

## ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И ОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКИХ ПОЧВ ХИМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

*к.г.м.н. Е.П. Янин*

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва  
yanin@geokhi.ru*

Рассматриваются основные подходы к оценке интенсивности и опасности техногенного загрязнения почв городских поселений химическими элементами. Анализируются общие подходы к оценке распределения химических элементов в почвах. Систематизируются сведения по эколого-геохимической и гигиенической оценки состояния городских почв в России и некоторых зарубежных странах. Особое внимание уделяется способам оценки токсичности загрязненных почв для городских зеленых насаждений. Рассматриваются свойства почв и их влияние на уровень предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. Обсуждаются проблемы типизации почв по интенсивности их химического загрязнения.

### Введение

Городские почвы, как базовый и наиболее консервативный компонент городской экосистемы, выполняют функцию своеобразного «депо» для многих поллютантов, являются одним из важнейших биогеохимических барьеров на пути их миграции из атмосферы в грунтовые воды и поверхностные водоемы и одновременно играют роль потенциального вторичного источника загрязнения среды обитания человека. Важнейшая особенность многих городов – значительное разнообразие источников химического загрязнения окружающей среды. Техногенные потоки вещества, образующиеся здесь, характеризуются высокими концентрациями многих химических элементов и их соединений, что обуславливает возникновение для городского населения специфических эколого-геохимических и санитарно-гигиенических условий, неизвестных до недавнего времени в природе. В большинстве случаев в городах интенсивность многолетнего техногенного воздействия и пространственная картина распространения загрязняющих веществ наиболее четко устанавливаются по химическому составу и геохимическим свойствам именно почв. В конечном счете в почвах формируются техногенные геохимические аномалии, пространственно отражающие зоны техногенного загрязнения, где концентрации поллютантов достигают опасных для человека уровней.

С экологической точки зрения показателями нормального функционирования почв, как и всего ландшафта, являются биологическая продуктивность и качество создаваемой биологической продукции: уровень продуктивности не должен понижаться, в биомассе не должны накапливаться элементы в количествах, нарушающих жизненные функции, в почвенной биоте должен сохраняться полезный генофонд [7]. В свою очередь, основ-

ные показатели химического (геохимического) состояния почв можно разделить на три группы [28]: 1) прямые показатели степени загрязненности почв, которые характеризуют содержания в них поллютантов (их валовых и подвижных форм); 2) косвенные показатели, отражающие неблагоприятные изменения химических свойств (кислотно-основных, ионообменных, коллоидно-химических свойств и др.) под влиянием загрязняющих веществ, которые могут быть причиной ухудшения качества почв, снижения плодородия и нарушения их экологической функции; 3) показатели, характеризующие способность почв противостоять изменению свойств при техногенном воздействии, а также их способность к самоочищению.

С гигиенической точки зрения опасность химического загрязнения городских почв определяется: 1) эпидемиологической значимостью загрязненной химическими веществами почвы; 2) ее ролью как вторичного источника загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха, природных вод, жилой и производственной среды; 3) возможностью непосредственного и опосредованного воздействия содержащихся в почве поллютантов на живые организмы; 4) значимостью почвы для развития зеленых насаждений, играющих значительную роль в формировании качества городской среды; 5) изменением буферной способности и снижением биоактивности почвы в условиях интенсивного загрязнения; 6) важностью почвы как универсального абсорбента и биологического нейтрализатора, осуществляющего минерализацию многих органических веществ.

Хорошо известны также градостроительные, социальные и экономические негативные последствия и явления, обусловленные техногенным загрязнением городских территорий [24, 38], интенсивность которого напрямую сказывается на ценах на жилье и землю, сдерживает инвестиции в социальную сферу и в существенной мере предопределяет наличие в городах заметных пространственных различий в уровнях общественных благ, значительно усложняет планировочное развитие города и функционирование городского хозяйства в целом, обуславливает появление так называемых городских трущоб. Значительная доля заболеваний и преждевременных смертей в городской местности вызвано хроническим воздействием внешних факторов, ослабляющих защитные силы организма людей, среди которых загрязнению среды обитания принадлежит одна из ведущих ролей. Особенно актуальны эти проблемы для развивающихся стран и стран с переходной экономикой, где значительная доля населения остается незащищенной от многочисленных экологических угроз. Известный американский экономист М. Тодаро [38] справедливо утверждает, что если в этих странах не будут осуществляться специальные экологические программы, ориентированные на основную массу населения, то положение в них еще более будет ухудшаться по мере усиления процесса урбанизации. Все это, в сущности, и определяет необходимость разработки системы адекватных оценок состояния и качества почвенного покрова в городах и городских агломерациях.

### **Общие подходы к оценке распределения химических элементов в почвах**

При оценках распределения в почвах химических элементов чаще всего изучают их удельную и относительную распространенность, реже – так называемую парциальную (частичную) распространенность. Для характеристики удельной распространенности обычно используют массовые (например, г/т, мг/кг, мкг/г, весовые проценты, или в % от массы, и т. п.) показатели, отра-

жающие общее (валовое) содержание (общую концентрацию) химического элемента в том или ином почвенном горизонте. В настоящее время для оценки удельной распространенности элементов применяют также безразмерные единицы, наиболее известными из которых являются *ppm* (*part per million parts* – часть на миллион частей, т. е. одна миллионная доля, что соответствует одной десяти тысячной процента относительного содержания) и *ppb* (*part per billion parts* – часть на миллиард частей, т. е. одна миллиардная доля). В отечественной научной литературе иногда вместо аббревиатур *ppm* и *ppb* используют, соответственно, обозначения *ч/млн* и *ч/млрд*. Между весовыми (процентными) показателями и безразмерными единицами существует пропорциональная связь, что позволяет переходить от одних к другим (например,  $1 \text{ ppm} = 1 \text{ мг/кг} = 1 \text{ г/т} = 1 \text{ мкг/г} = 10^{-4}\%$ ;  $1 \text{ ppb} = 1 \text{ мкг/кг} = 1 \text{ мг/т} = \sim 1 \text{ мкг/л} = \sim 1 \text{ мкг/дм}^3 = 10^{-7}\%$  и т. д.).

Парциальное (частичное) содержание химического элемента в каком-либо природном компоненте, по Дж. Фортескью [40], представляет собой часть от общего его содержания, которая извлекается из образца почвы, отобранного и обработанного по стандартной методике с использованием, например, специальных экстрагирующих растворов одного состава в течение определенного времени, при заданных температурах (и других условиях). Таким образом, парциальное содержание – это удельное или относительное содержание какой-либо формы (в общепринятом понимании этого термина) химического элемента в исследуемом объекте (в нашем случае, в почве). Например, валовое содержание свинца в городской почве достигает  $100 \text{ мг/кг}$  (т. е.  $100 \text{ ppm}$ ), парциальное содержание его оксидной формы составляет  $30 \text{ мг/кг}$  ( $30 \text{ ppm}$  или  $30\%$  от валового количества).

Для выражения относительной распространенности химических элементов применяют коэффициенты, в основе которых лежит коэффициент распределения – величина отношения содержаний данного элемента в каких-либо сравниваемых между собой взаимосвязанных объектах или частях одного объекта. Например, таким коэффициентом является известный кларк концентрации ( $K_c$ ), в свое время предложенный В.И. Вернадским для характеристики относительной распространенности химических элементов и представляющий собой отношение содержания какого-либо элемента в рассматриваемом природном объекте (например, в почвах) к его кларку (среднему содержанию в земной коре, в литосфере, в осадочных породах Земли).

В экологической геохимии для оценки относительной распространенности используется коэффициент концентрации, представляющий собой отношение установленной концентрации элемента к его фоновому содержанию (при значениях этого коэффициента больше единицы, его нередко называют еще коэффициентом накопления или коэффициентом аномальности; при значениях меньше единицы – коэффициентом рассеяния). Если, например, в почвах изученного участка города параметры распределения валовых содержаний химического элемента (или группы элементов) достоверно отличаются (т. е. больше или меньше) от его (их) фоновых концентраций (от регионального или глобального параметра), то говорят о геохимической аномалии. В эколого-геохимических исследованиях под фоновой концентрацией (фоновым содержанием) химического элемента понимают его содержание в каком-либо компоненте (например, в почвах) относительно однородного в ландшафтно-геохимическом отношении природного участка, не испытывающего прямого техногенного воздействия [30]. На практике для этой цели обычно исследуются почвы участков, удаленных от городов и не испытывающих прямого техногенного воздействия.

Необходимо отметить, что геохимическая аномалия определяется как часть геологического пространства (геологического объекта), которой свойственны аномальные (т. е. отличные от фоновых) значения не только валового содержания того или иного химического элемента (или их группы), но и аномальные значения любой другой аналитически установленной или рассчитанной величины, используемой для количественной или качественной характеристики изучаемых геологических объектов. В частности, техногенное воздействие обуславливает изменение не только валовых содержаний химических элементов, но и приводит к трансформации их форм нахождения в почвах. Более того, иногда валовые содержания химического элемента в зонах техногенного загрязнения близки фоновым концентрациям, однако при этом существенно изменяются его формы нахождения (изменяется баланс форм нахождения), что, безусловно, также представляет собой явление, аномальное по отношению к фоновым условиям. Тем не менее традиционно наиболее пристально изучаются геохимические аномалии, выделяемые по уровням валового содержания химических элементов. При этом в центре внимания находятся так называемые (в терминологии А.И. Перельмана [26]) «положительные геохимические аномалии», когда концентрации элемента (элементов) достоверно превышают фоновые содержания (или, например, региональные или глобальные параметры). В меньшей степени исследуются «отрицательные геохимические аномалии», когда концентрации элементов меньше их фоновых содержаний. С позиций экологической геохимии многозначные термины «положительная» и «отрицательная» являются ложно ориентирующими, поскольку первый наводит на мысль о том, что данное явление обладает некими «хорошими, полезными экологическими качествами», а второй – свидетельствует о «плохих экологических качествах». Возможно, именно поэтому они и не нашли широкого применения и требуют более строгого терминологического оформления. Не исключено, что в первом случае надлежит говорить об геохимических аномалиях накопления (геохимических аномалиях концентрирования), во втором – о геохимических аномалиях разубоживания. Как правило, именно в случае с положительными геохимическими аномалиями, наиболее свойственных техногенным ландшафтам, и говорят о техногенном загрязнении, а участки биосферы, где наблюдаются такие аномалии, называют зонами техногенного загрязнения. Обоснованно считается, что различные характеристики «положительных аномалий», отражающие состав и параметры техногенного загрязнения, в конечном счете определяют качество окружающей среды.

Необходимо отметить, что термины «техногенная геохимическая аномалия» и «зона техногенного загрязнения» некоторыми исследователями не рассматриваются как синонимы. Например, в пространственном отношении под зоной загрязнения может подразумеваться часть ландшафта (территории), в пределах которой загрязняющие вещества достигают концентраций, оказывающих неблагоприятное влияние на живые организмы, или, говоря иначе, в пределах зоны загрязнения содержания поллютантов в том или ином компоненте стабильно превышают гигиенические (экологические) нормативы. В свою очередь, часть ландшафта, в пределах которой наблюдается стабильное превышение фоновых содержаний элементов, но не происходит нарушения существующих нормативов, называют зоной влияния (или зоной воздействия) источника загрязнения.

В настоящее время формализованная оценка экологической или санитарно-токсикологической опасности уровней содержания химических элементов в окружающей среде проводится путем сравнения их реальных концентраций в исследуемом природном компоненте (например, в почвах) с законодательно установленными нормативными уровнями, определяющими безопасные условия существования живых организмов (прежде всего, человека). В нашей стране для этих целей чаще всего применяют показатели существующей системы санитарно-гигиенического нормирования (ПДК – предельно допустимая концентрация, ОДК – ориентировочно допустимая концентрация, МДУ – максимальный допустимый уровень и т. д.). Однако указанные нормативы разработаны для сравнительно ограниченной группы поллютантов, тогда как формирующиеся в городах техногенные геохимические аномалии обычно отличаются комплексным (полиэлементным) составом, что нередко затрудняет проведение соответствующих оценок, основанных на применении только гигиенических нормативов. Именно поэтому в практике широко применяют эколого-геохимическую оценку состояния городских почв, при которой в качестве своеобразных нормативов используются природные концентрации химических элементов и их соединений в почвах и почвообразующих породах, априори считающиеся безопасными для человека.

Таким образом, следует различать два основных подхода к оценке качества (состояния) почв населенных мест: гигиенический подход, основанный на использовании утвержденных в установленном порядке гигиенических нормативов предельного содержания вредных веществ в почве, и эколого-геохимический подход, основанный на использовании в качестве своеобразных нормативов природные концентрации химических элементов и их соединений в почвах и почвообразующих породах.

### **Эколого-геохимическая оценка состояния городских почв**

Эколого-геохимическая оценка интенсивности и масштабов техногенного загрязнения городских почв в большинстве случаев основана на результатах площадных геохимических съемок (так называемого эколого-геохимического картирования), предполагающих систематический отбор проб почв (обычно их верхнего горизонта) с заданной плотностью, определяемой масштабом картирования. Общие принципы и технология проведения эколого-геохимического картирования изложена в соответствующей научной и методической литературе [1, 20–22, 29–31, 32–37, 42, 43]. Сущность такого картирования сводится к установлению особенностей пространственного распределения в почвенном покрове техногенных геохимических аномалий, отражающих распространение и площадную структуру зон техногенного загрязнения в пределах городской территории. Как уже отмечалось, в большинстве случаев техногенные геохимические аномалии, свойственные городским почвам, отличаются полиэлементным составом, т. е. повышенным (аномальным) накоплением в почвах определенной группы химических элементов. Такую группу элементов, характеризующую состав геохимической аномалии (т. е., по сути, состав техногенного загрязнения) и, соответственно, геохимический (миграционный) поток, связанный с источником или группой источников техногенного воздействия, называют техногенной геохимической ассоциацией. В пространственном отношении техногенная геохимическая ассоциация может характеризовать объект исследования в целом (например, всю территорию города), его часть (отдельный район, промышленную зону) или конкретную точку опробования.

В состав техногенных геохимических ассоциаций практически всегда входят химические элементы, для которых гигиенические нормативы отсутствуют (не установлены). В таких случаях в качестве нормативных содержаний используют следующие группы показателей распространенности химических элементов: а) глобальные параметры распределения (кларк), характеризующие средние содержания химических элементов в земной коре (литосфере), осадочных породах земной коры, в мировых почвах; 2) региональные (зональные) кларки (или региональные фоновые уровни), характеризующие средние (природные, естественные) содержания химических элементов в осадочных породах и почвах крупных территорий и/или природных зон (например, в осадочных породах Русской плиты, в дерно-воподзолистых почвах и т. д.); 3) локальные фоновые концентрации химических элементов (местный фон), т. е. их средние содержания в почвах, развитых в пределах относительно однородного в ландшафтно-геохимическом отношении участка, не испытывающего прямого техногенного воздействия. Кларк (среднее содержание в земной коре), по образному выражению А.Е. Ферсмана, есть величайшая константа космической системы и данного химического элемента. В.И. Вернадский подчеркивал, что биогеохимическая организованность биосферы, ее химический состав должны рассматриваться как равновесия, подвижные, все время колеблющиеся в историческом и геологическом времени около точно выражаемого среднего [2]. В сущности, такими средними величинами и являются глобальные и региональные кларки, т. е. глобальные и региональные средние содержания элементов (табл. 1, 2), требующие, безусловно, постоянного уточнения. Не исключено также, что глобальные и региональные показатели распространенности химических элементов в основных типах горных пород и почв определяют такие уровни содержания их в окружающей среде, которые априори безопасны для живых организмов, включая человека [30].

Как уже отмечалось выше, для установления фоновых концентраций химических элементов в почвах на практике чаще всего исследуются относительно однородные в природном отношении участки ландшафтов, расположенные на значительном удалении от техногенных источников загрязнения, но в той же ландшафтно-географической зоне, и не испытывающие прямого техногенного воздействия. Таким условиям, например, нередко отвечают территории природных заповедников (особенно биосферных), заказников и т. д. При определении фоновых концентраций учитывается природная вариация распределения элементов, которая, как правило, в типичных естественных условиях относительно невелика. Например, изучение распределения широкой группы химических элементов в гумусовом горизонте дерново-подзолистых почв фоновых ландшафтов Московской области показало, что коэффициенты вариации их содержаний находятся в основном в пределах 25–60% [20]. Практически такие же пределы значений указанного коэффициента установлены для распределения химических элементов в верхних горизонтах фоновых каштановых почв Центрального Казахстана и выпелочных черноземов Молдовии [44]. Валовые содержания химических элементов в почвах, которые в 1,5 раза больше фоновых, обычно относят к аномальным концентрациям, формирование которых связано с воздействием какого-либо источника, не типичного для данного природного ландшафта. Обоснованно считается, что указанный уровень в определенной степени сглаживает природную вариацию распределения элементов и возможные ошибки опробования и химико-аналитических исследований.

Таблица 1

## Химические элементы в земной коре и почвах мира, мг/кг

Элемент	Среднее содержание в			Среднее в почвах мира	
	земной коре [3]	осадочных породах [3]	континентальной коре [55]	[54]	[3]
Li	32	60	22	31	30
Be	3,8	3	3,1	1,5	6
B	12	100	17	–	10
F	660	500	611	–	200
Sc	10	10	7	10	–
Ti	4500	4500	3117	5000	4600
V	90	130	53	108	100
Cr	83	100	35	84	200
Mn	1000	670	527	760	850
Co	18	20	11,6	12	10
Ni	58	95	18,6	34	40
Cu	47	57	14,3	26	20
Zn	83	80	52	60	50
Ga	19	30	14	–	–
Ge	1,4	2	1,4	–	–
As	1,7	6,6	2	1163	5
Se	0,05	0,6	0,083	0,4	0,01
Sr	340	450	316	278	300
Y	29	30	20,7	–	–
Zr	170	200	237	345	300
Nb	20	20	26	–	–
Mo	1,1	2	1,4	–	2
Ag	0,07	0,1	0,055	0,4	(0,1)
Cd	0,13	0,03	0,102	0,6	0,5
In	0,25	0,05	0,061	–	–
Sn	2,5	10	2,5	5,8	10
Sb	0,5	2	0,31	167	–
Cs	3,7	12	5,8	–	5
Ba	650	800	668	568	500
La	29	40	32,3	–	–
Ce	70	50	65,7	3	–
Yb	0,33	3	1,5	–	–
Hf	1	6	5,8	–	–
Ta	2,5	3,5	1,5	–	–
W	1,3	2	1,4	1,1	–
Hg	0,083	0,4	0,056	0,1	0,01
Tl	1	1	0,75	–	–
Pb	16	20	17	29	10
Bi	0,009	0,01	0,123	–	–
U	2,5	3,2	2,5	2,2	1

\* Без учета вклада глобального загрязнения окружающей среды данным металлом.

Зональные и региональные оценки распространенности химических элементов в разных почвах, мг/кг [30]

Элемент	Зональные оценки, почвы бив. СССР										Кавказ		Московская обл., дерновоподзолистые
	подзолистые	серые лесные	черноземы	каштановые	сероземы	черноземы	коричневые	сероземы	черноземы	коричневые	черноземы	коричневые	
Li	23,5	26,4	33,8	34,2	37,2	10	50	16					16
Be	1,5	3	3,2	4	1	-	-	1,5					1,5
B	5,8	12,3	19,7	30	46	-	92	38					38
F	208	312	285	158	170	-	-	210					210
P	700	1500	700	700	700	-	500	-					-
S	720	720	720	720	720	-	-	-					-
Ti	4045	4400	4780	4075	1990	-	3500	6000					6000
V	63,5	118	145	79	86	140	200	64					64
Cr	180	250	286	328	467	244	90	46					46
Mn	715	1025	885	722	725	-	2800	590					590
Co	8,4	12,4	13,2	11,7	6,9	12	33	7,2					7,2
Ni	23,2	30,3	72,1	46	19	31	60	20					20
Cu	15,3	23,5	28,9	15,8	24	30	67	27					27
Zn	41,3	60	62	52,3	50	140	160	50					50
As	3	4,7	5,9	5,2	2,5	-	-	3					3
Sr	238	258	260,4	287	305	80	40	28					28
Y	-	-	-	-	-	-	-	18					18
Zr	150	442	299	420	112	60	83	423					423
Mo	1,7	3,2	4,2	3,2	3	1,7	2	1					1
Ag	0,1	0,3	0,5	0,4	-	0,1	-	0,1					0,1
Cd	0,7	0,7	0,5	0,4	-	-	-	0,3					0,3
Sn	2,9	2,8	3,2	3,3	4	4,7	4,3	5,2					5,2
Ba	-	-	-	-	-	270	130	330					330
Yb	-	-	-	-	-	-	-	2					2
W	-	-	-	-	-	-	-	1					1
Hg	-	-	-	-	-	-	-	0,01					0,01
Pb	11,5	12,5	13,2	10	6,3	80	63	25					25

В большинстве случаев эколого-геохимическое картирование позволяет достаточно надежно пространственно очертить участки городской территории, отличающиеся интенсивным концентрированием химических элементов в почвах и представляющие собой наиболее опасные с экологической (и гигиенической) точки зрения зоны их химического загрязнения. В дальнейшем именно в пределах таких участков осуществляются детальные исследования, направленные на оценку качества городских почв и, как правило, основанные на более детальном опробовании почвенного покрова. Для характеристики установленных в ходе таких исследований техногенных геохимических ассоциаций эффективно применение комплекса следующих относительно простых показателей, позволяющих на экспертном уровне описать и оценить техногенные зоны загрязнения.

1. Коэффициент концентрации химического элемента –  $K_C$ ; характеризует уровень концентрирования (интенсивность аномалии) элемента в загрязненных почвах.

Коэффициент рассчитывается по формуле:  $K_C = C_i / C_{\Phi}$ , где  $C_i$  – средняя концентрация  $i$ -го химического элемента, установленная для данной геохимической выборки (участка загрязненных почв),  $C_{\Phi}$  – фоновое содержание этого элемента.

2. Формула геохимической ассоциации; характеризует качественный (элементный) состав и структуру геохимической аномалии; представляет собой упорядоченную по значениям  $K_C$  совокупность (ранжированный ряд) химических элементов. В геохимическую ассоциацию включаются элементы со значениями  $K_C$  не менее 1,5. Как правило, ассоциация, характерная для определенного вида (источника) воздействия, отличается своеобразным количественным сочетанием (соотношением) значений  $K_C$  элементов. Формула геохимической ассоциации изображается, например, так:  $Hg_{150}-Cd_{110}-Pb_{78}-Ag_{48}-Zn_{23}-Ni_{11}-(Cu-Co-Sb)_5-Mo_3-(Mn-Ti)_{1,7}-V_{1,5}$ , где цифровые индексы около символов химических элементов представляют их  $K_C$ . Обычно химические элементы, входящие в ассоциацию, систематизируются (объединяются) по значениям  $K_C$  в группы, границы интервалов которых примерно соответствуют шкале десятичных логарифмов с шагом 0,5: 1,5–3; 3–10; 10–30; 30–100 и т. д., что особенно наглядно при сравнении различных объектов и представлении материалов в табличной форме.

3. Показатель  $N_{\Sigma}$ ; характеризует количественный состав техногенной геохимической ассоциации и отражает количество входящих в нее элементов ( $K_C$  которых не менее 1,5).

4. Суммарный показатель загрязнения  $Z_C$ ; представляет собой сумму коэффициентов концентрации  $K_C$  элементов (за вычетом фона), входящих в геохимическую ассоциацию, отражает аддитивное превышение фонового уровня группой ассоциирующихся элементов и характеризует общий уровень техногенного загрязнения почв в пределах данного участка. Он рассчитывается по известной формуле, предложенной Ю.Е. Саеом:

$$Z_C = \left( \sum_{i=1}^n K_C \right) - (n - 1),$$

где  $K_C$  – коэффициент концентрации  $i$ -го химического элемента,  $n$  – число, равное количеству химических элементов, входящих в геохимическую ассоциацию (т. е.  $N_{\Sigma}$ ).

5. Показатель долевого участия химического элемента в геохимической ассоциации  $M_C\%$  [36]; отражает процентную долю участия химического элемента в ассоциации и используется для характеристики структуры последней. Рекомендуется рассчитывать данный показатель для элементов, доля участия которых в ассоциации в сумме превышает 50%. Показатель рассчитывается по формуле:  $M_C\% = [(K_C - 1) : Z_C] \times 100\%$ , где  $K_C$  – коэффициент концентрации химического элемента в данной геохимической ассоциации;  $Z_C$  – суммарный показатель загрязнения, характерный для этой же ассоциации.

6. Характеристики уровня опасности (во многом гигиенической) техногенного загрязнения на основе следующей ориентировочной шкалы (табл. 3).

Таблица 3

**Ориентировочная оценочная шкала опасности загрязнения почв населенных пунктов по суммарному показателю загрязнения ( $Z_C$ ) [5, 20, 22]**

Категория загрязнения	$Z_C$	Изменения показателей здоровья населения в очагах загрязнения
Допустимая	Менее 16	Наиболее низкий уровень заболеваемости детей и минимальная частота встречаемости функциональных отклонений
Умеренно опасная	16–32	Увеличение общей заболеваемости
Опасная	32–128	Увеличение общей заболеваемости, числа часто болеющих детей, детей с хроническими заболеваниями, нарушениями функционального состояния сердечно-сосудистой системы
Чрезвычайно опасная	Более 128	Увеличение заболеваемости детского населения, нарушение репродуктивной функции женщин (увеличение токсикоза беременности, число преждевременных родов, мертворождаемости, гипотрофий новорожденных)

Примечание.  $Z_C$  отражает дифференциацию загрязнения воздушного бассейна городов различными поллютантами; этот показатель получают в результате опробования почв по регулярной сети; определение химических элементов при оценке уровня загрязнения почв рекомендуется проводить методом эмиссионного анализа; наиболее эффективен расчет этого показателя, когда исследуемое число химических элементов составляет не менее 30.

В тех случаях, когда по каким-либо причинам невозможно получение фоновых параметров распределения химических элементов, могут использоваться показатели их глобальной распространенности, например, кларки земной коры или осадочных пород, либо средние глобальные и региональные уровни в почвах. Естественно, что при расчетах соответствующих коэффициентов делается необходимая корректировка (в роли фоновой концентрации выступают выбранные глобальные, региональные или зональные параметры распространенности химического элемента).

Следует отметить, что во многих случаях рационально изучение валового химического состава почв с определением содержания в почвах органического вещества (гумуса) и доли глинистых фракций. Эти данные важны для установления буферности почв и определения степени экологической и гигиенической опасности техногенного загрязнения почв в пределах исследуемого участка города (табл. 4).

Валовый состав верхнего слоя почв в окрестностях г. Саранска, % [45]

Компонент	Фон	Территория г. Саранска				Вблизи завода Резинотехника	Вблизи городской ТЭЦ
		Жилой микрорайон Светотехника	Промзона СИС-ЭВС*	Промзона электролампового завода	Промзона Резинотехника		
SiO <sub>2</sub>	73,69	73,25	69,43	59,74	65,10	64,56	
TiO <sub>2</sub>	0,54	0,42	0,47	0,76	0,56	0,59	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,41	6,39	8,23	14,83	10,03	9,29	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47	0,93	1,14	4,03	3,04	2,77	
FeO	2,59	2,08	5,03	1,72	2,15	1,72	
MnO	0,20	0,04	0,06	0,09	0,06	0,07	
CaO	0,47	0,94	2,20	2,67	1,73	2,04	
MgO	0,70	0,90	0,90	1,70	1,10	1,00	
Na <sub>2</sub> O	0,55	0,50	0,40	1,13	0,80	0,70	
K <sub>2</sub> O	1,48	1,43	1,26	2,36	2,31	1,98	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,14	0,09	0,19	0,27	0,18	
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	4,98	1,76	1,84	2,76	2,28	3,16	
S <sub>общая</sub>	<0,10	0,21	0,20	0,21	<0,10	<0,10	
ППП	7,20	10,45	8,18	7,35	10,09	11,41	
CO <sub>2</sub>	0,22	0,22	1,32	1,10	0,66	0,44	
Фтор	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	

\* Завод специальных источников света и электровакуумного стекла.

Обоснованно считается, что поведение и потенциальное экологическое значение тяжелых металлов не определяется их общим содержанием в почвах, поскольку, нередко, определяющее значение имеют формы нахождения металлов в почвах и, прежде всего, количество их подвижных (геохимически активных) в условиях окружающей среды соединений [15]. В частности, австралийские исследователи справедливо отмечают, что во многих странах оценку опасности тяжелых металлов в почве все еще необоснованно делают только по их общему содержанию в почве, несмотря на растущее признание так называемой концепции «биодоступности химических элементов» [50]. Последняя, однако, сталкивается с трудностями оценки возможного экологического и гигиенического риска, возникающего из-за изменений в нативных условиях окружающей среды. Эти изменения (значений рН почвенного раствора, содержания органических веществ в почве и др.) влияют на биодоступность конкретного металла. Тем не менее при прочих общих условиях высокие валовые удельные концентрации химических элементов в почвах априори преопределяют их повышенную потенциальную биодоступность, прежде всего, для городских растений [13].

### **Гигиеническая оценка качества городских почв в России**

В России гигиеническая оценка интенсивности химического загрязнения городских почв основывается на применении показателей существующей системы санитарно-гигиенического нормирования содержания в них вредных веществ: ПДК (предельно допустимых концентраций, значения которых устанавливаются экспериментальным путем) и ОДК (ориентировочно допустимые концентрации, значения которых определяются расчетным способом). Под ПДК так называемого экзогенного химического вещества в почве обычно подразумевают максимальное его количество (как правило, в мг/кг пахотного слоя абсолютно сухой почвы), установленное в экстремальных почвенно-климатических условиях, которое гарантирует отсутствие отрицательного прямого или опосредованного (через контактирующие с почвой среды) воздействия на здоровье человека, его потомство, санитарные условия жизни населения и самоочищающую способность почвы [10, 39]. Отсюда следует, что не всякое поступление химического вещества в почву рассматривается как опасное загрязнение, а только такое, при котором уровни его содержания превышают установленные предельные значения.

В России гигиеническое нормирование химических элементов в почве осуществляется с применением специфических только для данного компонента среды имитационного модельного почвенного эталона и соответствующих показателей вредности [5, 10], а также классов опасности нормируемых элементов, которые, однако, определены для их сравнительно узкого круга (табл. 5). В практической работе для определения класса опасности химического вещества в почве рекомендуют пользоваться следующей шкалой (табл. 6).

Обоснование ПДК химических веществ в почве основывается на 4 основных показателях вредности, устанавливаемых экспериментально для каждого потенциального поллютанта [5]: а) транслокационного показателя, характеризующего переход вещества из почвы в растения, б) миграционного водного показателя, который оценивает способность перехода вещества из почвы в грунтовые воды и водосточники, в) миграционного воздушного показателя, характеризующего переход вещества из почвы в атмосферный воздух, г) общесанитарного показателя, характеризующего влияние поллютанта на самоочищающую способность почвы и ее биологическую актив-

ность. Тот показатель вредности, который имеет наименьшую пороговую величину, избирается в качестве лимитирующего и принимается за ПДК данного химического элемента (вещества). При установлении для каждого показателя вредности лимитирующей величины обычно исходят из того, что при таком ее значении концентрации какого-либо поллютанта при переходе его из почвы в другой компонент окружающей среды (в растения, воздух, воду) не достигнут в нем уровней, превышающих гигиенический норматив, установленный, соответственно, для сельскохозяйственных растений, природных вод, атмосферного воздуха.

Таблица 5

**Классификация химических веществ для контроля загрязнения \***

Класс опасности	Химический элемент
I	As, Cd, Hg, Pb, Se, Zn, F
II	B, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr
III	Ba, V, W, Mn, Sr

\* ГОСТ 17.4.1.02-83 «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения».

Таблица 6

**Класс опасности химических веществ в почве, определяемый по индексу опасности [22]**

Значение индекса	Класс опасности	Характер опасности
4,1 и более	I	Высоко опасны
От 2,6 до 4	II	Опасны
От 0,1 до 2,5	III	Мало опасны
Менее 0,1	IV	Не опасны

Примечание. Формула расчета класса опасности: Индекс опасности =  $\lg(A \times S) / (\alpha \times M \times \text{ПДК})$ , где A – атомный вес соответствующего элемента; M – молекулярная масса химического соединения, в которое входит данный элемент; S – растворимость в воде химического соединения (мг/л);  $\alpha$  – среднее арифметическое из шести ПДК химических веществ в разных пищевых продуктах (мясо, рыба, молоко, хлеб, овощи, фрукты); ПДК – предельно допустимая концентрация элемента в почве, мг/кг.

В России существуют ПДК для валовых содержаний и подвижных форм некоторых химических элементов и их неорганических соединений (табл. 7). Хорошо известно, что реальный уровень ПДК многих химических элементов в существенной степени зависит от физико-химических свойств конкретных типов почв.

В определенной степени такой подход положен в разработку ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических элементов в почвах с различными физико-химическими свойствами, утвержденных Госсанэпиднадзором России (табл. 8).

Нормативно-методические основы осуществления в России государственного санитарно-эпидемиологического надзора за санитарным состоянием почв населенных пунктов изложены в методических указаниях [5]. Согласно этому документу, санитарное состояние почвы представляет собой совокупность физико-химических и биологических свойств почвы, определяющих качество и степень ее безопасности в эпидемическом и гигиеническом отношениях.

**Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических элементов в почве,  
утвержденные Минздравом СССР, № 6229-91 (СанПин 2.1.7.573-96)**

Элемент	ПДК, мг/кг	Лимитирующий показатель вредности
Ванадий	150	Общесанитарный Общесанитарный Транслокационный Транслокационный Транслокационный Общесанитарный Транслокационный Воздушно-миграционный Водно-миграционный Водно-миграционный Общесанитарный
Ванадий + марганец	100+1000	
Мышьяк	2,0	
Никель *	35,0	
Ртуть	2,1	
Свинец	32,0	
Свинец + ртуть	120 + 1	
Сурьма	4,5	
Нитраты x	130	
Хлористый калий (K <sub>2</sub> O) **	560	
Элементарная сера ***	160	
Кобальт ***	Подвижная форма 5	
Марганец, извлекаемый 0,1н Н <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : черноземы дерново-подзолистые: рН 4,0 рН 5,1-6,0 рН > 6,0	700 300 400 500	
Марганец, извлекаемый аммонийным буфером, рН 4,8: черноземы дерново-подзолистые: рН 4,0 рН 5,1-6,0 рН > 6,0 ****	140 60 80 100	Общесанитарный Общесанитарный Общесанитарный Общесанитарный
Медь	3	Общесанитарный

Элемент	ПДК, мг/кг	Лимитирующий показатель вредности
Никель ****	4	Общесанитарный
Свинец ****	6	Общесанитарный
Цинк ****	23	Транслокационный
Фтор ****	2	Транслокационный
Хром ****	6	Общесанитарный
Хром **** (водорастворимый)	10	Транслокационный
Хром (шестивалентный)*****	0,05	Общесанитарный

\* Приказ Минздрава СССР № 3210-85 от 1.02.85 г.; \*\* Приведено по [22]; \*\*\* Подвижная форма Со извлекается из почвы ацетатно-натриевым буферным раствором с рН 5,5 для сероземов и ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8 для остальных типов почв; \*\*\*\* Подвижная форма извлекается из почвы ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8; \*\*\*\*\* Подвижная форма фтора извлекается из почвы с рН 6,5-0,03 м К<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>; \*\*\*\*\* Приказ Минздрава СССР № 2264-80 от 30.10.80 г.

Таблица 8

### Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических элементов в почвах с различными физико-химическими свойствами (ГН 2.1.7.020-94)

Элемент	ОДК, мг/кг	Лимитирующий показатель вредности
	Валовое содержание	
Никель:		
песчаные и супесчаные	20,0	Общесанитарный
кислые суглинистые и глинистые:		
с рН < 5,5	40,0	Общесанитарный
с рН > 5,5	80,0	Общесанитарный
Медь:		
песчаные и супесчаные	33,0	Общесанитарный
кислые суглинистые и глинистые:		
с рН < 5,5	66,0	Общесанитарный
с рН > 5,5	132,0	Общесанитарный

Элемент	ОДК, мг/кг	Лимитирующий показатель вредности
<p><b>Цинк:</b> песчаные и супесчаные кислые сульфидные и глинистые: с рН &lt; 5,5 с рН &gt; 5,5</p>	55,0	Транслокационный
<p><b>Мышьяк:</b> песчаные и супесчаные кислые сульфидные и глинистые: с рН &lt; 5,5 с рН &gt; 5,5</p>	2,0	Транслокационный
<p><b>Кадмий:</b> песчаные и супесчаные кислые сульфидные и глинистые: с рН &lt; 5,5 с рН &gt; 5,5</p>	5,0 10,0	Транслокационный Транслокационный
<p><b>Свинец:</b> песчаные и супесчаные кислые сульфидные и глинистые: с рН &lt; 5,5 с рН &gt; 5,5</p>	0,5 1,0 2,0	Транслокационный Транслокационный Транслокационный
<p><b>Общесанитарный</b> Общесанитарный Общесанитарный</p>	32,0 65,0 130,0	Общесанитарный Общесанитарный Общесанитарный

Гигиеническая оценка качества почвы проводится по показателям их химического и биологического загрязнения. Под химическим загрязнением почвы понимается изменение ее химического состава, возникшее под прямым или косвенным воздействием фактора землепользования (промышленного, сельскохозяйственного, коммунального), вызывающего снижение ее качества и возможную опасность для здоровья населения. Основными критериями гигиенической оценки химического загрязнения почв являются ПДК и ОДК химических веществ. В свою очередь, ПДК химических веществ в почве представляет собой комплексный показатель безвредного для человека содержания этого вещества, так как используемые при ее обосновании ( $t$ ,  $e$ , ПДК) критерии отражают возможные пути воздействия поллютанта на контактирующие среды, биологическую активность почвы и процессы ее самоочищения.

Гигиеническая оценка качества почв населенных мест проводится по каждому веществу с учетом следующих основных положений:

- опасность загрязнения тем выше, чем больше фактическое содержание поллютанта ( $C$ ) превышает его ПДК, что может быть выражено значением коэффициента  $K_0$  (коэффициента опасности) =  $C / \text{ПДК}$ , т. е. опасность загрязнения тем выше, чем больше  $K_0$  превышает единицу;

- опасность загрязнения тем больше, чем выше класс опасности поллютанта, его персистентность, растворимость в воде и подвижность в почве и чем больше мощность загрязненного слоя;

- опасность загрязнения тем выше, чем меньше буферная способность почвы ( $t$ ,  $e$ , чем ниже содержание гумуса, рН почвы, легче механический состав, тем опаснее ее загрязнение химическими веществами).

При загрязнении почвы одним веществом неорганической природы оценка степени загрязнения проводится в соответствии с табл. 9 с учетом класса опасности поллютанта, его ПДК и максимального значения допустимого уровня содержания элемента ( $K_{\max}$ ) по одному из установленных для него четырех показателей вредности. Значения этих показателей вредности приведены в табл. 10. Приведенная выше (в табл. 3) шкала опасности загрязнения почв населенных пунктов вошла в «Методические указания» [5]. Согласно этому документу, коэффициент концентрации ( $K_C$ ) и суммарный показатель загрязнения ( $Z_C$ ) используются для оценки уровня химического загрязнения почв населенных мест как индикатора неблагоприятного воздействия на здоровье населения.

Таблица 9

**Критерии оценки загрязнения почв неорганическими веществами [5]**

Содержание в почве	Категория загрязнения почвы		
	1-й	2-й	4-й
Класс опасности вещества	1-й	2-й	4-й
$> K_{\max}$	Очень сильная*	Очень сильная	Сильная
От ПДК до $K_{\max}$	Очень сильная*	Сильная	Средняя
От 2 фоновых значений до ПДК	Слабая	Слабая	Слабая

\* Так приведено в документе, хотя в одном случае, видимо, вернее говорить о «сильном» загрязнении, в другом об «очень сильном» загрязнении.

ПДК химических элементов в почве и предельные уровни содержания их по показателям вредности [5]

Вещество	Форма нахождения	ПДК, мг/кг	Значения показателей вредности (К1-К4), мг/кг				Класс опасности
			Транслокационный, К1	Миграционный		Общесанитарный, К4	
				водный, К2	воздушный, К3		
Медь	Извлекаемая ацетатно-аммонийным буфером, рН 4,8	3	3,5	-	3	2	
Хром	То же	6	6	6	6	2	
Никель	То же	4	6,7	-	4	2	
Цинк	То же	23	23	-	37	1	
Марганец, чернозем	То же	140	320	-	140	3	
Марганец, дерново- подзолистая, рН 4	То же	60	220	-	60	3	
Марганец, то же, рН 1,4-5,6	То же	80	220	-	80	3	
Марганец, то же, рН > 6	То же	100	-	-	100	3	
Марганец, чернозем	Извлекаемый 0,1 н H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	700	1600	-	700	3	
Марганец, дерновоподзолистая, рН 4	То же	300	1100	-	300	3	
Марганец, то же, рН 5,1-6	То же	400	1100	-	400	3	
Марганец, то же, рН > 6	То же	500	1100	-	500	3	
Кобальт	Аммонийно-ацетатный буфер рН 3,5 (сероземь) и 4,7 (дерново-подзолистые) Водорастворимый	5	25	-	5	2	
Фтор	Вал	10	10	-	10	1	
Сурьма	Вал	4,5	4,5	-	4,5	2	
Марганец	Вал	1500	3500	-	1500	3	
Ванадий	Вал	150	170	-	150	3	

Вещество	Форма нахождения	ГДК, мг/кг	Значения показателей вредности (К1-К4), мг/кг				Класс опасности
			Транслокационный, К1	Миграционный		Общесанитарный, К4	
				водный, К2	воздушный, К3		
Марганец+ванадий	Вал	1000+100	1500+150	2000+200	-	1000+100	3
Свинец	Вал	32	35	260	-	32	1
Мышьак	Вал	2	2	15	-	10	1
Ртуть	Вал	2,1	2,1	33,3	2,5	5	1
Свинец+ртуть	Вал	20+1	20+1	30+2	-	30+2	1
Хлористый калий	Вал	560	1000	560	1000	5000	3
Нитраты	Вал	130	180	130	-	225	2

Значения  $K_c$  определяются отношением фактического содержания данного вещества в почве к региональному фону. Особо отмечается, что оценка степени опасности загрязнения почв по показателю  $Z_c$  отражает дифференциацию загрязнения воздушного бассейна городов как металлами, так и другими наиболее распространенными ингредиентами (пыль, оксид углерода, оксиды азота, сернистый ангидрид). Химико-аналитическое определение химических элементов при оценке уровня загрязнения почв населенных пунктов по значениям показателя  $Z_c$  осуществляется методом эмиссионного анализа. В «Методических указаниях» подчеркивается, что анализ распределения геохимических показателей, полученных в результате проведения геохимической съемки по регулярной сети (геохимического картирования), дает пространственную структуру загрязнения сельтебных территорий и воздушного бассейна, а также позволяет выделить зоны риска для здоровья населения. Здесь следует отметить, что, возможно, в качестве еще одной оценочной величины может использоваться показатель санитарно-токсикологической вредности  $Z_{ст}$ , представляющий собой сумму коэффициентов концентрации  $K_c$  (за вычетом фона) химических элементов 1-го и 2-го классов опасности и характеризующий степень потенциальной токсикологической опасности соответствующего уровня загрязнения почв. Он рассчитывается по той же формуле, что и  $Z_c$ .

Справедливо отмечается [14], что существующие ПДК нуждаются в корректировке, обусловленной, например, выраженной пестротой почвенного покрова, включая наличие почв, в неодинаковой степени способных к инактивации тяжелых металлов и различающихся по естественному содержанию последних.

### **Оценка состояния почв в некоторых зарубежных странах**

Во многих западноевропейских странах в настоящее время используется трех уровневая система нормативов предельно допустимых концентраций химических элементов и их соединений в почвах (прежде всего, в почвах городов и промышленных территорий) с соответствующими каждому уровню правовыми требованиями в отношении ограничения объема эмиссий, видов землепользования и необходимости проведения работ по ремедиации и восстановлению загрязненных территорий, часто с дифференцированием методов очистки по срокам достижения необходимого результата (необходимого, целевого содержания химических элементов), в качестве которого рассматривается так называемая *target value*, т. е. «конечное, требуемое значение» концентрации данного поллютанта, достижение которой является целью ремедиации и которая в сущности представляет собой ПДК. В свое время такой подход к оценке загрязнения почв был принят в Нидерландах – так называемый голландский список (табл. 11).

В общем случае используемый подход означает, что концентрация любого поллютанта, присутствующего в почве участка, отнесенного к загрязненным, сравнивается с нормативами голландского списка (*Dutch standards*) и в конечном счете должна стать меньше голландской величины *A* (*Dutch A value*; в ходе проведения работ по ремедиации почв должны быть достигнуты такие концентрации поллютантов, которые могут превышать *target value*, т. е. «целевые, требуемые» уровни содержания, при которых почва считается незагрязненной). Очистка или изоляция загрязненных почв осуществляется в тех случаях, когда концентрация поллютанта превышает голландскую величину *C* (*Dutch C value*; так называемое *intervantion value*, т. е. концентрация поллютанта, которая требует

вмешательства, проведения соответствующих ремедиационных работ). Последний норматив базируется на токсикологических и экотоксикологических предельных значениях концентраций поллютантов, учитывающих возможные риски для человека и экосистем, Так называемый средний уровень (middle value) содержания поллютанта определяется как ½ суммы target value и intervention value и является значением, указывающим на необходимость проведения дальнейших уточняющих исследований.

Таблица 11

**Стандарты содержания химических элементов в почвах, установленные в Нидерландах:**  
**A - концентрации, свидетельствующие о возможной незагрязненности почв;**  
**B - концентрации, указывающие на необходимость дальнейших исследований;**  
**C - концентрации, при которых необходима очистка территории [51]**

Элемент	Концентрация в почвах, мг/кг сухой массы		
	A	B	C
Хром	100	250	800
Кобальт	20	50	300
Никель	50	100	500
Медь	50	100	500
Цинк	200	500	3000
Мышьяк	20	30	50
Молибден	10	40	200
Кадмий	1	5	20
Олово	20	50	300
Барий	200	400	2000
Ртуть	0,5	2	10
Свинец	50	150	600
Фтор	200	400	2000
Сера (общая)	2	20	200
Бром (общий)	20	50	300

Безопасные концентрации (target value) являются базовыми значениями, при которых химические элементы (это либо точно известно, либо предполагается) не влияют на природные свойства почвы. Опасные концентрации (intervention value) представляют собой максимальный уровень содержания данного элемента, при превышении которого требуется санация почв, поскольку возникает угроза для человека или экосистемы в целом. Такие работы осуществляются в тех случаях, если концентрации хотя бы одного химического элемента, равные или превышающие этот уровень (intervention value), обнаружены в объеме почвы, больше чем 25 м³.

Значения концентраций, приведенные в табл. 12, определены для так называемой стандартной почвы, т. е. почвы, содержащей 10% органического вещества и 25% глины. Хорошо известно, что реальные концентрации тяжелых металлов (включая As) в почве изменяются в зависимости от содержания в ней глинистых и(или) органических веществ, поэтому в каждом конкретном случае проводится специальная коррекция почвенного типа по следующей формуле:

$$I_b = I_{st} \times \frac{A + (B \times \%_{\text{гл}}) + (C \times \%_{\text{орг}})}{A + (B \times 25) + (C \times 10)}, \text{ где}$$

ІЬ – опасная концентрация в релевантной почве (мг/кг); Іst - опасная концентрация в стандартной почве (мг/кг); %гл – процентное содержание глины в релевантной почве; %орг – процентное содержание органического вещества в релевантной почве, которое составляет минимум 2% и максимум 30%; А, В, С – константы, зависящие от свойств исследуемого химического элемента и приведенные в табл. 13. Скорректированная таким способом величина концентрации данного поллютанта, учитывающая физико-химические особенности почвы, используется для соответствующей оценки ее состояния с целью определения необходимых действий (например, проведения дополнительных исследований или осуществления деконтаминационных работ).

Таблица 12

**Нормативы содержаний химических элементов в почвах, принятые в Нидерландах, мг/кг сухой массы**

Элемент	(Dutch C value) The intervention vullue, т. е. концентрации, при которых необходимо проведение деконтаминации почв *	(Dutch B value) The middle value, т. е. концентрации, которые указывают на необходимость дальней- ших исследований**	(Dutch A value) The target value, т. е. «целевые или конечные» концентрации, которые должны быть достигнуты в ходе ремедиации почв***
Cr	380	240	100
Co	240	130	20
Ni	210	122,5	35
Cu	190	113	36
Zn	720	430	140
As	55	42	29
Mo	200	105	10
Cd	12	6,4	0,8
Ba	625	412,5	200
Hg	10	5,15	0,3
Pb	530	307,5	85

\* Далее условно названы «опасными концентрациями»; \*\* «контрольные концентрации»; \*\*\* «безопасные концентрации».

Таблица 13

**Значения констант для различных химических элементов**

Элемент	A	B	C
Хром	50	2	0
Кобальт	2	0,28	0
Никель	10	1	0
Медь	15	0,6	0,6
Цинк	50	3	1,5
Мышьяк	15	0,4	0,4
Молибден	1	0	0
Кадмий	0,4	0,007	0,021
Барий	30	5	0
Ртуть	0,2	0,0034	0,0017
Свинец	50	1	1

**Предварительные уровни предельных концентрация химических элементов  
в почвах, Великобритания, мг/кг воздушно-сухой массы [53]**

Элемент	Садовые участки, земельные участки	Парки, игровые площадки, открытые места
Хром (шестивалентный)*	25	–
Хром (общий)	600	1000
Мышьяк	10	40
Селен	3	6
Кадмий	3	15
Ртуть	1	20
Свинец	500	2000
Бор (водорастворимый) ***		3 **
Медь ****		130**
Никель ****		70 **
Цинк ****		300 **

\* Экстракция 0,1 м НСl при 37°C; \*\* поллютанты, которые фитотоксичны; нормативы применяются на почвах, где произрастают растения; \*\*\* экстракция горячей водой; \*\*\*\* вал, извлекаемый HNO<sub>3</sub>/НСlO<sub>4</sub>.

Таблица 15

**Гигиенические нормативы содержания химических элементов в почвах  
(Министерство окружающей среды провинции Онтарио, Канада, 1986) [53]**

Элемент	Верхний допустимый предел, мг/кг
B	15
Cr	50
Co	25
Ni	60
Cu	100
Zn	500
As	20
Cd	4
Hg	0,5
Pb	500

Не исключено, что подобный подход к оценке степени и масштабов техногенного загрязнения и опасности почв с целью определения необходимости осуществления обязательных работ по их ремедиации и восстановлению должен внедряться и в нашей стране.

В ряде зарубежных стран существуют национальные нормативы содержания химических элементов в почвах, учитывающих, в том числе, функциональные особенности территорий (табл. 14, 15).

**Типизация почв по интенсивности химического загрязнения**

Особый интерес представляют попытки типизации (скорее даже градации) почв по интенсивности их химического загрязнения. В нашей стране подобная градация интенсивности химического загрязнения почв (в том числе сельскохозяйственных) нередко основывается на концентрациях в них

поллютантов, кратных существующим ПДК. Например, такой принцип оценки уровня загрязнения почв декларируется в «Методических рекомендациях по выявлению деградированных и загрязненных земель», утвержденных в 1995 г, Роскомземом (совместно с Минприроды РФ, Минсельхозпродом РФ и при согласовании с РАСХН) (табл. 16). Представляется, что подобный подход выглядит несколько странным, поскольку ПДК (предельно допустимая концентрация) представляет собой утверждённый в законодательном порядке норматив (предельное содержание, которое априори не должно превышать, поскольку превышение этого норматива является нарушением закона).

В Великобритании в середине 1990-х гг. была предложена следующая классификация загрязненных почв (табл. 17), в которой класс 1 – уровни содержания поллютантов меньше, чем предельно допустимые концентрации, установленный директивой 80/778/ЕЕС; класс 2 – содержания меньше, чем значения, установленные директивой 75/440/ЕЕС, класс 3 – содержания меньше или равны 4-кратному значению для класса 2, класс 4 – содержания более чем в 4 раза превышают значения для класса 2.

В табл. 18 приведена шкала нормирования валовых содержаний тяжелых металлов для геохимической ассоциации лесных почв со слабокислой и кислой реакцией, а в табл. 19 – разработанная (для территории Польши) классификация почв, загрязненных наиболее опасными (с экологической точки зрения) тяжелыми металлами, в которой класс загрязнения соотносится с гранулометрическим составом и щелочно-кислотными условиями почв, а также их обогащенностью органическим веществом.

Накопленный экспериментальный материал, как считают авторы [41], позволяет определить оптимальные показатели качества городских почв (табл. 20). Если состояние почв городов существенно отличается от отмеченных в указанной таблице параметров, то необходимо проведение ремедиации.

### **Свойства почв и их влияние на уровень предельно допустимых концентраций**

Хорошо известно, что основными факторами, влияющими на уровень предельно допустимых концентраций тяжелых металлов и других химических элементов в почвах, являются гранулометрический состав последних, их щелочно-кислотные свойства и содержание гумуса (органического вещества). Эти параметры во многом определяют устойчивость почв к загрязнению различными поллютантами (табл. 21). Например, для кадмия и свинца, как установлено Н.Г. Зариным и А.И. Обуховым, зависимость между рН почв и значениями предельно допустимых концентраций почти линейная, т. е. в кислых и щелочных почвах опасные уровни этих химических элементов могут отличаться почти на порядок. Поэтому, как справедливо отметили А.И. Перельман и Н.С. Касимов [27], предельно допустимые концентрации химических элементов необходимо устанавливать для крупных почвенно-геохимических регионов и геохимических ассоциаций почв со сходными щелочно-кислотными и окислительно-восстановительными условиями, обладающими близким уровнем устойчивости к загрязняющим веществам (табл. 22).

С точки зрения специфики воздействия на почвы, все поступающие в них поллютанты М.А. Глазовская разделяет на две главные группы [8]: вещества педохимически активные и вещества биохимически активные.

Показатели уровня загрязнения земель химическими элементами [19]

Элемент	Содержание, соответствующее уровню загрязнения, мг/кг				
	1 уровень, допустимый	2 уровень, низкий	3 уровень, средний	4 уровень, высокий	5 уровень, очень высокий
Кадмий	< ПДК *	от ПДК до 3	от 3 до 5	от 5 до 20	> 20
Свинец	< ПДК	от ПДК до 125	от 125 до 250	от 250 до 600	> 600
Ртуть	< ПДК	от ПДК до 3	от 3 до 5	от 5 до 10	> 10
Мышьяк	< ПДК	от ПДК до 20	от 20 до 30	от 30 до 50	> 50
Цинк	< ПДК	от ПДК до 500	от 500 до 1500	от 1500 до 3000	> 3000
Медь	< ПДК	от ПДК до 200	от 200 до 300	от 300 до 500	> 500
Кобальт	< ПДК	от ПДК до 50	от 50 до 150	от 150 до 350	> 350
Никель	< ПДК	от ПДК до 150	от 150 до 300	от 300 до 500	> 500
Молибден	< ПДК	от ПДК до 40	от 40 до 100	от 100 до 200	> 200
Олово	< ПДК	от ПДК до 20	от 20 до 50	от 50 до 300	> 300
Барий	< ПДК	от ПДК до 200	от 200 до 400	от 400 до 2000	> 2000
Хром	< ПДК	от ПДК до 250	от 250 до 500	от 500 до 800	> 800
Ванадий	< ПДК	от ПДК до 225	от 225 до 300	от 300 до 350	> 350
Фтор водорастворимый	< ПДК	от ПДК до 15	от 15 до 25	от 25 до 50	> 50

\* ПДК или ОДК; если ПДК (ОДК) отсутствуют, то за норматив принимается удвоенное региональное фоновое содержание элементов в незагрязненной почве.

Классификация почв по уровням содержания в них поллютантов [46] \*

Группа поллютантов	Класс		2	3	4
	Состояние (качество)	1			
Токсичные металлы	As	Хорошее < 10	Удовлетворительное 10-40	Загрязненные 40-100	Очень загрязненные > 100
	Cd	< 3	3-15	15-50	> 50
	Cr	< 600	600-1000	1000-2000	> 2500
	Cr <sup>6+</sup>	< 25	-	-	> -
	Se	< 3	3-6	6-50	> 50
	Pb	< 500	500-2000	2000-10000	> 10000
Фитотоксичные металлы	Hg	< 1	1-20	20-50	> 50
	Ni	< 70	70-500	500-1000	> 1000
	B	< 3	3-50	50-250	> 250
	Cu	< 130	130-500	500-2500	> 2500
	Zn	< 300	300-1500	1500-5000	> 5000
Цианиды	Общие цианиды	< 25	25-100	100-500	> 500
	Свободные цианиды	< 25	25-100	100-500	> 500
Органические	Фенолы (общие)	< 5	5-200	200-1000	> 1000
	Фенолы (одноатомные)	< 5	5-200	200-1000	> 1000
	Угльные смолы	< 500	500-1000	1000-10000	> 10000
	Минеральная нефть	< 100	100-1000	1000-5000	> 5000
Разные	Сульфаты	< 2000	2000-10000	10000-50000	> 50000
	Сульфиды	< 250	?	250-1000	> 1000
	Хлориды	< 100	> 100	-	-
	pH	7,8	4-5; 9-10	3; 11	1-2; 12; 13-14

\* Все результаты даны в мг/кг.

Шкала экологического нормирования валовых содержаний тяжелых металлов для геохимической ассоциации почв со слабкокислой и кислой реакцией [23]

Градации	Концентрация, мг/кг воздушно-сухой массы					
	Ni	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb
Очень низкий	<10	<5	<15	<0,05	<0,05	<
Низкий	10-20	5-15	15-30	0,05-0,10	0,05-0,10	5-10
Средний	20-50	15-50	30-70	0,10-0,25	0,10-0,25	10-35
Повышенный	50-70	50-80	70-100	0,25-0,50	0,25-0,50	35-70
Высокий	70-100	80-100	100-150	0,50-1,00	0,50-1,00	70-100
Очень высокий	100-150	100-150	150-200	1-2	1-2	100-150
Низкий (ПДК)	100-150	100-150	Уровень загрязнения	1-2	1-2	100-150
Средний	150-300	150-250	150-200	2-5	2-5	150-500
Высокий	300-600	250-500	200-500	5-10	5-10	500-1000
Очень высокий	>600	>500	>1000	>10	>10	>1000

Таблица 19

## Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами [48]

Металл	Группа почв *	Классы загрязнения (содержание в верхнем слое почв, мг/кг) **					
		0	I	II	III	IV	V
Кадмий	A	0,3	1	2	3	5	> 5
	B	0,5	1,5	3	5	10	> 10
	C	1	3	5	10	20	> 20
Медь	A	15	30	50	80	300	> 300
	B	25	50	80	100	500	> 500
	C	40	70	100	150	750	> 750
Никель	A	10	30	50	100	400	> 400
	B	25	50	75	150	600	> 600
	C	50	75	100	300	1000	> 1000
Свинец	A	30	70	100	500	2500	> 2500
	B	50	100	250	1000	5000	> 5000
	C	70	200	500	2000	7000	> 7000
Цинк	A	50	100	300	700	3000	> 3000
	B	70	200	500	1500	5000	> 5000
	C	100	300	1000	3000	8000	> 8000

\* Группы почв: А – легкие и средние, рН < 5,5; В – средние и тяжелые, рН < 5,5; С – тяжелые богатые органическим веществом, рН 5,5–6,5; классы загрязнения: 0 – незагрязненные, I – слабо загрязненные, II – умеренно загрязненные, III – значительно загрязненные, IV – сильно загрязненные, V – экстремально загрязненные.

Оптимальные показатели экологического состояния городских почв [41]

Показатель (единица измерения)	Величина показателя и шкала оценки	Влияние на плодородие почв, растительность и здоровье человека
Плотность почвы ( $г/см^3$ ), градации для верхнего 0-10 см слоя	0,9-1,2 (норма)	Растения чувствуют себя нормально
	1,2-1,4 (слабо уплотненная почва)	Большая часть растений не реагирует
Влажность почвы (W%), 0-30 см – газон; 0-100 см для деревьев, для корнеобитаемого слоя	1,4-1,5 (средне уплотненная почва)	Начиная с плотности 1,4, растения испытывают угнетение
	1,5-1,6 (сильно уплотненная почва)	Угнетение сильное
	> 1,6 (переуплотненная почва)	Почва полностью непригодна для растений, и без рыхления они обречены на гибель
Степень насыщенности почвы влагой (W/Ws), Показатель позволяет оценивать недостаток влаги и недостаток воздуха, 0-30 см – газон, 0-100 см для деревьев, для корнеобитаемого слоя	12-30%	Нормальное состояние растений
	12-10%	Влажность начала завядания (потери тургора), после полива растения реагируют
	10-4%	Величина устойчивого завядания (гибели растений)
	0,4-0,8	Норма
	0,2-0,3	Угнетение роста растений из-за недостатка влаги
Электропроводность порового раствора (Ес, дСм/м), 0-30 см – газон, 0-100 см для деревьев, для корнеобитаемого слоя	< 0,2	Практически недоступная влага, отмирание растений
	> 0,9	Переувлажненные почвы, анаэробоз, угнетение и гибель растений из-за недостатка воздуха
	< 2 (незасоленные)	Растения развиваются нормально
раствора (Ес, дСм/м), 0-30 см – газон, 0-100 см для деревьев, для корнеобитаемого слоя	2-4 (очень слабо засоленные)	Наступает угнетение роста чувствительных к засолению растений: бобовых, зонтичных, луковичных, плодовых деревьев и кустарников, роз, ягодных орешника
	4-8 (слабо засоленные)	Происходит сильное угнетение и гибель некоторых растений, снижение продуктивности на 50%, иссушение почвы посредством испарения приводит к концентрации солей и росту Ес
	8-16 (средне засоленные)	На 70% снижается продуктивность растений
	16-32 (сильно засоленные)	Гибель всех растений
	> 32 (очень сильно засоленные)	Непригодные

Показатель (единица измерения)	Величина показателя и шкала оценки	Влияние на плодородие почв, растительность и здоровье человека
Эмиссия диоксида углерода с поверхности почвы (Э, мг/м <sup>2</sup> /час)	400–600 (норма летом)	При достаточном увлажнении почвенная биота нормально функционирует
	100–200, норма осенью < 100	Почвенная биота нормально функционирует
Дыхание почвы (поглощение кислорода, Д, мг/кг/час), 0–30 см – газон, 0–100 см для деревьев, для корнеобитаемого слоя	0–2 (очень низкий уровень активности)	Угнетение почвенной биоты
	2–4 (низкий уровень)	В почве сильное загрязнение ТМ, органическим веществом, засоление или отсутствие гумуса
	4–8 (норма)	В почве присутствуют факторы, снижающие активность микрофлоры (загрязнение, засоление, малое количество органики)
	> 8 (высокая активность)	Нормальное состояние почв
Показатель актуальной кислотности (рН) почвенной среды, 0–30 см – газон, 0–100 см для деревьев, для корнеобитаемого слоя	< 4, > 8	Наличие в почве свежего субстрата, высокая концентрация ферментов
	4,5–5,5	Почвы непригодные и сильно токсичные
	5,5–6,5; 7,0–7,5	Малопригодные и слаботоксичные почвы
	6,5–7,0	Потенциально плодородные почвы
	8,0–8,5	Пригодные и плодородные почвы
	< 1 (высокая)	Среднепригодные и средне-токсичные почвы
Наличие азот фиксирующих бактерий (в млн, кл/мл)	1–0,1 (средняя)	Пригодные, плодородные почвы
	> 0,1 (низкая)	Плохо пригодные почвы
Наличие денитрифицирующих бактерий (в млн, кл/мл)	< 1 (высокая)	Непригодные, неплодородные почвы
	1–0,5 (средняя)	Не-токсичные
	> 0,5 (низкая)	Слабо токсичные
		Токсичные

**Относительная опасность загрязнения подвижными биохимически активными элементами субарзальных почв [6]**

К <sub>п</sub> и преобладающий тип водного режима	Гранулометрический состав и наличие мерзлоты			
	пески и супеси	суглинки	глины	различного состава с мерзлотой
> 2, резко промывной	+	++	+++	+++
2-1, преимущественно промывной	++	+++	++++	++++
1-0.5, непромывной	+++	++++	+++++	+++++
<0.5, резко непромывной	++++	+++++	+++++	-

Примечание. К<sub>п</sub> – коэффициент увлажнения (отношение годовой нормы осадков к испарению); опасность загрязнения: + – очень слабая, ++ – слабая, +++ – умеренная, ++++ – сильная, +++++ – очень сильная,

**Основные геохимические ассоциации почв [8]**

Реакция почв	Окислительно-восстановительные условия в почвах		
	окислительные	окислительно-восстановительные	восстановительные
Кислая по всему профилю	Субарзальные кислые	Оглеенные кислые	Глеевые кислые
Кислая в верхней и слабощелочная в нижней частях профиля	Субарзальные кислотно-щелочные	Оглеенные кислотно-щелочные	Глеевые кислотно-щелочные
Нейтральная в верхней и щелочная в нижней частях профиля	Субарзальные нейтрально-щелочные	Оглеенные нейтрально-щелочные	Глеевые нейтрально-щелочные
Щелочная по всему профилю	Субарзальные щелочные	Оглеенные щелочные	Глеевые щелочные

Педохимически активные вещества (щелочи, минеральные кислоты, физиологически кислые соли, некоторые газы), как правило, преобладающие в промышленных выбросах по массе, изменяют кислотно-щелочные или окислительно-восстановительные условия в почвах. Биохимически активные вещества (прежде всего, тяжелые металлы, радонуклиды, тяжелые углеводороды, многие другие органические соединения, особенно ксенобиотики) действуют на живые организмы, при этом общее изменение почвенно-геохимической обстановки наступает не сразу, а как следствие нарушения процессов нормального функционирования почвенной биоты. М.А. Глазовская [9] при разработке классификации почв по устойчивости к техногенным влияниям, в частности к действию кислотных выпадений, использует два понятия: буферность почв, т. е. их способность противостоять понижению значений рН при воздействии кислот, и устойчивость почв – способность почв при понижении значений рН противостоять до определенных пределов разрушению почвенного поглощающего комплекса, диспергации коллоидов и суспензий и их выносу за пределы профиля, появлению в почвенном растворе токсичных соединений тяжелых металлов, других химических элементов и их соединений. Буферное действие почв является весьма существенным фактором для нейтрализации или иммобилизации поступающих в нее кислот и тяжелых металлов [15–17, 52]. В общем случае буферная способность почвы представляет собой ее сопротивляемость изменению рН при действии кислоты или основания. При добавлении к нейтральной почве возрастающих количеств кислоты или основания значения рН изменяются постепенно, тогда как значения рН чистой воды в подобном эксперименте изменяются резко. Почва является буферной средой, поскольку противостоит резким изменениям рН. Буферная способность почвы зависит от свойств поглощающего комплекса: глинисто-гумусовые почвы с высокой обменной емкостью обладают высокой буферностью, песчаные почвы с низкой обменной емкостью, напротив, малобуферны [18]. Она также обусловлена поглощением поступающих в почвы ионов  $H^+$  или  $OH^-$  с образованием слабо ионизированных комплексов, в результате чего значения рН изменяются незначительно. Считается, что при извлечении металлов из почвенного раствора растениями или нисходящим водным потоком потери их восполняются из запаса в составе твердых фаз. При избыточном поступлении химического элемента в почву в растворенном состоянии он может из почвенного раствора переходить в состав твердых фаз, увеличивая пул его подвижных соединений. Таким образом почва проявляет буферную способность по отношению к поллютантам, стремясь поддерживать их концентрацию в почвенном растворе на постоянном уровне.

Буферная способность почв по отношению к воздействию техногенных потоков вещества непосредственно зависит от совокупности процессов, выводящих избыточные деструкционно активные продукты техногенеза из биологического круговорота [8]: 1) процессов вымывания токсичных веществ за пределы почвенного профиля, 2) процессов консервации токсичных веществ на геохимических барьерах в недоступных для живых организмов формах, 3) процессов разложения токсичных соединений до форм, не опасных для живых организмов. Как правило, часть (иногда существенная) химических элементов и веществ, поступающих на поверхность почв с техногенными потоками, задерживается в верхнем почвенном горизонте. Характер проявления этого процесса зависит от содержания и свойств гумуса, кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий, интенсивности биопоглощения и сорбционной способности почвенной матри-

цы. Другая часть химических элементов проникает внутрь почвенной толщи при нисходящем токе почвенной влаги, а также за счет перемешивающей деятельности почвенной фауны. В пределах почвенного профиля техногенный поток веществ встречает еще ряд почвенно-геохимических барьеров: иллювиально-железисто-гумусовые, иллювиальные кольматированные, карбонатные, гипсовые, солонцовые, глеевые горизонты [7, 8].

Основными факторами, влияющими на поведение и экологотоксикологическую значимость тяжелых металлов в почвах, являются щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные свойства и содержание гумуса, во многом определяющие устойчивость почв к техногенному загрязнению (табл. 23).

В.Б. Илькиным [15, 16] предложена шкала буферности почв к тяжелым металлам, включающая 6 градаций (табл. 24). На основе этой шкалы, по мнению автора цитируемых работ, осуществляют оценку гигиенически приемлемого количества поллютантов в сельскохозяйственных почвах.

Таблица 23

**Подвижность биохимически активных микроэлементов в различных ассоциациях субэзаральных почв [6]**

Геохимическая ассоциация почв	Подвижность элементов		
	практически неподвижные	слабоподвижные	подвижные
Кислые, pH < 5,5	Mo <sup>4</sup>	Pb <sup>2-4</sup> , Cr <sup>3-6</sup> , Ni <sup>2-3</sup> , V <sup>4-5</sup> , As <sup>3</sup> , Se <sup>3</sup>	Sr, Ba, Cu, Zn, Cd, Hg, S <sup>6</sup>
Слабокислые и нейтральные, pH 5,5–7,5	Pb	Sr, Ba, Cu, Cd, Cr <sup>3-6</sup> , Ni <sup>2-3</sup> , Co <sup>2-3</sup> , Mo <sup>4</sup> , Hg	Zn, V <sup>5</sup> , As <sup>5</sup> , S <sup>6</sup>
Щелочные и сильнощелочные, pH 7,5–9,5	Pb, Ba, Co	Zn, Ag, Cu, Cd	Mo <sup>6</sup> , V <sup>5</sup> , As <sup>5</sup> , S <sup>6</sup>

Таблица 24

**Шкала буферности почв к тяжелым металлам**

название	Показатели	Балл	Балл с учетом поправочного коэффициента
	пределы содержания, % (ранги)		
Гумус	< 1	1	1
	1,1–2	2	2
	2,1–4	3,5	3,5
	4,1–6	5	5
	6,1–8	6,5	6,5
	8,1–10	8	8
	> 10	9	9
Физическая глина	< 10 (пески)	1	2,5
	11–20 (супеси)	2	5
	21–45 (легкие и средние суглинки)	4	10
	46–60 (тяжелые суглинки и легкие глины)	6	15
	> 60	8	20

название	Показатели	Балл	Балл с учетом поправочного коэффициента
	пределы содержания, % (ранги)		
Полуторные окислы	< 1	1	1
	1,1–2	2,5	2,5
	2,1–3	4	4
	3,1–4	5,5	5,5
	4,1–5	7	7
Карбонаты, %	Для металлов, подвижных в кислой среде		
	< 0,5	1	1,5
	0,6–1,5	2,5	3,5
	1,6–2,5	4,5	6,5
	2,6–3,5	6,5	9,5
	3,6–4,5	8,5	12,5
	> 4,5	10,5	15,5
Реакция среды (величина pH)	5,1–5,5	1	2,5
	5,6–6,0	2	5
	6,1–6,5	3	7,5
	6,6–7,0	4	10
	7,1–7,5	5	12,5
	7,6–8,0	6	15
Карбонаты, %	Для металлов, подвижных в щелочной среде		
	< 0,5	10,5	15,5
	0,6–1,5	8,5	12,5
	1,6–2,5	6,5	9,5
	2,6–3,5	4,5	6,5
	3,6–4,5	2,5	3,5
	> 4,5	1	1,5
Реакция среды (величина pH)	5,1–5,5	6	15
	5,6–6,0	5	12,5
	6,1–6,5	4	10
	6,6–7,0	3	7,5
	7,1–7,5	2	5
	7,6–8,0	1	2,5

Примечание. Степень буферности (количество баллов): очень низкая (не больше 10), низкая (11–20), средняя (21–30), повышенная (31–40), высокая (41–50), очень высокая (больше 50).

В случае загрязнения почв одним тяжелым металлом оценка проводится по величине коэффициента концентрации  $K_c$ , при полиэлементном загрязнении используется показатель  $Z_c$ : 1) при очень низкой буферности, до 10 баллов, накопление металлов в почве не должно превышать 2–5 фоновых уровней; почвы с такой низкой буферностью способностью обычно относятся к песчаным, очень слабогумусированным, малопродуктивным; 2) при низкой буферности (от 11 до 20 баллов), которой обладают обычно супесчаные почвы с невысоким количеством гумуса, уровень металлов не должен превышать 4–7 фоновых содержаний; 3) при средней буферности (от 21 до 30 баллов), которая свойственна многим пахотнопригодным почвам, допустимый уровень металлов составит от 7 до 10 фоновых содержаний; 4) при повышенной буферности (от 31 до 40), присущей почвам суглинистым и глинистым, богатым гумусом, с реакцией среды, близкой к нейтральной, допустимым уровнем накопления металлов следует считать диапазон от 10 до 13 фоновых содержаний.

В последние годы многие исследователи рекомендуют нормировать тяжелые металлы в почвах по микробиологическим тестам. В любом случае необходима разработка ПДК веществ в почве с учетом не только их физико-химических и микробиологических свойств, но и хозяйственного использования, что, в частности, устранил возникающие при использовании существующих нормативов противоречия, например, при оценках состояния почв в населенных пунктах и в сельскохозяйственных ландшафтах.

### Оценка фитотоксичности почв

В работе [12] для определения фитотоксичности почв, загрязненных тяжелыми металлами, рекомендуется использоваться метод почвенных пластинок, согласно которому токсичными считают почвы, угнетающие проростки пшеницы и овса на 20–30% по отношению к тем, которые развивались на пластинке из контрольной (фоновой) почве. Есть сведения, что фитотоксичным считается такое содержание металла в почве, которое снижает продуктивность растений на 10% по сравнению с чистым контролем. Фитотоксичность почв может также оцениваться по величине ингибирования прорастания семян тестовых растений, или, например, по выживаемости пресноводных рачков *Daphnia magna* в водной вытяжке из почвы при 96-часовой экспозиции (острая токсичность) и по плодовитости рачков при 27-дневной экспозиции (хроническая токсичность). Продуктивность почв определяется по кислотности почв и величине коэффициента ингибирования прорастания тестовых растений. При оценке фитотоксичности почв особое значение имеет интенсивность их загрязнения соединениями азота, определяющего активность почвенных ферментов [25]. Известны шкалы активности ферментов почв, позволяющие использовать их в качестве диагностического показателя степени и границ азотного загрязнения почвы (табл. 25). Установлено, что загрязнение почвы соединениями азота приводит к снижению активности почвенной дегидрогеназы, каталазы и инвертазы. Активность нитритредуктазы повышается, что связано с ее участием в процессах трансформации соединений азота в почвах. Выполнены исследования по использованию полифенолоксидазы для диагностики степени загрязнения почв фенолами, роданидами [4]. Диагностику загрязненных металлами орошаемых почв рекомендуется проводить по активности фосфатазы [11].

Таблица 25

#### Шкала активности почвенной каталазы, дегидрогеназы и инвертазы в зависимости от содержания нитритного азота [25]

Зона загрязнения	Содержание нитритного азота, мг/100 г почвы	Снижение активности, % к контролю		
		каталазы	дегидрогеназы	инвертазы
Сильного	2,2	0–35	0–10	0–13
Среднего	0,9	36–74	14–25	14–40
Слабого	0,5	75–100	26–75	41–75

**Валовые концентрации химических элементов в верхнем слое почв, считающиеся предельными в отношении фитотоксичности, мг/кг (по данным разных авторов)**

Элемент	Linzon, 1978	Kabata-Pendias, 1979	Kitagishi, Yamane, 1981	Песчаные почвы, Temmerman et al., 1984	Суглинистые почвы, Temmerman et al., 1984	Tietjen, 1976
Be	–	10	–	0,5	2	–
B	–	100	–	–	–	–
F	–	1000	–	–	–	–
V	60	100	–	100	200	–
Cr	75	100	–	80	200	100
Mn	1500	–	–	500	800	–
Co	25	50	50	5	20	50
Ni	100	100	100	10	40	100
Cu	100	100	125	15	25	100
Zn	400	300	250	100	150	300
As	25	30	15	10	20	50
Se	5	10	–	1	1	10
Br	–	20	–	–	–	–
Sr	–	–	–	100	200	–
Mo	2	10	–	5	5	10
Ag	2	–	–	0,5	0,5	–
Cd	8	5	–	1	1	5
Sn	–	50	–	5	7	–
Sb	–	10	–	1	1	–
Hg	0,3	5	–	0,15	0,15	5
Tl	–	–	–	0,3	0,5	–
Pb	200	100	400	50	50	100

Таблица 27

**Содержание химических элементов в пахотных почвах [49]**

Элемент	Обычное содержание	Максимальное содержание, обнаруженное в загрязненных почвах	Ориентировочный допустимый уровень
As	0,1–20	8000	20
B	5–20	1000	25
Be	0,1–5	2300	10
Br	1–10	600	10
Cd	0,01–1	200	3
Co	1–10	800	50
Cr	2–50	20000	100
Cu	1–20	22000	100
F	50–200	8000	200
Ga	0,1–10	300	10
Hg	0,01–1	500	2
Mo	0,2–5	200	5
Ni	2–50	10000	50
Pb	0,1–20	4000	100

Элемент	Обычное содержание	Максимальное содержание, обнаруженное в загрязненных почвах	Ориентировочный допустимый уровень
Sb	0,01–0,5	–	5
Se	0,01–5	1200	10
Sn	1–20	800	50
Tl	0,01–0,5	40	1
Ti	10–5000	20000	5000
U	0,01–1	115	5
V	10–100	1000	50
Zn	3–50	20000	300
Zr	1–300	6000	300

В литературе известны оценки минимальных концентраций химических элементов в почвах, считающихся предельными в отношении фитотоксичности (главным образом, для сельскохозяйственных растений). Эти значения, очевидно, в определенной степени могут использоваться и для ориентировочной оценки качества городских почв с точки зрения опасности их техногенного загрязнения, в первую очередь, для городских зеленых насаждений (табл. 26, 27).

### Заключение

В настоящее время существуют два основных подхода к оценке качества (состояния) почв населенных мест. Один из них, гигиенический подход, основан на использовании утвержденных в установленном порядке гигиенических нормативов предельного содержания вредных веществ в почве. Другой, эколого-геохимический подход, базируется на применении в качестве своеобразных нормативов природных (фоновых) концентраций химических элементов и их соединений в почвах, не испытывающих прямого техногенного воздействия. Очевидно, что оба подхода имеют право на существование, причем каждый из них имеет свои достоинства и свои недостатки. В любом случае необходимо дальнейшее совершенствование существующих систем оценок интенсивности и опасности техногенного загрязнения городских почв химическими элементами. Особое внимание должно уделяться разработке способов, позволяющих оценивать значимость состояния почв с точки зрения их роли как вторичных источников загрязнения городской среды (прежде всего, атмосферного воздуха) и возможного влияния на состояние здоровья населения. Необходимы разработка и внедрение в нашей стране относительно простого и удобного способа определения предельных уровней содержания химических элементов в почвах с целью обоснования дальнейших мероприятий по их ремедиации. Это потребует также принятия специальных нормативных правовых актов, определяющих условия, при которых ремедиационные мероприятия должны осуществляться в обязательном порядке.

### Литература

1. Буренков Э.К., Яшин Е.П., Кизласкин С.А. и др. Эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды г. Саранска. – М.: ИМГРЭ, 1993. – 115 с.
2. Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. – М.: Наука, 1988. – 520 с.

3. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*, 1962, № 7, с. 595–571.

4. *Галстян А.Ш.* Ферментативная активность почв Армении. – Ереван: Айстан, 1974. – 327 с.

5. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест: Методические указания. МУ 2,1,7,730-99. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. – 38 с.

6. *Глазовская М.А.* Принципы классификации почв по их устойчивости к химическому загрязнению // *Земельные ресурсы мира; их использование и охрана*. – М., 1978, с. 85–99.

7. *Глазовская М.А.* Теория ландшафтов в приложении к изучению техногенных потоков рассеяния и анализу способности природных систем к самоочищению // *Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состоянии экосистем*. – М.: Наука, 1981, с. 7–41.

8. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.

9. *Глазовская М.А.* Опыт классификации почв мира по устойчивости к техногенным кислотным воздействиям // *Почвоведение*, 1990, № 9, с. 82–96.

10. *Гончарук Е.И., Сидоренко Г.И.* Гигиеническое нормирование химических веществ в почве: Руководство. – М.: Медицина, 1986. – 320 с.

11. *Григорян К.В., Галстян А.Ш.* Диагностика загрязненных тяжелыми металлами орошаемых почв по активности фосфатазы // *Почвоведение*, 1986, № 8, с. 63–67.

12. *Евдокимова Г.А.* Определение степени токсичности загрязненных металлами почв и некоторые способы ее снижения (практические рекомендации). – Апатиты: КФ АН СССР, 1985. – 13 с.

13. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва-растения. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.

14. *Ильин В.Б.* О надежности гигиенических нормативов содержания тяжелых металлов в почве // *Агрохимия*, 1992, № 12, с. 78–85.

15. *Ильин В.Б.* Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // *Агрохимия*, 1995, № 10, с. 109–113.

17. *Ильин В.Б.* Буферные свойства почвы и допустимый уровень ее загрязнений тяжелыми металлами // *Агрохимия*, 1997, № 11, с. 65–70.

17. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 439 с.

18. *Лозе Ж., Матье К.* Толковый словарь по почвоведению: Пер. с франц. – М.: Мир, 1998. – 398 с.

19. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель (№ 3-15/582) // Государственный контроль за использованием и охраной земель. Нормативные материалы. Вып. 3. – М.: РУССЛИТ, 1996, с. 293–331.

20. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 112 с.

21. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 15 с.

22. Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами. – М.: Минздрав СССР, 1987. – 25 с.

23. *Обухов А.И., Ефремова Л.А.* Охрана и рекультивация почв, загрязненных тяжелыми металлами // Мат-лы II Всес. конф. «Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы», Ч. 1, – М., 1988, с. 23–35.

24. *О'Салливан А.* Экономика города: Пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 706 с.

25. *Павлюкова Н.Ф., Долгова А.Г.* Индикация эдафотопов, загрязненных техногенными веществами, по активности ферментов // Почвоведение, 1993, № 1, с. 45–47.

26. *Перельман А.И.* Геохимия техногенеза // Проблемы минерального сырья, Памяти акад. А.Е. Ферсмана. – М.: Наука, 1975, с. 199–208.

27. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. – М.: Астрей-2000, 1999. – 768 с.

28. Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 272 с.

29. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Смирнова Р.С. и др.* Город как техногенный субрегион биосферы // Биогеохимическое районирование и геохимическая экология. – М.: Наука, 1985, с. 133–166.

30. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

31. *Саэт Ю.Е., Смирнова Р.С.* Геохимические принципы выявления зон воздействия промышленных выбросов в городских агломерациях // Вопросы географии, 1983, № 120, с. 45–55.

32. *Смирнова Р.С., Павлова А.Н.* Геохимические карты в оценке окружающей среды городов // Исследование окружающей среды геохимическими методами. – М.: ИМГРЭ, 1982, с. 38–45.

33. *Сорокина Е.П.* Геохимическая структура техногенных ореолов промышленных зон различного типа // Новые области применения геохимических методов. – М.: ИМГРЭ, 1981, с. 8–13.

34. *Сорокина Е.П.* Картографирование техногенных аномалий в целях геохимической оценки урбанизированных территорий // Вопросы географии, 1983, № 120, с. 55–67.

35. *Сорокина Е.П., Агальцова Е.Б., Григорьева О.Г., Саэт Ю.Е.* Выявление геохимических ассоциаций элементов как метод исследования техногенных аномалий // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Тр. 2-го Всес. сов., Обнинск, 1978. – Л.: Гидрометеониздат, 1980, с. 91–99.

36. *Сорокина Е.П., Кулачкова О.Г., Онищенко Т.А.* Сравнительный геохимический анализ воздействия на окружающую среду промышленных предприятий различного типа // Методы изучения техногенных геохимических аномалий. – М.: ИМГРЭ, 1984, с. 9–20.

37. *Сорокина Е.П., Янишевская Н.Б., Борисенко И.А.* Техногенные аномалии в почвах городов как индикатор загрязнения атмосферы промышленными выбросами // Исследование окружающей среды геохимическими методами. – М.: ИМГРЭ, 1982, с. 25–37.

38. *Годаро М.П.* Экономическое развитие: Пер. с англ. – М.: Экономический факультет МГУ, ЮНИТИ, 1997. – 671 с.

39. Токсикометрия химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: ЦМП ГКНТ, 1986. – 428 с.

40. *Фортескью Дж.* Геохимия окружающей среды: Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1985. – 360 с.

41. Экология города. – М.: Научный мир, 2004. – 624 с.

42. Эколого-геохимическая оценка городов различных регионов страны. – М.: ИМГРЭ, 1991. – 124 с.
43. Эколого-геохимические исследования в районах интенсивного техногенного воздействия. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 162 с.
44. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.
45. Янин Е.П. Промышленная пыль в городской среде (геохимические особенности и экологическая оценка). – М.: ИМГРЭ, 2003. – 82 с.
46. Braithwaite P. Contaminated land remediation: Economics v Liability // J. Inst. Water and Environ. Manag., 1994, 8, № 6, p. 629–634.
47. Dang Zhi, Liu Cong-giang, Shang Ai-an // Diqui kexue jinzhan=Ada. Earth Sci., 2001, 16, № 1, p. 86–92.
48. Kabata-Pendias A. Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soil // Heavy metals, Problems and solutions. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995, p. 3–18.
49. Karim M.A., Khan Lutful I. Removal of heavy metals from sandy soil using CEHIXM process // J. Hazardous Mater., 2001, 81, № 1–2, p. 83–102.
50. McLaughlin M.J., Zarcinas B.A., Stevens D.P. Soil testing for heavy metals // Commun. Soil Sci. and Plant Anal., 2000, 31, № 11–14, p. 1661–1700.
51. Moen J.E.T. et al. Soil protection and remedial action: criteria for decision making and standartisation of requirements // Contaminated Soils. – Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986, p. 441–448.
52. Stigliani W.M. Buffering capacity: its relavance in soil and water pollution // New J. Chem., 1996, 20, № 2, p. 205–210.
53. THE RE-USE CONTAMINATED LAND. A Handbook of Risk Assessment. – Chichester e. a.: John Wiley & Sons, 1995. – 219 p.
54. Ure A.M., Berrow M.L. The chemical constituent of soil // Environmental Chemistry, V. 2. – R. Soc. Chem., Burlington House, London, 1982, p. 94–202.
55. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. et Cosmochim. Acta, 1995, 59, № 7, p. 1217–1232.