

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ.  
СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ И НОРМИРОВАНИЯ  
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ**

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:  
Х.А. Джувеликян,  
Д.И. Щеглов,  
Н.С. Горбунова

Издательско-полиграфический центр  
Воронежского государственного университета  
2009

Утверждено научно-методическим советом биолого-почвенного факультета  
4 июля 2009 г., протокол № 10

Рецензент д-р биол. наук, проф. Л.А. Яблонских

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре почвоведения и  
управления земельными ресурсами биолого-почвенного факультета Воро-  
нежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов почвенного отделения биолого-почвенного  
факультета Воронежского государственного университета.

Для специальности 020701 – Почвоведение

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие сведения о загрязнении.....	4
Понятие о техногенных аномалиях.....	5
Загрязнение почв тяжелыми металлами.....	6
Миграция тяжелых металлов в почвенном профиле.....	8
Понятие о почвенном экологическом мониторинге.....	10
Показатели состояния почв, определяемые при их контроле.....	12
Экологическое нормирование качества загрязненных почв.....	14
Общие требования к классификации почв подверженных загрязнению.....	18
Литература.....	21

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАГРЯЗНЕНИИ

*Загрязняющие вещества* – это вещества антропогенного происхождения, поступающие в окружающую среду в количествах, превышающих природный уровень их поступления. *Загрязнение почв* – вид антропогенной деградации, при которой содержание химических веществ в почвах, подверженных антропогенному воздействию, превышает природный региональный фоновый уровень. Превышение содержания определенных химических веществ в окружающей человека среде (по сравнению с природными уровнями) за счет их поступления из антропогенных источников представляет экологическую опасность.

Использование человеком химических веществ в хозяйственной деятельности и вовлечение их в цикл антропогенных превращений в окружающей среде постоянно растет. Характеристикой интенсивности извлечения и использования химических элементов является *технофильность* – отношение ежегодной добычи или производства элемента в тоннах к его кларку в литосфере (А.И. Перельман, 1999). Высокая технофильность характерна для элементов, наиболее активно используемых человеком, особенно для тех, естественный уровень которых в литосфере невысок. Высокие уровни технофильности характерны для таких металлов, как Bi, Hg, Sb, Pb, Cu, Se, Ag, As, Mo, Sn, Cr, Zn, потребность в которых различных видов производств велика. При низком содержании этих элементов в породах ( $10^{-2}$ – $10^{-6}$  %) добыча их значительна. Это ведет к извлечению из недр земли колоссальных количеств руд, содержащих эти элементы, и к последующему глобальному рассеиванию их в окружающей среде.

Помимо технофильности предложены и другие количественные характеристики техногенеза. Так, отношение технофильности элемента к его биофильности (*биофильность* – кларки концентрации химических элементов в живом веществе) М.А. Глазовская назвала *деструктивной активностью элементов техногенеза*. Деструктивная активность элементов техногенеза характеризует степень опасности элементов для живых организмов. Другой количественной характеристикой антропогенного вовлечения химических элементов в их глобальные циклы на планете является *фактор мобилизации* или *фактор техногенного обогащения*, который рассчитывают как отношение техногенного потока химического элемента к его природному потоку. Уровень фактора техногенного обогащения, как и технофильность элементов, является не только показателем мобилизации их из литосферы в наземные природные среды, но и отражением уровня выбросов химических элементов с отходами производств в окружающую среду.

## ПОНЯТИЕ О ТЕХНОГЕННЫХ АНОМАЛИЯХ

*Геохимическая аномалия* – участок земной коры (или поверхности земли), отличающийся существенно повышенными концентрациями каких-либо химических элементов или их соединений по сравнению с фоновыми значениями и закономерно расположенный относительно скоплений полезных ископаемых. Выявление техногенных аномалий является одной из важнейших эколого-геохимических задач при оценке состояния окружающей среды. Аномалии образуются в компонентах ландшафта в результате поступления различных веществ от техногенных источников и представляют собой некоторый объем, в пределах которого значения аномальных концентраций элементов больше фоновых значений. По распространенности А.И. Перельман и Н.С. Касимов (1999) выделяют следующие техногенные аномалии:

1) глобальные – охватывающие весь земной шар (например, повышенное содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере, накопление искусственных радионуклидов после ядерных взрывов);

2) региональные – формирующиеся в отдельных частях континентов, природных зонах и областях в результате применения ядохимикатов, минеральных удобрений, подкисления атмосферных осадков выбросами соединений серы и др.;

3) локальные – образующиеся в атмосфере, почвах, водах, растениях вокруг местных техногенных источников: заводов, рудников и т.д.

По среде образования техногенные аномалии делятся:

1) на литохимические (в почвах, породах);

2) гидрогеохимические (в водах);

3) атмогеохимические (в атмосфере, снеге);

4) биохимические (в организмах).

По длительности действия источника загрязнения они делятся:

– на кратковременные (аварийные выбросы и т.д.);

– средневременные (с прекращением воздействия, например, прекращение разработки месторождений полезных ископаемых);

– долговременные стационарные (аномалии заводов, городов, агроландшафтов, например КМА, Норильский никель).

При оценке техногенных аномалий фоновые территории выбираются вдали от техногенных источников загрязняющих веществ, как правило, более чем в 30–50 км. Одним из критериев аномальности служит коэффициент техногенной концентрации или аномальности  $K_c$ , представляющий собой отношение содержания элемента в рассматриваемом аномальном объекте к его фоновому содержанию в компонентах ландшафта.

Для оценки воздействия количества поллютантов, поступающих в организм, используются также гигиенические нормативы загрязнения – пре-

дельно допустимые концентрации. Это максимальное содержание вредного вещества в природном объекте или продукции (воде, воздухе, почве, пище), которое не влияет на здоровье человека или других организмов.

Загрязняющие вещества по опасности делятся на классы (ГОСТ 17.4.1.0283): I класс (высоко опасные) – As, Cd, Hg, Se, Pb, F, бенз(а)пирен, Zn; II класс (умеренно опасные) – B, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr; III класс (мало опасные) – Ba, V, W, Mn, Sr, ацетофенон.

## **ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

Тяжелые металлы (ТМ) уже сейчас занимают второе место по степени опасности, уступая пестицидам и значительно опережая такие широко известные загрязнители, как двуокись углерода и серы. В перспективе они могут стать более опасными, чем отходы атомных электростанций и твердые отходы. Загрязнение ТМ связано с их широким использованием в промышленном производстве. В связи с несовершенными системами очистки ТМ попадают в окружающую среду, в том числе и в почву, загрязняя и отравляя ее. ТМ относятся к особым загрязняющим веществам, наблюдения за которыми обязательны во всех средах.

Почва является основной средой, в которую попадают ТМ, в том числе из атмосферы и водной среды. Она же служит источником вторичного загрязнения приземного воздуха и вод, попадающих из нее в Мировой океан. Из почвы ТМ усваиваются растениями, которые затем попадают в пищу.

Термин «тяжелые металлы», характеризующий широкую группу загрязняющих веществ, получил в последнее время значительное распространение. В различных научных и прикладных работах авторы по-разному трактуют значение этого понятия. В связи с этим количество элементов, относимых к группе тяжелых металлов, изменяется в широких пределах. В качестве критериев принадлежности используются многочисленные характеристики: атомная масса, плотность, токсичность, распространенность в природной среде, степень вовлеченности в природные и техногенные циклы.

В работах, посвященных проблемам загрязнения окружающей природной среды и экологического мониторинга, на сегодняшний день к тяжелым металлам относят более 40 элементов периодической системы Д.И. Менделеева с атомной массой свыше 40 атомных единиц: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Hg, Pb, Bi и др. По классификации Н. Реймерса (1990), тяжелыми следует считать металлы с плотностью более 8 г/см<sup>3</sup>. При этом немаловажную роль в категорировании тяжелых металлов играют следующие условия: их высокая токсичность для живых организмов в относительно низких концентрациях, а также способность к биоаккумуляции и биомагнификации. Практически все металлы, попадающие под это определе-

ние (за исключением свинца, ртути, кадмия и висмута, биологическая роль которых на настоящий момент не ясна), активно участвуют в биологических процессах, входят в состав многих ферментов.

Самыми мощными поставщиками отходов, обогащенных металлами, являются предприятия по выплавке цветных металлов (алюминиевые, глиноземные, медно-цинковые, свинцово-плавильные, никелевые, титаномагниевые, ртутные и др.), а также по переработке цветных металлов (радиотехнические, электротехнические, приборостроительные, гальванические и пр.).

В пыли металлургических производств, заводов по переработке руд концентрация Pb, Zn, Bi, Sn может быть повышена по сравнению с литосферой на несколько порядков (до 10–12), концентрация Cd, V, Sb – в десятки тысяч раз, Cd, Mo, Pb, Sn, Zn, Bi, Ag – в сотни раз. Отходы предприятий цветной металлургии, заводов лакокрасочной промышленности и железобетонных конструкций обогащены ртутью. В пыли машиностроительных заводов повышена концентрация W, Cd, Pb (табл. 1).

Таблица 1

*Основные техногенные источники тяжелых металлов*

Источники тяжелых металлов	Элементы
Цветная металлургия	Pb, Zn, Cu, Hg, Mn, Sb, W, Co, Cd
Черная металлургия	Ni, Mn, Pb, Cu, Zn, W, Co
Энергетика	As, Sb, Se
Нефтяная промышленность	Pb, Cu, Ni, Zn, Mn
Сжигание угля	Sb, As, Cd, Cr, Mo
Сжигание нефти	As, Pb, Cd

Под влиянием обогащенных металлами выбросов формируются ареалы загрязнения ландшафта преимущественно на региональном и локальном уровнях. Влияние предприятий энергетики на загрязнение окружающей среды обусловлено не концентрацией металлов в отходах, а их огромным количеством. Масса отходов, например, в промышленных центрах, превышает их суммарное количество, поступающее от всех других источников загрязнения. С выхлопными газами автомобилей в окружающую среду выбрасывается значительное количество Pb, которое превышает его поступление с отходами металлургических предприятий.

Пахотные почвы загрязняются такими элементами как Hg, As, Pb, Cu, Sn, Bi, которые попадают в почву в составе ядохимикатов, биоцидов, стимуляторов роста растений, структурообразователей. Нетрадиционные удобрения, изготавливаемые из различных отходов, часто содержат большой набор загрязняющих веществ с высокими концентрациями. Из традиционных минеральных удобрений фосфорные удобрения содержат примеси Mn, Zn, Ni, Cr, Pb, Cu, Cd (Гапонюк, 1985).

Распределение в ландшафте металлов, поступивших в атмосферу из техногенных источников, определяется расстоянием от источника загрязнения, климатическими условиями (сила и направление ветров), рельефом местности, технологическими факторами (состояние отходов, способ поступления отходов в окружающую среду, высота труб предприятий).

Рассеивание ТМ зависит от высоты источника выбросов в атмосферу. Согласно расчетам М.Е. Берлянда (1975), при высоких дымовых трубах значительная концентрация выбросов создается в приземном слое атмосферы на расстоянии 10–40 высот трубы. Вокруг таких источников загрязнения выделяются 6 зон (табл. 2). Площадь воздействия отдельных промышленных предприятий на прилегающую территорию может достигать 1000 км<sup>2</sup>.

Таблица 2

*Зоны загрязнения почв вокруг точечных источников загрязнения*

№ п/п	Зона	Расстояние от источника загрязнения в км	Превышение содержания ТМ по отношению к фоновому
1	Охранная зона предприятия	0,5–0,75	100
2	Зона I	0,75–1,5	200–50
3	Зона II	2–8	50–10
4	Зона III	4–15	5–2
5	Зона IV	8–20	5–2
6	Фон	20–50	1

Зоны загрязнения почв и их размер тесно связаны с векторами господствующих ветров. Рельеф, растительность, городские постройки могут изменять направление и скорость движения приземного слоя воздуха. Аналогично зонам загрязнения почв можно выделить и зоны загрязнения растительного покрова.

### **МИГРАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕННОМ ПРОФИЛЕ**

Аккумуляция основной части загрязняющих веществ наблюдается преимущественно в гумусово-аккумулятивном почвенном горизонте, где они связываются алюмосиликатами, несиликатными минералами, органическими веществами за счет различных реакций взаимодействия. Состав и количество удерживаемых в почве элементов зависят от содержания и состава гумуса, кислотно-основных и окислительно-восстановительных условий, сорбционной способности, интенсивности биологического поглощения. Часть тяжелых металлов удерживается этими компонентами прочно и не только не участвует в миграции по почвенному профилю, но и не представляет опасности



для живых организмов. Отрицательные экологические последствия загрязнения почв связаны с подвижными соединениями металлов.

В пределах почвенного профиля техногенный поток веществ встречает ряд почвенно-геохимических барьеров. К ним относятся карбонатные, гипсовые, иллювиальные горизонты (иллювиально-железисто-гумусовые). Часть высокотоксичных элементов может переходить в труднодоступные для растений соединения, другие элементы, мобильные в данной почвенно-геохимической обстановке, могут мигрировать в почвенной толще, представляя потенциальную опасность для биоты. Подвижность элементов в значительной степени зависит от кислотно-основных и окислительно-восстановительных условий в почвах. В нейтральных почвах подвижны соединения Zn, V, As, Se, которые могут выщелачиваться при сезонном промачивании почв.

Накопление подвижных, особо опасных для организмов соединений элементов зависит от водного и воздушного режимов почв: наименьшая аккумуляция их наблюдается в водопроницаемых почвах промывного режима, увеличивается она в почвах с непромывным режимом и максимальна в почвах с выпотным режимом. При испарительной концентрации и щелочной реакции в почве могут накапливаться Se, As, V в легкодоступной форме, а в условиях восстановительной среды – Hg в виде метилированных соединений.

Однако следует иметь в виду, что в условиях промывного режима потенциальная подвижность металлов реализуется, и они могут быть вынесены за пределы почвенного профиля, являясь источниками вторичного загрязнения подземных вод.

В кислых почвах с преобладанием окислительных условий (почвы подзолистого ряда, хорошо дренированные) такие тяжелые металлы, как Cd и Hg, образуют легкоподвижные формы. Напротив, Pb, As, Se образуют малоподвижные соединения, способные накапливаться в гумусовых и иллювиальных горизонтах и негативно влиять на состояние почвенной биоты. Если в составе загрязняющих веществ присутствует S, в восстановительных условиях создается вторичная сероводородная среда и многие металлы образуют нерастворимые или слабо растворимые сульфиды.

В заболоченных почвах Mo, V, As, Se присутствуют в малоподвижных формах. Значительная часть элементов в кислых заболоченных почвах присутствует в относительно подвижных и опасных для живого вещества формах; таковы соединения Pb, Cr, Ni, Co, Cu, Zn, Cd и Hg. В слабокислых и нейтральных почвах с хорошей аэрацией образуются труднорастворимые соединения Pb, особенно при известковании. В нейтральных почвах подвижны соединения Zn, V, As, Se, а Cd и Hg могут задерживаться в гумусовом и иллювиальных горизонтах. По мере возрастания щелочности опасность загрязнения почв перечисленными элементами увеличивается.

## ПОНЯТИЕ О ПОЧВЕННОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

*Почвенный экологический мониторинг* – система регулярного неограниченного в пространстве и времени контроля почв, которая дает информацию об их состоянии с целью оценки прошлого, настоящего и прогноза изменения в будущем. Почвенный мониторинг направлен на выявление антропогенных изменений почв, которые могут в конечном итоге нанести вред здоровью человека. Особая роль почвенного мониторинга обусловлена тем, что все изменения состава и свойств почв отражаются на выполнении почвами их экологических функций, следовательно, на состоянии биосферы.

Огромное значение имеет то, что в почве в отличие от воздуха атмосферы и вод поверхностных водоемов экологические последствия антропогенного воздействия обычно проявляются позже, но они более устойчивы и сохраняются дольше. Существует необходимость оценивать и долговременные последствия этого воздействия, например, возможность мобилизации загрязняющих веществ в почвах, вследствие чего почва из «депо» загрязняющих веществ может превращаться в их вторичный источник.

### Виды почвенного экологического мониторинга

Выделение видов почвенного экологического мониторинга основано на различиях в сочетании информативных почвенных показателей, соответствующих задачам каждого из них. На основе различий механизмов и масштабов проявления деградации почв выделяется две группы видов мониторинга: первая группа – *глобальный мониторинг*, вторая – *локальный и региональный*.

*Глобальный* почвенный мониторинг – составная часть глобального мониторинга биосферы. Проводится он для оценки влияния на состояние почв экологических последствий дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ в связи с опасностью общепланетарного загрязнения биосферы и сопровождающих его процессов глобального уровня. Результаты глобального или биосферного мониторинга характеризуют глобальные изменения состояния живых организмов на планете под влиянием человеческой деятельности.

Назначение *локального и регионального* мониторингов заключается в выявлении влияния деградации почв на экосистемы локального и регионального уровней и непосредственно на условия жизни человека в сфере его природопользования.

*Локальный мониторинг* называют еще санитарно-гигиеническим или импактным. Он направлен на контроль уровня содержания в окружающей среде тех загрязняющих веществ, которые выбрасывает конкретное пред-

приятие. Контролируются в первую очередь природные среды, наиболее чувствительные к данному загрязняющему веществу в реальных условиях.

Важно не только раннее обнаружение экологической опасности, связанной с загрязняющими веществами, но и выявление закономерностей их накопления. Результаты обследования почв учитываются при установлении уровня их загрязнения и составлении прогноза опасности для здоровья и условий проживания людей в населенных пунктах, при разработке мероприятий по рекультивации почв, при профилактике заболеваний людей и т.д.

Для установления уровня и степени загрязнения почв, точки отбора проб располагают с учетом розы ветров (ГОСТ 17.4.3.01.-83 (СТ СЭВ 3847-82)), рельефа местности, растительного покрова и гидрологических условий, т.е. условий, которые обеспечивают распространение загрязняющих веществ от источника. Вблизи источника загрязнения точки пробоотбора размещаются чаще (на расстоянии 50, 100, 200, 300 м), с удалением от него частота отбора снижается. Форма ареала обследования представляет собой неправильную фигуру, вытянутую по розе ветров. При контроле загрязнения почв транспортными магистралями пробные площадки закладывают на придорожных полосах, пробы отбирают с узких полос шириной 200–500 м на расстоянии 0–10, 10–50, 50–100 м от полотна дороги с глубины 0–10 см. На тестовых участках проводятся регулярные и периодические наблюдения. Повторное определение подвижных форм контролируемых элементов целесообразно проводить через несколько лет (1–5). Периодичность определяется степенью промышленной освоенности территории, удаленностью от крупных загрязняющих объектов, особенностями контролируемого элемента.

*Региональный мониторинг* – направлен на оценку влияния всех видов человеческой деятельности на состояние окружающей среды региона. Он представляет собой слежение за взаимодействием природы и человека в процессе природопользования.

*Локальный и региональный* почвенные экологические мониторинги включают в себя 3 основных вида:

1. Специфический.

Г.В. Мотузова (2007) к специфическим видам почвенного мониторинга относит мониторинг почв, подверженных загрязнению, и мониторинг агрохимический. Специфические виды локального и регионального почвенного мониторинга отличаются тем, что они направлены на выявление деградации прежде всего химических свойств почв, с которыми связано прямое действие почв на живые организмы. Существенных изменений физических свойств почв и их морфологии при этом может не наблюдаться (за исключением крайних степеней их проявления, например, в техногенной пустыне сильно загрязненных и деградированных почв).

2. Комплексный.

В рамках комплексного мониторинга выделяют мониторинг опустынивания, мониторинг пастбищ и ирригационно-мелиоративный мониторинг (Г.В. Мотузова). Комплексные виды локального и регионального почвенно-

го мониторинга направлены на выявление экологических последствий *комплексной деградации* почв, в основе которой лежат либо процессы деградации физических свойств почв, которые неизбежно сопровождаются деградацией их химических показателей (опустынивание, выбивание почв), либо начинаются с деградации химических свойств, которая влечет за собой изменение физических показателей (деградация орошаемых почв), что может отражаться как на их морфологических признаках, так и классификационном положении.

### 3. Универсальный.

Универсальные виды почвенного мониторинга включают: контроль микробиологического состояния почв, контроль качества почв и дистанционный мониторинг почв (Г.В. Мотузова). Универсальные виды локального и регионального почвенного мониторинга позволяют получить интегральную оценку деградации почв, в основе которой лежит либо состояние почвенного микробоценоза, либо производственная оценка качества почв, либо ее «внешний вид сверху», характеризующий большие территории.

*Фоновый мониторинг* – обязательный вид мониторинга. Цель его заключается в контроле состояния почв территорий, которые могут служить эталонами окружающей среды, своего рода «нулевыми точками отсчета» при проведении локального и регионального мониторинга. Объектами наблюдения для фонового мониторинга служат почвы, характерные для региона исследования, в минимальной степени подверженные антропогенному воздействию, например почвы в заповедниках или памятниках природы.

## **ПОКАЗАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ ПОЧВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ ИХ КОНТРОЛЕ**

Среди контролируемых показателей состояния почв различают две группы: *педохимические* и *биохимические*. К педохимическим показателям относят те свойства почв, изменение которых может быть вызвано загрязняющими веществами и которые могут отрицательно влиять на живые организмы. К педохимическим относятся показатели важнейших химических свойств почв: гумусного состояния, кислотно-основных и катионно-обменных свойств, в отдельных случаях окислительно-восстановительных свойств почв.

К биохимическим относят показатели, характеризующие аккумуляцию в почвах загрязняющих веществ и их непосредственного негативного влияния на живые организмы. К группе биохимических показателей относятся: 1) общее содержание загрязняющих веществ, 2) содержание соединений загрязняющих веществ, обладающих реальной и потенциальной подвижностью.

Показатели общего (валового) содержания контролируемых элементов как природного, так и техногенного происхождения характеризуют их запас

в почвах (табл. 3). Определение общего содержания химических элементов в почвах трудоемко и требует полного разложения алюмосиликатов, удерживающих значительную часть соединений, особенно в незагрязненных почвах (сплавление пробы, разложение кислотами с участием плавиковой кислоты).

При оценке состояния загрязненных почв общее содержание химических элементов является показателем менее информативным. Существует достаточно много данных о природном уровне общего содержания тяжелых металлов (Hg, Pb, Cd, As, Zn, Cu и др.) в почвах мира, в верхних горизонтах разных типов почв России. Кроме того, установлены особенности регионального фоновое содержания многих элементов, а также выявлены закономерности изменения их количества в зависимости от гранулометрического состава, гумусированности почв, реакции среды, содержания элементов в почвообразующих породах и других факторов.

Таблица 3

*Фоновое содержание валовых форм соединений тяжелых металлов в почвах (мг/кг) (Г.В. Мотузова, 2007)*

Почвы	Элемент, мг/кг							
	Zn	Cd	Pb	Hg	Cu	Co	Ni	As
Дерново-подзолистые песчаные и супесчаные	28	0,05	6	0,05	8	3	6	1,5
Дерново-подзолистые суглинистые и глинистые	45	0,12	15	0,10	15	10	30	2,2
Серые лесные	60	0,20	16	0,15	18	12	35	2,6
Черноземы	68	0,24	20	0,20	25	15	45	5,6
Каштановые	54	0,16	16	0,15	20	12	35	5,2

С расширением экологического контроля состояния почв широко стали применять методы определения содержания кислоторастворимых (1 н. HCl, 1 н. HNO<sub>3</sub>) соединений ТМ. Нередко им присваивают название «условноваловое содержание ТМ» (Г.В. Мотузова, 2007). Применение в качестве реагентов разбавленных растворов минеральных кислот не обеспечивает полного разложения пробы, но позволяет перевести в раствор основную часть соединений химических элементов техногенного происхождения.

К подвижным формам ТМ относят элементы и соединения почвенного раствора и твердой фазы почвы, которые находятся в состоянии динамического равновесия с химическими элементами почвенного раствора. Для определения подвижных ТМ в почвах в качестве экстрагента применяют сла-

бо солевые растворы, с ионной силой, близкой к ионной силе природных почвенных растворов: (0,01–0,05 М CaCl<sub>2</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, KNO<sub>3</sub>). Содержание потенциально подвижных соединений контролируемых элементов в почвах определяют в вытяжке 1 н. NH<sub>4</sub>CH<sub>3</sub>COO при разных значениях pH. Используют этот экстрагент и с добавлением комплексообразователей (0,02–1,0 М ЭДТА) (Г.В. Мотузова, 2007).

Для анализа чаще всего отбирают верхние слои почвы (0–10 см), иногда анализируется распределение загрязняющих веществ в почвенном профиле. Верхние горизонты играют роль геохимического барьера на пути потока веществ, поступающих из атмосферы. В условиях промывного водного режима загрязняющие вещества могут проникать вглубь и накапливаться в иллювиальных горизонтах, которые также служат геохимическими барьерами.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ**

### **Санитарно-гигиеническое нормирование содержания в почвах ТМ**

Санитарно-гигиеническим критерием качества окружающей среды служит предельно допустимая концентрация (ПДК) химических веществ в объектах окружающей среды. ПДК соответствует максимальному содержанию химического вещества в природных объектах, которое не вызывает негативного (прямого или косвенного) влияния на здоровье человека (включая отдаленные последствия).

Токсическое действие различных химических веществ на живые организмы характеризуют общесанитарным показателем, в качестве которого часто используют показатель ЛД-50 (летальная доза), который показывает массу вещества, поступившего в организм подопытных животных (мышей, крыс) и вызвавшего гибель 50 % из них. Размерность этого показателя – мг вещества/кг массы подопытного животного. Прямые контакты человека с почвой несущественны и происходят опосредованно через другие компоненты: почва – растение – человек; почва – растение – животное – человек; почва – воздух – человек; почва – вода – человек. Определение ПДК в почвах сводится к экспериментальному определению способности этих веществ поддерживать допустимую для живых организмов концентрацию веществ в контактирующих с почвой воде, воздухе, растениях.

Именно поэтому ПДК химических веществ для почв устанавливается не только по общесанитарному показателю, как это принято для других природных сред, а еще и по трем другим показателям: транслокационному, миграционному водному и миграционному воздушному (Г.В. Мотузова, 2007) (табл. 4).

Транслокационный показатель определяют по способности почв обеспечивать содержание химических веществ на допустимом уровне в растениях (тест-культурами служат редис, салат, горох, фасоль, капуста и др.). Соответственно миграционный водный и миграционный воздушный определяют по способности почв обеспечивать содержание этих веществ в воде и воздухе не выше ПДК. Однако санитарно-гигиенические нормативы качества почв не лишены недостатков; основной из них состоит в том, что условия модельного эксперимента определения ПДК и естественные условия сильно отличаются.

Одним из этапов решения проблемы экологического нормирования был подход, основанный на определении допустимой нагрузки на почву с учетом ее буферных свойств, обеспечивающих способность почвы ограничивать подвижность поступающих извне химических веществ, способность к самоочищению. Такие подходы развиваются в России и в других странах. Но разработать ПДК для каждого типа почв очень трудно. Целесообразна разработка нормативов химических веществ для почвенно-геохимических ассоциаций, объединенных общностью основных физико-химических свойств, определяющих их устойчивость к химическому загрязнению.

Таблица 4

*Предельно допустимые концентрации ТМ в почвах (мг/кг)  
(Г.В. Мотузова, 2007)*

Элемент	Кларк почв (Виноградов, 1962)	ПДК	Показатель вредности			
			общесанитарный	транслокационный	миграционный водный	миграционный воздушный
Общее содержание						
Mn	800	1500	1500	3500	1500	
V	100	120	150	170	350	
Pb	10	32	30	35	260	
Hg	0,01	2,1	5,0	2,1	33	2,5
Подвижные соединения						
Cu	20	3	3	3,5	72	
Ni	40	4	4	4	14	
Zn	50	23	37	93	200	
Co	8	5	5	25	1000	
Cr	200	6	6			

На следующем этапе для ряда химических элементов были разработаны ОДК (ориентировочно допустимые концентрации) этих элементов для почв, различающихся по важнейшим свойствам (по кислотности и грануло-

метрическому составу). Разработаны они были не на основе стандартизованного экспериментального метода, а на обобщении имеющихся сведений о взаимосвязи между уровнем нагрузки на почвы, состоянием почв и сопредельных сред.

В основу группировки почв по устойчивости к ТМ в первую очередь положены их кислотно-щелочные условия, а также было принято во внимание распространение основных геохимических ассоциаций почв на территории России. Наибольшую площадь распространения имеют геохимические ассоциации почв с кислой и нейтральной реакцией среды с подразделением на 2 группы:

- 1) почвы с очень кислой и кислой реакцией (рН водной вытяжки < 5);
- 2) почвы со слабокислой и нейтральной средой (рН 5–7).

Важен учет гранулометрического состава, особенно для почв первой группы, которые были разбиты на две подгруппы по гранулометрическому составу:

- 1) песчаные и супесчаные почвы, обладающие наименьшей устойчивостью к загрязнению;
- 2) суглинистые и глинистые почвы, относительно более устойчивые к загрязнению.

По этому принципу в нашей стране были определены ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) ТМ в почвах (табл. 5).

Таблица 5

*Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов в почвах (мг/кг) (1994)*

Группы почв	Элементы, мг/кг					
	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Песчаные и супесчаные	20	33	55	2	0,5	32
Кислые суглинистые и глинистые (рН <sub>KCl</sub> < 5,5)	40	66	110	5	1,0	65
Близкие к нейтральным, нейтральные суглинистые и глинистые (рН <sub>KCl</sub> > 5,5)	80	120	220	10	2,0	130

### **Биогеохимическое нормирование**

В основе биогеохимического нормирования лежит медико-географический подход. Он основан на натуральных наблюдениях в таких регионах, где природой созданы условия избытка или недостатка тех или иных химических элементов в природных средах. Эти регионы называются биогеохимическими провинциями. Результаты наблюдений в биохимических провинциях за состоянием живых организмов, в том числе и за здоровьем людей, позволяют установить их связь с содержанием элементов в природных средах.



На вероятностной основе определяются верхние и нижние границы содержания элементов, в пределах которых состояние большинства живых организмов (животных, растений, человека) не отклоняется от нормы. Но, как правило, 5–20 % людей и животных в эндемических районах оказываются пораженными. Чем больше содержание химических элементов превышает пороговые уровни, тем выше число пострадавших. Процесс естественного отбора при этом обостряется. На основе биогеохимического районирования В.В. Ковальским установлены пороговые концентрации ряда химических элементов в почвах (табл. 6).

Таблица 6

*Пороговые концентрации некоторых химических элементов в почвах, мг/кг (по Ковальскому, 1964)*

Элемент	Нормальное содержание	Нижняя граница пороговой концентрации	Верхняя граница пороговой концентрации
Co	7–30	2–7	> 30
Cu	15–60	6–15	> 60
Mn	400–3000	< 400	> 3000
Zn	30–70	< 30	> 70
Mo	1,5–4	> 1,5	> 4
Sr	600	?	600–1000

Вредное воздействие избыточного количества ТМ в окружающей среде на здоровье человека выявляется на основе анализа экотоксикологической обстановки в биогеохимических провинциях и здоровья длительно проживающих здесь людей. Используются также результаты анализа закономерностей распространения профзаболеваний в областях производств, вызывающих загрязнение окружающей среды химическими элементами (табл. 7).

Таблица 7

*Избирательная токсичность для человека некоторых ТМ*

Элемент	Заболевания
Мышьяк	Рак легких, кожные болезни, изъязвление, гематологические эффекты, анемия
Бериллий	Дерматиты, воспаление слизистых оболочек
Кадмий	Острые и хронические респираторные заболевания, почечная дисфункция, злокачественные образования
Хром	Рак легких, злокачественные образования желудочно-кишечного тракта, дерматиты
Свинец	Нарушения кроветворения, повреждение печени и почек, неврологические эффекты

Ртуть	Воздействие на нервную систему, нарушение краткосрочной памяти, нарушение координации, почечная недостаточность
Никеля	Респираторные заболевания, астма, поражения плода, уродства
Ванадий	Раздражение дыхательных путей, астма, нервные расстройства, изменение формулы крови

### **Экосистемное нормирование**

В настоящее время в подходах к нормированию содержания химических элементов в почвах все большее распространение получает экосистемная направленность. Экосистемное нормирование не допускает не только патологических, но и предпатологических изменений. Цель экосистемного нормирования состоит в том, чтобы сохранить природу в таком состоянии, когда все живые организмы имеют равное право на существование. Такой подход обеспечит сохранение и человека (популяции, индивидуума) как компонента экосистемы. Человек отличается от других организмов тем, что является конечным консументом в большинстве трофических цепей. Задача состоит в том, чтобы проверить, сохраняется ли уровень содержания того или иного вещества при любом антропогенном воздействии на экосистемы в пределах флуктуации его содержания в естественных природных условиях или выходит за эти пределы.

Теория экосистемного нормирования последовательна, но методы ее окончательно не разработаны, как и понятия о существенных и несущественных изменениях в экосистеме.

### **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КЛАССИФИКАЦИИ ПОЧВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЮ**

Классификацию почв по степени загрязнения проводят по предельно-допустимым концентрациям (ПДК) химических веществ в почвах и их фоновому содержанию (табл. 8). По степени загрязнения почвы следует подразделять на: 1) сильнозагрязненные; 2) среднезагрязненные; 3) слабозагрязненные. К сильнозагрязненным относят почвы, содержание загрязняющих веществ в которых в несколько раз превышает ПДК, они имеют низкую биологическую продуктивность, существенное изменение физических, химических и биологических характеристик, в результате чего содержание химических веществ в выращиваемых культурах превышает установленные нормы. К среднезагрязненным относят почвы, в которых установлено превышение ПДК без видимых изменений в составе почв. К слабозагрязненным относят почвы, содержание химических веществ в которых не превышает ПДК, но выше естественного фона.

*Показатели уровня загрязнения земель ТМ*

Элемент	Содержание (мг/кг), соответствующее уровню загрязнения				
	1-й уровень, допустимый	2-й уровень, низкий	3-й уровень, средний	4-й уровень, высокий	5-й уровень, очень высокий
Cd	< ПДК	от 1 до 3 ПДК	от 3 до 5	от 5 до 20	> 20
Pb	< ПДК	от ПДК до 125	от 125 до 250	от 250 до 600	> 600
Hg	< ПДК	от ПДК до 3	от 3 до 5	от 5 до 10	> 10
As	< ПДК	от ПДК до 20	от 20 до 30	от 30 до 50	> 50
Zn	< ПДК	от ПДК до 500	от 500 до 1500	от 1500 до 3000	> 3000
Cu	< ПДК	от ПДК до 200	от 200 до 300	от 300 до 500	> 500
Co	< ПДК	от ПДК до 50	от 50 до 150	от 150 до 300	> 300
Ni	< ПДК	от ПДК до 150	от 150 до 300	от 300 до 500	> 500
Mo	< ПДК	от ПДК до 40	от 40 до 100	от 100 до 200	> 200
Sn	< ПДК	от ПДК до 20	от 20 до 50	от 50 до 300	> 300
Ba	< ПДК	от ПДК до 200	от 200 до 400	от 400 до 2000	> 2000
Cr	< ПДК	от ПДК до 250	от 250 до 500	от 500 до 800	> 800
V	< ПДК	от ПДК до 225	от 225 до 300	от 300 до 350	> 350

Степень устойчивости почвы к химическим загрязняющим веществам оценивают по отношению к конкретному химическому загрязняющему компоненту или группе веществ, которыми загрязнена исследуемая почва. По степени устойчивости к химическим загрязняющим веществам и по характеру ответных реакций почвы следует подразделять на: 1) очень устойчивые; 2) среднеустойчивые; 3) малоустойчивые. Степень устойчивости почвы к химическим загрязняющим веществам характеризуется следующими основными показателями: 1) гумусным состоянием; 2) кислотно-основными свойствами; 3) окислительно-восстановительными свойствами;

4) катионно-обменными свойствами; 5) биологической активностью; 6) уровнем грунтовых вод; 7) долей веществ в почве, находящихся в растворимой форме.

При оценке устойчивости почв к химическим загрязняющим веществам необходимо учитывать следующие показатели: 1) данные, характеризующие сезонные или краткосрочные (2–5 лет) изменения свойств почв. Краткосрочные изменения свойств почв диагностируются по динамике влажности, величине рН, составу почвенных растворов, дыханию почв, содержанию доступных растениям питательных веществ. 2) показатели долгосрочных изменений, проявляющихся в течение 5–10 лет и более, отражающие неблагоприятные тенденции изменения свойств в результате загрязнения; они включают периодические изменения содержания и запаса гумуса, отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот, эрозионные потери почвы, структурное состояние, состав обменных катионов, общую щелочность, кислотность, содержание солей. 3) показатели ранней диагностики развития (появления) неблагоприятных изменений свойств почв, пригодные для биологических тестов, микроморфологических наблюдений, анализов водно-солевого, окислительно-восстановительного и кислотно-щелочного режимов почвы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вредные химические вещества: неорганические соединения элементов I–IV групп / под ред. В.А. Филова. – Л. : Химия, 1988. – 512 с.
2. ГН 2.1.7.020-94. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах. Дополнение № 1 к перечню ПДК и ОДК №6229-91. – М. : Госкомсангиздат, 1995.
3. ГОСТ 17.4.2.03-86 (СТ СЭВ 5299-85). Охрана природы. Почвы. Паспорт почв. – М. : Госкомсангиздат, 1987.
4. ГОСТ 17.4.3.01-83 (СТ СЭВ 3847-82). Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – М. : Госкомсангиздат, 1984.
5. ГОСТ 17.4.3.06-86 (СТ СЭВ 5301-85). Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. – М. : Госкомсангиздат, 1987.
6. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – М. : ЦИНАО, 1992. – 60 с.
7. Мотузова Г.В. Экологический мониторинг почв / Г.В. Мотузова, О.С. Безуглова. – М. : Академический Проект ; Гаудеамус, 2007. – 237 с.
8. Перельман А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман, Н.С. Касимов. – М. : Астрей-2000, 1999. – 768 с.
9. Реймерс Н.Ф. Природопользование : слов.-справ. / Н.Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 638 с.

*Учебное издание*

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ.  
СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ И НОРМИРОВАНИЯ  
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ**

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:

**Джувеликян Хачик Акопович,  
Щеглов Дмитрий Иванович,  
Горбунова Надежда Сергеевна**

Корректор Е.А. Глаголева

Подписано в печать 17.11.2009. Формат 60×84/16. Усл. печ. л 1,3.  
Тираж 80 экз. Заказ 1466.

Издательско-полиграфический центр  
Воронежского государственного университета.  
394000, г. Воронеж, пл. им. Ленина, 10. Тел. (факс) +7 (4732) 598-026  
<http://www.ppc.vsu.ru>; e-mail: [pp\\_center@ppc.vsu.ru](mailto:pp_center@ppc.vsu.ru)

Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического центра  
Воронежского государственного университета.  
394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3