве экстрагента чаще всего применяют пропан и водяной пар.

При использовании пропана для санирования почвы, загрязненной маслами, газ под давлением более 5 МПа поступает в реактор с температурой свыше 100°C, загруженный почвой. В реакторе частицы масла переходят в газовую фазу и вместе с ней поступают в сепаратор с нормальными температурой и давлением, где конденсируются. Очищенная от масел газовая фаза после сепаратора компримируется и вновь поступает в процесс (Method...). По схеме экстракции пропаном освоена также установка в США производительностью 25 т/сут по нефтяным шламам, содержащим 25% твердого (Mc Govern).

Установка с экстракцией органических соединений паром при 100-250°C внедрена в ФРГ для санирования старых отвалов (Hudel...).

Фотоллиз, т.е. разложение веществ под действием света, использован для очистки почв от хлорпроизводных бензола в условиях их полива и добавления осадка переработки сточных вод. Если в естественных условиях извлечение хлорпроизводных на 50% достигается за 13-622 сут, то при фотоллизе необходимый срок сокращается до 11-181 суток (Wang...).

Флотация успешно применена для восстановления качества земли, пострадавшей при пожаре большого оптового склада-хранилища пестицидов в Швейцарии. После пожара участок оказался загрязненным различными химическими соединениями, в том числе органотутными. Селективной экскавацией было снято 14200 т загрязненной почвы, которую отправили на специально построенный завод по ее обогащению. Технология очистки грунта включала его грохочение и измельчение с последующей флотацией, при которой было извлечено 95% загрязнителей. Очищенную почву возвратили на прежнее место. Загрязненную фракцию обработали известью, затем загрузили в контейнеры и разместили в подземных захоронениях ФРГ (Bunge...).

Биохимические методы очистки почв становятся все более популярными в Европе и США. В Германии свыше 50 компаний, а в США еще большее их число предлагают такие услуги (Рис...). Эти методы в

настоящее время включают применение бактерий, часто в сочетании с вентиляцией почвы воздухом или кислородом (биовентилирование), фиторемедиацию, грибковые технологии, использование ила и др.

Биовентилирование успешно используют за рубежом для удаления из почв нефти и нефтепродуктов (Bulman...; Удаление...). Так, в Австралии выполнены работы по очистке грунта на участке площадью около 1,5 тыс. м², загрязненном дизельным топливом на глубину 1,5-3,5 м (в почву попало до 50 тыс. л топлива, содержание его в земле достигало 1,5%). Для ускорения естественного процесса биоразложения загрязнителя была организована кислородная биовентиляция почвы. За 6 месяцев общее содержание мазута на глубине до 3 м уменьшилось на 10-30%. Дальнейшая биовентиляция с дополнительным введением в грунт необходимых для микроорганизмов питательных веществ привела к уменьшению содержания топлива по всей глубине загрязнения еще на 30%.

Канадская фирма «Petro-Canada» восстановила более 140 тыс. т почвы, загрязненной нефтепродуктами бывшего нефтеочистительного завода. В течение 125 сут. ее аэрировали, вводили в нее микроорганизмы, использовали ПАВ и питательные вещества. Степень удаления нефтеостатков составила 99%, конечная концентрация углеводов в почве соответствовала нормальным требованиям, в биологическом отношении земля была восстановлена (Lapoe).

Процесс биовентилирования можно интенсифицировать, подавая в почву пульпу, при контакте с землей выделяющую кислород. Способ, предложенный американской фирмой Regensis Bioremediation Product, реализуют, подавая под давлением 25-70 атм пульпу, содержащую 3-10% кислородовыделяющего вещества, в почвы любого типа. Время биорекультивации сокращается на ~50% (A slurry...).

Фиторемедиация, или очистка почв с помощью растений, запатентована в США (Phytoremediation...). Выявлено, что растения семейства Brassicaceae способны адсорбировать металлы в корневой системе и затем переводить их в стебельную часть, извлекая таким образом загрязнители из почвы. Наземная часть растений убирается обычными способами.

Грибковые технологии предусматривают заселение загрязненных почв различными грибковыми культурами. Разработанные способы пригодны для разрушения трудноразлагаемых токсичных веществ, в том числе ПАУ типа полихлорированных дифенилов. Очистка продолжается даже в условиях суровой зимы, концентрация загрязнений снижается с нескольких сотен млн⁻¹ до ~10 млн⁻¹ (Fungal...).

Микробиологические методы позволили очистить и привести в состояние, пригодное для дальнейшего использования, загрязненные неф-

тью подфакельные площадки, аварийно-технические амбары и другие объекты на некоторых нефтепромыслах России. Очистку и восстановление почв проводили после предварительной откачки нефтесодержащих жидкостей из грунта и его пропарки. Пропаривание позволило снизить содержание нефти до значений, при которых возможно проведение микробиологических работ без предварительного разбавления нефтезагрязненного грунта чистым, т.е. до 8-12% (Сергеев...).

В ряде случаев при санировании земель используют комбинации рассмотренных выше способов. В частности, процесс, разработанный в США, предусматривает восстановление почвы, загрязненной ПХБ, с помощью комбинации физического и биохимического методов (Lajoie...). Способ реализуется на месте и осуществляется в несколько стадий. Вначале в почву вносят ПАВ, растворяющее ПХБ (физический метод). Промывочная жидкость, содержащая ПАВ и ПХБ, подается в биореактор с инертным субстратом. Концентрация ПАВ при этом доводится до близкой к мицеллярной. Далее в биореактор вносятся микробный штамм. Используя поверхностно-активное вещество как источник энергии, штамм одновременно разлагает ПХБ до хлорбензойной кислоты и более простых соединений. При израсходовании питательной среды микроорганизмы отмирают, а остатки ПХБ аккумулируются на инертном субстрате. Затем, заменив отработанный субстрат свежим, цикл биообработки повторяют.

Комплексная технология восстановления плодородия почв, загрязненных высокоминерализованными пластовыми водами, освоена в нашей стране. Она апробирована на площади более 500 га и успешно прошла экологическую экспертизу.

Рассматриваемая технология включает различные методы мелиорации: *физические*: дизельное рыхление (тяжелым культиватором на глубину), сдвигка загрязненного слоя (до 30 см), перемешивание его с «составом» (смесь адсорбентов, органики и химмелиорантов), пропашка открывшегося дна и др.; *химические* (связывание солей и пр.); *гидротехнические* (нарезка кротовин, улучшающих водопроницаемость почвы; планировочные работы и т.д.); *биологические* (активация биоты почвы, увеличение ее общей биогенности, посев фитомелиоративных культур и т.п.). Глубина загрязненного слоя может составлять 180-200 см и более.

В начале обработки почвы содержание в ней ионов хлора в 107 раз, а натрия в 100 раз превышало показатели фоновых участков. Через 4 года концентрация хлора снизилась на 70%, натрия — на 30. Через 9 лет (2004 г.) содержание хлора упало в 36, натрия в 20, сульфатов в 3 раза. При этом рекультивируемые почвы еще оставались загрязненными по этим компонентам. Однако общая биогенность

рекультивируемых почв уже в 4 раза превышала фоновую, что указывало на отсутствие в ней угнетающих факторов.

На восстановленных землях были высажены донник, мальва, амарант, кукуруза. Их продуктивность не уступала фоновым, качество полученной зеленой массы соответствовало требованиям ГОСТ 27978-88. Это позволило использовать ее как зеленый корм, а также для приготовления других видов кормов (Бурлака...).

Помимо биохимической обработки почв на месте, в ряде стран (Германия, Нидерланды, Дания и др.) расширяется предложение услуг по очистке почв с вывозом и переработкой их на специальных заводах (Рис...).

Стоимость очистки почв различными методами составляет, ф. ст./т: удаление грунта на действующую свалку или в специально отведенное место — соответственно 25-100 и 15-20;

сжигание грунта за пределами участка — 25-100 (сжигание на участке на 30% дешевле);

экстракция нефтепродуктов паром — 20-50, растворителем — 35-100;

биотехнологии — 5-40, в том числе использование современных биореакторов — 50-75;

химическая обработка грунта (стабилизация и отверждение на месте) — 10-30 (Антонова...).