



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Ю.В. Сомова
О.Ю. Ильина
А.С. Лимарев

РАСЧЁТ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве практикума*

Магнитогорск
2019

УДК 574
ББК 30.69/20.1

Рецензенты:

инженер по охране окружающей среды
ООО «Центр коммунального сервиса»
Е.А. Очкова

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
доцент кафедры стандартизации, сертификации
и технологии продуктов питания,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»
Т.Н. Зайцева

Сомова Ю.В., Ильина О.Ю., Лимарев А.С.

Расчёт миграции загрязняющих веществ [Электронный ресурс] : практикум / Юлия Васильевна Сомова, Оксана Юрьевна Ильина, Александр Сергеевич Лимарев ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,05 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019. – 1 электрон. опт. диск (DVD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Практикум составлен в соответствии с типовой программой дисциплин «Источники загрязнения среды обитания», «Экспертиза безопасности», «Экология» для обучающихся по направлению подготовки «Техносферная безопасность».

Для специалиста в области безопасности очень важно умение произвести расчёты загрязнения компонентов окружающей среды. Эти расчёты включают в себя прогнозирование концентраций загрязняющих веществ в различных средах (атмосфере, снежном покрове, почве, поверхностных и подземных водах) при воздействии источников загрязнения, а также установление норм воздействия исходя из предельно допустимых и фоновых концентраций загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды.

Практикум предназначен для обучающихся направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

УДК 574
ББК 30.69/20.1

© Сомова Ю.В., Ильина О.Ю., Лимарев А.С., 2019
© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», 2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
1.1. Миграция загрязняющих веществ в атмосфере	5
1.2. Миграция загрязняющих веществ из атмосферы на снежный покров.....	10
1.3. Миграция загрязняющих веществ из атмосферы на почвенный слой	13
1.4. Миграция загрязняющих веществ через зону аэрации	21
1.5. Миграция загрязняющих веществ в подземных водах	29
1.6. Миграция загрязняющих веществ в поверхностных водах.....	34
1.6.1. Разбавление сточных вод в реках.....	35
1.6.2. Прогноз и анализ концентрации загрязняющих веществ в реках	38
1.6.3. Нормирование воздействия загрязняющих веществ на водные объекты	40
Контрольные вопросы	41
ГЛОССАРИЙ.....	43
2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	60
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	61

ВВЕДЕНИЕ

Хозяйственная деятельность человека стала мощным фактором преобразования природы, соизмеримым по масштабам с естественными геологическими, климатическими и геохимическими процессами. Особенно влияние его распространяется на биосферу, расположенную у границ атмосферы, гидросферы и литосферы и заполненную живым веществом.

Важнейшей проблемой взаимоотношения человека с природой является проблема загрязнения окружающей среды. Загрязнение окружающей среды многокомпонентно, оно тесно связано с загрязнением всех сред – атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод. На загрязнение окружающей среды оказывают влияние различные факторы, которые можно разбить на две группы: техногенные и природные. Техногенные факторы – это, прежде всего источники выбросов и сбросов загрязняющих веществ. Природными факторами являются физико-географические и геолого-гидрогеологические условия.

Миграция загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды относится к числу наиболее сложных задач. Аналитические решения движения загрязняющих веществ получены только для наиболее простых схем. Для более сложных случаев используется численное моделирование. На основе аналитических решений или моделирования производится прогнозирование и нормирование состояния окружающей среды по различным компонентам и загрязняющим веществам.

Теоретические и экспериментальные исследования движения загрязняющих веществ в атмосфере рассмотрены в работах М. Е. Берлянда, Н.Л. Бызовой и других авторов. Для подземных вод движение загрязняющих веществ рассмотрено в работах В. М. Гольдберга, В. А. Мироненко, В. М. Шестакова, В. Г. Румынина. В поверхностных водах этому вопросу посвящены работы И. Д. Родзиллера, С. Н. Черкинского, А. А. Цхая, А. М. Черняева.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Миграция загрязняющих веществ в атмосфере

Распределение загрязняющих веществ в атмосфере может быть описано следующим уравнением

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum u_i \frac{\partial}{\partial x_i} = \sum \frac{\partial}{\partial x_i} k_i \frac{\partial q}{\partial x_i} - \alpha q, \quad (1)$$

где t – время;

x_i – координата;

u_i и k_i – составляющие средней скорости перемещения примеси к направлению оси x_i ($i = 1, 2, 3$);

α – коэффициент, определяющий изменение концентрации за счет превращения примеси.

Уравнение (1) описывает пространственное распределение средних концентраций, а также их изменение со временем. В этой связи оно может рассматриваться как прогностическое уравнение. Учет нестационарного члена существенен только в отдельных случаях, в частности в определении экстремальных концентраций примеси от наземных источников в условиях слабого ветра и малой интенсивности турбулентного обмена.

Исходное прогностическое уравнение (1) применительно к миграции пыли и аэрозоля сводится к обычно используемому уравнению атмосферной диффузии тяжёлой примеси

$$u \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} k \frac{\partial q}{\partial y}, \quad (2)$$

где w – скорость осаждения частиц тяжёлой примеси.

Граничные условия на бесконечном удалении от источника принимаются в соответствии с естественным предположением о том, что концентрация убывает до нуля.

$q \rightarrow 0$ при $|y| \rightarrow \infty$;

$q \rightarrow 0$ при $|x| \rightarrow \infty$;

Особенности распространения тяжелой примеси определяются в значительной степени собственной скоростью осаждения частиц, которая, в свою очередь, зависит от плотности и размеров аэрозоля. Скорость выпадения сферических частиц может быть определена по формуле

$$w = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_n \cdot r_n, \quad (3)$$

где ρ_n – плотность частиц аэрозоля;

r_n – их радиус.

В формуле (3) w измеряется в см/с, а ρ_n и r_n задаются соответственно в г/см³ и мкм. В атмосфере встречаются аэрозоли с размерами частиц от тысячных долей микрона до сотен микронов.

Прогнозирование концентраций тяжелых примесей в приземном слое воздуха от сравнительно невысоких источников приближенно может быть выполнен, как и для легких примесей, на основе аналитического решения задачи для случая, когда с высотой скорость ветра изменяется по степенному закону, а коэффициент обмена линейно возрастает.

Нормирование загрязнения атмосферы осуществляется на основе санитарно-гигиенических и производственно-хозяйственных нормативов. При этом показателем, определяющим допустимую степень воздействия на воздушный бассейн, является предельно допустимый выброс (ПДВ, г/с, т/год). Предельно допустимый выброс (ПДВ) в атмосферу устанавливается из условия, чтобы содержание загрязняющих веществ в приземном слое воздуха в жилой зоне даже в неблагоприятных условиях не превышало нормативов качества воздуха, установленных для населенных пунктов, с учетом фоновых концентраций веществ, выброшенных другими источниками в зоне влияния.

Разработка предельно допустимых выбросов включает в себя расчет рассеяния, прогнозирование приземных концентраций загрязняющих веществ, их анализ и расчет ПДВ. Методика расчетов основывается на математических моделях теории атмосферной диффузии, разработанной М. Е. Берляндом, и опубликована в различных нормативных документах.

Согласно действующей методике, величина максимальной приземной концентрации вредных веществ C_m для выброса газовой смеси из одиночного источника с круглым устьем определяется по формуле (на расстоянии x_m от источника)

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot m}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_i \cdot \Delta T}} \cdot \eta. \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы. Значение данного коэффициента соответствует неблагоприятным метеоусловиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна (обычно $A = 160$ для условий Урала);

F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе. Для мелкодисперсных аэрозолей и пыли при средней эксплуатационной очистке выбросов $\geq 90\%$ $F = 2$, при очистке 75-90% $F = 2,5$, при очистке $< 75\%$ и при ее отсутствии $F = 3$;

m , n – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса. Коэффициенты m и n определяются в зависимости от параметров f , V_n , V_m и f_e

$$f = 1000 \cdot \frac{W_0 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T}, \quad (5)$$

$$V_H = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}}, \quad (6)$$

$$V_M = 1,3 \cdot \frac{W_0 \cdot D}{H}, \quad (7)$$

$$f_e = 800 \cdot (V_M)^3, \quad (8)$$

где W_0 – скорость выхода газовой смеси из источника, м/с;
 D – диаметр устья источника выброса, м.

Коэффициент m определяется по формулам

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f_e < 100, \quad (9)$$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f_e \geq 100. \quad (10)$$

Коэффициент n определяется по формулам

$$n = 1 \quad \text{при } V_M \geq 2, \quad (11)$$

$$n = 0,532 \cdot V_H^2 - 2,13 \cdot V_H + 3,13 \quad \text{при } 0,5 \leq V_M < 2, \quad (12)$$

$$n = 4,4 \cdot V_H \quad \text{при } V_M < 0,5 \quad (13)$$

η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности. Значение его определяется на основе анализа картографического материала, освещающего рельеф местности ($\eta = 1-4$).

H – высота источника выброса над уровнем земли. В зависимости от высоты источники подразделяются на:

- высокие, $H \geq 50$ м;
- средние, $H = 10-50$ м;
- низкие, $H = 2-10$ м;
- наземные, $H \leq 2$ м.

V_1 – расход газовой смеси, определяемый по формуле

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot W_0, \quad (14)$$

ΔT – разница температур газозадушной смеси и наружного воздуха, принимается равной средней максимальной температуре наиболее жаркого месяца года и определяется по СНИП 2.01.82;

M – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с. Значение мощности выброса следует относить к 20-30-минутному периоду осреднения.

Расстояние x_m от источника выбросов, на котором отмечается максимальная приземная концентрация C_m , зависит от коэффициента F , учитывающего скорость оседания взвешенных частиц выброса в атмосфере. При $F \geq 2$

$$x_m = \frac{5-F}{4} \cdot k_d \cdot H, \quad (15)$$

где $k_d = 7 \cdot V_\mu^{1/2} \cdot (1 + 0,28 \cdot f^{1/3})$.

Концентрация пыли в атмосфере C_x на расстоянии x от источника находится по формуле

$$C_x = S_1 \cdot C_m, \quad (16)$$

где S_1 – безразмерная величина, зависящая от отношения x/x_m (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Определение параметра расчета концентрации пыли в атмосфере

x/x_m	S_1
0,1	0,05
0,3	0,23
0,6	0,52
1,0	1,0
2,0	0,75
4,0	0,4
6,0	0,25
8,0	0,1
10,0	0,075
12,0	0,07
14,0	0,05
20,0	0,03

Прогноз загрязнения атмосферы воздуха для веществ, содержащихся в выбросах предприятий, производится на основе расчета концентраций в 2-метровом слое над поверхностью земли.

В качестве критериев в основном принимаются максимальные разовые предельно допустимые концентрации (ПДК), относящиеся к 20-минутному

интервалу. При этом $C_{\max} \leq \text{ПДК}$. Для веществ, у которых установлены ПДК среднесуточные, при анализе C_{\max} должно выполняться условие $0.1 C_{\max} \leq \text{ПДК}$ среднесуточное. Основные ПДК металлов и их соединений в воздухе приведены в табл. 1.2. Её анализ показывает, что ПДК металлов в воздухе связано с формой их нахождения. У легкорастворимых соединений она меньше, чем у труднорастворимых.

Результаты расчета загрязнения атмосферы существенно зависят от направления и скорости ветра. Поэтому при расчетах производят перебор направлений ветра и скоростей. Для групп источников расчеты осуществляются по заданной регулярной сетке, разбивающей зону влияния с определенным шагом по специальным программам: «Эфир», «РУЗА», «Эколог» и др.

Таблица 1.2

ПДК металлов и их соединений в воздухе

Элемент	Соединение	Предельно допустимая концентрация, мг/м ³		
		среднесуточная	максимально разовая	рабочей зоны
-Fe	FeO	0,04	-	-
	FeCl ₃	0,004	-	-
	FeSO ₄	0,007	-	-
Mn		0,001	0,01	0,1
Cr	CrO ₃	0,0015	-	
V	V ₂ O ₅	0,002	-	0,1
Ni	NiO	0,001	-	-
	NiCO ₃	0,0005	-	-
	Растворимые соли	0,0002	-	-
Cu	CuO	0,002	-	0,5
	CuS	0,001	-	-
	CuSO ₄		0,003	-
Zn	ZnO	0,005	0,05	0,1
Cd		0,0003	-	0,01
As		0,003	-	0,1
	Оксид	-	-	0,3
Pb	PbO	0,0003		0,01
Hg		0,0003	0,003	0,05

Показателем, определяющим допустимую степень воздействия на воздушный бассейн, является предельно допустимый выброс ПДВ, который для одиночного источника с круглым устьем может быть рассчитан по формуле

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДК}-C_{\phi}) \cdot H^2}{m \cdot n \cdot \eta} \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}, \quad (17)$$

где C_{ϕ} – концентрации от всех других источников загрязнения атмосферы, как на самом предприятии, так и в зоне его влияния.

Прогнозные расчёты при разработке ПДВ обычно производятся на наихудшие условия (температурные, ветровые и т. д.), что чаще всего приводит к затруднениям сопоставления расчетного и натурального уровней загрязнения приземной атмосферы. В этой связи необходимо проведение прогнозных расчетов по усреднённым параметрам (среднегодовым, сезонным).

1.2. Миграция загрязняющих веществ из атмосферы на снежный покров

Загрязнение снежного покрова происходит в два этапа. Во-первых, это загрязнение снежинок во время их образования в облаке и выпадения на местность – так называемое влажное выпадение загрязняющих веществ со снегом. Во-вторых, это загрязнение уже выпавшего снега в результате сухого выпадения загрязняющих веществ из атмосферы.

Взаимоотношения между сухими и влажными выпадениями зависят от ряда факторов, главными из которых являются: длительность холодного периода, в течение которого сохраняется снежный покров, частота снегопадов, их интенсивность, физико-химические свойства загрязняющих веществ, размер аэрозолей.

В начале зимы, когда отсутствует сплошной снежный покров, загрязнение снега может происходить в результате ветровой эрозии обнаженных участков замерзших почв. Основная масса этого загрязнения обусловлена главным образом достаточно крупными (50 мкм и более) минеральными частицами, которые представляют алевритовую и перлитовую фракции почв. Эти частицы переносятся на небольшие расстояния от нескольких метров до десятков и сотен метров. По мере роста высоты снежного покрова такое загрязнение быстро падает и при образовании сплошного снежного покрова прекращается. Если известна средняя концентрация загрязняющих веществ в выпадающем снеге, средняя интенсивность сухих выпадений q , то суммарные выпадения на единицу площади - запас Q - может быть грубо оценен по соотношению

$$Q = Q_{\text{мест}} + Q_{\text{вл}} + Q_{\text{сух}} = Q_{\text{мест}} + cn + q \cdot (N - n), \quad (18)$$

где $Q_{\text{мест}}$, $Q_{\text{вл}}$, $Q_{\text{сух}}$ – запас загрязняющих веществ, обусловленный влажными и сухими выпадениями, а также местным переносом при эрозии почв соответственно;

n – число дней со снегопадами;

N – время существования снежного покрова, дни.

Сравнение содержания металлов в почвообразующих горных породах с содержанием в пылевых выбросах металлургических предприятий показало,

что влияние металлов почв на содержание их в снежном покрове вблизи предприятий невысоко.

Вымывание загрязняющих веществ снегом зависит от условий формирования осадков в облаке и последующей трансформации при выпадении на земную поверхность. На всех этапах захват загрязняющих веществ может осуществляться каплями воды и ледяными кристаллами. Как правило, этот процесс сложен и плохо поддается количественным расчетам. С большими трудностями связано и достаточно детальное описание условий вымывания. Реально может наблюдаться как большая, так и меньшая эффективность вымывания загрязняющих веществ снегом по сравнению с дождем. Основной характеристикой процесса вымывания является коэффициент концентрирования

$$W = \frac{C_{\text{сн}}}{C_{\text{возд}}} = \frac{C_{\text{сн}} \cdot P}{C_{\text{овозд}}}, \quad (19)$$

где $C_{\text{сн}}$ и $C_{\text{возд}}$ – массовая концентрация в снеге и воздухе соответственно, г/г;
 $C_{\text{овозд}}$ – объемная концентрация в воздухе, г/см³;
 P – плотность воздуха, г/см³.

Коэффициенты концентрирования снегом в настоящее время слабо изучены. В качестве грубой оценки используются значения, полученные при выпадении дождей (табл. 1.3). Для отдельных снегопадов коэффициенты концентрирования снегом могут различаться в несколько раз, однако при длительном накоплении снежного покрова расхождения будут незначительны. Как следует из данных табл. 1.3, значения W лежат в основном в пределах $5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3$. С использованием коэффициента концентрирования возможно прогнозирование загрязнения воздуха по загрязнённости снежного покрова и наоборот.

Таблица 1.3

Коэффициенты концентрирования металлов в снежном покрове

Элемент	W	Элемент	W
V	510	Ni	1100
Cr	1200	Cu	880
Mn	760	Zn	1050
Fe	890	As	640
Co	780	Pb	450

Скорость сухого выпадения v_c определяется по интенсивности сухого выпадения и приземной концентрации следующим образом:

$$v_c = \frac{q}{C_{\text{овзд}}}, \quad (20)$$

где v_c - в см/с;
 q - в г/ (см² с);
 $C_{\text{возд}}$ - в г/см³.

Выражение (1.20) используется при аэрозольном загрязнении атмосферы, а их удаление происходит за счет поглощения снежным покровом. Различия между скоростью сухого осаждения аэрозолей на снег и почвы не установлено. В табл. 1.4 приведены скорости сухого выпадения ряда элементов, присутствующих в аэрозольных частицах. В основном значения v_c лежат в пределах 0,1 – 0,6 см/с. Заметные отклонения наблюдаются для Ni и Cu (~1).

Таблица 1.4

Скорость сухого выпадения металлов (см/с)

Элемент	v_c	Элемент	v_c
V	0,29	Ni	< 1,1
Cr	0,29	Cu	0,07
Mn	0,24	Zn	0,20
Fe	0,57	As	0,24
Co	0,29	Pb	0,18

Время снегопадов занимает для Уральского региона 35 % холодного периода. Доля сухих выпадений на слабоурбанизированных территориях обычно составляет 10-30 %. Однако вблизи локальных источников при больших грубодисперсных аэрозолях картина меняется на обратную, т. е. на долю сухих выпадений может приходиться от 70 до 90 %. Если доля сухих выпадений a и средняя концентрация в снежном покрове $C_{\text{сн}}$ тогда средняя объемная концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе определяется следующим образом

$$C_{\text{возд}} = \frac{C_{\text{сн}} \cdot (1-a) \cdot p}{W}. \quad (21)$$

Средняя концентрация загрязняющего вещества в снеге за длительный период существования устойчивого снежного покрова может являться санитарно-гигиенической нормой загрязненности атмосферного воздуха. По ней можно сопоставить расчётные и фактические концентрации загрязняющих веществ в атмосфере. Для этого разработан метод, позволяющий осуществлять переход от концентраций, полученных за длительный период осреднения, к их значениям при коротком периоде осреднения. Пересчетная формула имеет вид

$$c_k = 2 \cdot \left(\frac{t_d}{t_k}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{n_0}{n}\right) \cdot c_d, \quad (22)$$

где c_k и c_d – концентрации для короткого (t_k) и длительного (t_d) периодов осреднения;

n/n_0 – повторяемость несущего (преобладающего) направления ветра, отнесенная к ее значению при круговой розе ветров.

Если преимущественное направление переноса загрязняющих воздух веществ выражено слабо, т. е. можно положить $n/n_0 = 1$, приземная концентрация рассчитывается по формуле

$$c_k = k \cdot c_d, \quad (23)$$

где k – пересчетный коэффициент, определяемый по табл. 1.5.

Таблица 1.5

Значения пересчетного коэффициента

T	t_0 , мес.					
	1	2	3	4	5	6
20 мин	9,4	11	12	12	13	13
1 сут	4,0	4,6	4,9	5,2	5,5	5,7

Учитывая весьма приближенный характер оценок, вполне целесообразно на практике использовать всего два значения коэффициента k (10 и 5) для перехода к разовым и суточным концентрациям, независимо от длительности зимнего периода.

1.3. Миграция загрязняющих веществ из атмосферы на почвенный слой

Почва при атмогенном воздействии является мощным геохимическим барьером, как правило, прочно фиксирующим загрязняющие вещества в результате процессов трансформации соединений и существенно ослабляющим их поступление через корневую систему в надземную растительную массу и миграцию в грунтовые воды. В то же время в почве происходит дифференциация форм загрязняющих веществ и перераспределение их с внутрипочвенным и поверхностным стоком с образованием в подчиненных ландшафтах вторичных аномалий. Поэтому при прогнозировании и нормировании загрязнения почв атмотехногенным воздействием необходимо учитывать как трансформацию элементов в почвах, так и взаимосвязь с загрязнением атмосферы.

Трансформация соединений металлов, поступающих в почву из атмосферы, включает в себя процессы растворения и поглощения их твердой фазой. Основным фактором, контролирующим содержание форм металлов в почвах, подверженных атмогенному загрязнению, является адсорбционно-десорбционное равновесие.

Растворённая часть загрязняющих веществ в почве является наиболее важной ее экологической характеристикой, поскольку определяет миграцию их по профилю и поглощение растениями. Изменения влажности почв, активности микробиоты влияют на кислотно-основное и окислительно-восстановительное равновесия, содержание хелатообразующих соединений, состав почвенной атмосферы, и все это, в свою очередь, сказывается на подвижности металлов. В почвенном растворе металлы могут существовать только как гидратированные комплексные ионы с органическими или неорганическими лигандами. Непременным участником комплексообразования является анион OH^- . Поэтому состояние металлов в растворе всегда следует рассматривать как некоторую стадию гидролиза. Органические комплексообразователи способствуют удержанию их в неадсорбированном состоянии, увеличивая тем самым их общее содержание в водной фазе.

П. В. Елпатьевским описаны результаты фракционирования концентратов водорастворимых органических веществ лизиметрических вод из-под генетических горизонтов иллювиально-гумусового бурозема в условиях аэротехногенного загрязнения экосистемы. Основу таких веществ составляют фульвокислоты полидисперсные по молекулярной массе. Свинец, медь и железо тяготеют к высокомолекулярным водорастворимым органическим веществам, что определяет их соосаждение в горизонт В и более полное выведение их миграционными потоками. Цинк, кадмий и марганец связаны со среднемолекулярными водорастворимыми органическими веществами, что обеспечивает их частичный вынос за пределы почвенного профиля. Образование органоминеральных комплексов металлов и миграция с почвенным раствором по профилю – основной механизм их удаления из верхнего слоя почвы. Установлено, что чем ниже емкость поглощения почвы, тем глубже мигрируют загрязняющие вещества.

В результате трансформации атмосферных выпадений в почвах, а также природных особенностей почвенного субстрата, сформировавшегося в почвообразовательном процессе, металлы в почвах находятся в нескольких формах. Для оценки форм нахождения или форм связывания металлов в почвах существуют аналитические методики с использованием последовательной экстракции. Все эти методики основываются на предположении, что в почвах присутствуют следующие формы металлов: водорастворимые, обменные, связанные в органические соединения, захваченные в оксиды железа и марганца, собственные минералы (например, карбонаты и сульфиды металлов), связанные в структуре силикатов.

Водорастворимая форма определяется из почвенного раствора. Эта форма предполагает возможность миграции металлов по почвенному профилю и поверхности почв. Водорастворимая и обменная формы представляют собой подвижную фракцию металлов в почве. В качестве группового экстрагента для оценки этой формы используется ацетатно-аммонийный буфер с pH 4,8, показавший высокую прямую корреляцию между экстрагированным количеством металлов и потребностью почв в микроудобрениях. Таким образом, подвижную форму можно считать транслокационной в системе почва

– растение. Валовая или кислоторастворимая форма экстрагируется сильными кислотами и характеризует общее содержание металлов в почве. Мобилизация металлов из этих форм или трансформация подвижной фракции металлов в неподвижную – обычно процесс очень медленный, контролирующийся в основном кинетическими факторами.

Исследование взаимосвязи концентрации загрязняющих веществ в атмосфере и почве предполагает наличие достаточно большой сети пунктов наблюдений с сопряженным определением юс в этих средах. Такая работа проведена по территории Украины М. Г. Тютюником. Автором установлена зависимость металлоносности урбанозёмов (почв городов) от уровня загрязнения атмосферы городских ландшафтов по 35 пунктам наблюдений. Выявлены достоверные корреляционные зависимости между средним многолетним содержанием металлов в городском воздухе и содержанием их в (0-2 см) слое урбанозёмов в валовой, подвижной и водорастворимой формах. Получены три вида моделей: линейная, степенная и экспоненциальная. Для Среднего Урала выполнение таких исследований не представляется возможным ввиду небольшого количества стационарных постов наблюдений, поэтому эту взаимосвязь можно оценить только через снежный покров.

При таянии снега часть талой воды непосредственно стекает по поверхности почвогрунтов. Другая часть талых вод, просочившаяся через пористый почвенный слой, достигает первого от поверхности водоносного горизонта. Ещё одна часть талых вод остается в почве, пополняя ее влажность до полной влагоемкости.

Водный баланс талых вод может быть представлен следующим образом

$$h_{\text{в}} = P_{\text{сн}} - x - u - z - h_{\text{ак}}, \quad (24)$$

где $h_{\text{в}}$ – слой весеннего стока;

$P_{\text{сн}}$ – запасы воды в снеге;

x – часть инфильтровавшихся талых вод, достигшая водоносного горизонта;

u – часть инфильтровавшихся талых вод, для пополнения почвенной влаги;

z – испарение со снега минус конденсация;

$h_{\text{ак}}$ – слой талых вод, аккумуляировавшихся на поверхности бассейна.

Увлажненность почв определяет в основном значения коэффициента стока – талых вод – a . Средняя увлажненность почв имеет зональное распределение, и поэтому значения коэффициента весеннего стока закономерно уменьшаются с севера на юг по мере изменения увлажненности. Для Среднего Урала он равен 0.7 - 0.8. В отдельные годы значение коэффициента стока может заметно отличаться от среднего. Эти колебания зависят от степени осеннего и предвесеннего увлажнения почвогрунтов.

Оставшееся в почве количество вещества, поступившего из снежного покрова, определяется их физико-химическими свойствами и коэффициентом

стока, а его пространственное распределение по поверхности бассейна зависит не только от распределения влагозапаса и концентрации загрязняющего вещества в снежном покрове, но и от особенностей стока, свойств почвогрунтов и рельефа. С учётом этого оно может быть определено по формуле

$$Q_{\text{CH}}^{\text{ост}} = b \cdot (1 - a) \cdot c \cdot P_{\text{CH}} \cdot S, \quad (25)$$

где b – параметр физико-химического взаимодействия почв и загрязняющего вещества;

S – площадь водосбора;

c – концентрация загрязняющего вещества в снеговой воде.

Многофакторность процесса загрязнения почв, значительная трансформация загрязняющих веществ в почвах не позволяют сделать точный прогноз их загрязнения. Однако при повторяемости метеорологического режима и достаточно стабильной рН, Eh среды можно связать нагрузку элементов, выпавших из атмосферы и определённых по снеговой съёмке, с их содержанием в почвах. Такие связи имеют статистическую основу и могут быть выявлены методом корреляционно-регрессионного анализа. При исследовании воздействия шлаковых отвалов Нижнетагильского металлургического комбината на окружающую среду по марганцу и цинку получены прогностические статистические зависимости, которые представлены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции между нагрузкой элемента X (кг/км²·сут) и его содержанием в почве Y (мг/кг); $n = 53$

Элемент	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
Mn	$Y = 1115 + 23,13 X$	0,66
Zn	$Y = 2,17 + 20,15 X$	0,85

Примечание: коэффициенты корреляции и уравнения регрессии значимы при уровне значимости $\alpha = 0,05$

Таким образом, содержание загрязняющих веществ в почве на территориях воздействия предприятий пропорционально концентрации их в воздухе. Поэтому выброс в атмосферу может быть лимитирован как загрязнением воздуха, так и почвы, т. е. необходима комплексная оценка атмосферного воздействия предприятий на состояние окружающей среды.

В связи с этим особое значение приобретает нормирование воздействия источников загрязнения на почвенный покров, которое включает разработку предельно допустимых нагрузок на почвы. По мнению И. Г. Важенина, под нормативной следует понимать такую антропогенную нагрузку, которая при длительном (многолетнем) воздействии на почву не вызывает каких-либо патологических изменений в почвенной биоте и в свойствах ее абиотической

части, особенно в почвенном поглощающем комплексе. Нормирование нагрузок на почвы заключается в разработке для предприятий ПДВ загрязняющих веществ, исходя из их ПДК в почвах. Под ПДК загрязняющих веществ понимаются такие их концентрации, которые при длительном воздействии на почву и произрастающие на ней растения не вызывают каких-либо патологических изменений или аномалий в ходе биологических почвенных процессов, а также не приводят к накоплению токсичных элементов в сельскохозяйственных культурах и, следовательно, не могут нарушить биологический оптимум для животных и человека. Нормирование содержания любого ингредиента для почвенного покрова встречает большие трудности в связи с тем, что, в отличие от сравнительно гомогенных водной и воздушной

сред, почва является гетерогенным компонентом в пространстве и во времени. В связи с этим предельно допустимые концентрации по различным нормативным документам имеют некоторые различия. Обычно проводят нормирование не только по общему содержанию, но и по концентрации их подвижных форм (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Предельно допустимые концентрации металлов в почвах
и допустимые уровни их содержания по показателям вредности, мг/кг

Элемент	ПДК, мг/кг с учетом кларка	Показатели вредности		
		транслокационный	миграционный	общесанитарный
Валовые формы				
Марганец	1500	3500	1500	1500
Ванадий	150	170	350	150
Свинец	30	35	260	30
Мышьяк	2,0	2,0	15,0	10
Ртуть	2,1	2,1	33,3	5,0
Медь	55			
Никель	85			
Цинк	100			
Подвижные формы				
Медь	3,0	3,5	72,0	3,0
Никель	4,0	6,7	14,0	4,0
Цинк	23,0	23,0	200,0	37,0
Кобальт	5,0	25,0	1000	5,0
Хром	6,0			6,0

Нормирование подразделяется на транслокационное (переход нормируемого элемента в растение), миграционное воздушное (переход в воздух), миграционное водное (переход в воду) и общесанитарно-гигиеническое (влияние на самоочищающую способность почвы и почвенный

микробиоценоз). ПДК загрязняющих веществ в почвах и допустимые уровни их содержания по показателям вредности подвергаются критике из-за того, что разрабатывались без учета свойств почв и трансформации соединений во времени. По ряду элементов имеется несогласованность в силу названных выше причин между ПДК и кларковым содержанием. Эти недостатки устранены в последнее время в принятых нормативных документах.

Нормирование загрязнения окружающей среды от выбросов предприятий при атмотехногенном воздействии реализуется только для атмосферного воздуха в виде определения предельно допустимого выброса (ПДВ). Разработка ПДВ при загрязнении другой природной среды – почвы – в настоящее время не осуществляется. Заметим при этом, что в общем случае наиболее эффективным является определение такого ПДВ, при котором не превышались бы ПДК ни в одной природной среде.

Важно подчеркнуть одну особенность, характерную для почв. Нормирование загрязнения в воздухе исходит из нормирования какой-то осредненной во времени концентрации. В почве происходит накопление загрязняющего вещества во времени.

Загрязнение почв максимально в непосредственной близости от источника и быстро убывает по мере удаления от него, причем загрязнение непрерывно увеличивается со временем его работы. Отсюда возникает проблема определения размеров санитарно-защитной зоны и точки поверхности почвы, которую следует выбрать в качестве исходной при расчете ПДВ. По-видимому, для этой цели следует принимать фиксированное расстояние в направлении преимущественного ветра, где начинаются участки земли, важные с хозяйственной или гигиенической точки зрения. Кроме того, при длительном воздействии источника формируется неоднородность распределения загрязнения в почве по вертикали. Отсутствие уверенности в вопросе о том, какой глубины слой почвы следует рассматривать, может привести к неопределенности ПДВ, при котором ПДК в почве не превышает.

Кратко особенности загрязнения почв пылевыми выбросами промышленных предприятий таковы:

- вносятся в почву через атмосферу, поверхностно;
- поток их на почву изменяется приблизительно обратно пропорционально расстоянию до источника выброса;
- обратный поток в атмосферу в первом приближении можно принять равным нулю;
- масштаб изменения концентрации загрязняющих веществ по вертикали в почвенном профиле мал (концентрация быстро уменьшается с глубиной, и все они сосредоточиваются в пахотном слое).

Учет этих особенностей позволяет существенно упростить задачу нормирования загрязнения почв атмотехногенными примесями. Поступление на почву загрязняющих веществ и их поведение в ней можно считать независимыми процессами без обратной связи, т. е., рассматривая систему почва - сопредельные среды (из которой исключена атмосфера), определить максимально допустимый поток загрязняющих веществ на поверхность почвы.

И уже затем, независимо, можно перейти к величине предельно допустимого выброса их в атмосферу (в сущности, потока в атмосферу), не приводящего к превышению установленного допустимого потока на почву. Этот последний переход осуществим на основе моделей рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере и выпадения их на подстилающую поверхность, в частности разработанных А. Я. Газиевым. В ней поток на подстилающую поверхность аэрозольной составляющей выбросов с осадками (вымывание) находится по формуле

$$P_M = \frac{M \cdot (1+L)}{2 \cdot \pi \cdot u \cdot R \cdot l_0} \left[l_1 \cdot \Delta t_{B1} \cdot \alpha \cdot \sum \delta_i \cdot \lambda_i \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot \lambda_i \cdot R}{u}\right) + l_2 \cdot \Delta t_{B2} \cdot \sum \delta_i \cdot \lambda_i \cdot \exp\left(\frac{\lambda_i \cdot R}{u}\right) \right], \quad (26)$$

где M – мощность выброса;

e – относительный вклад смешанных атмосферных осадков в их общее количество;

u – среднегодовая скорость ветра в атмосфере в слое распространения примеси;

R – расстояние до источника выброса;

l_0 – повторяемость направлений ветра при круговой розе ветров;

$l_{1,2}$ – повторяемость ветра данного румба в холодный и теплый периоды года соответственно;

$\Delta t_{B1}, \Delta t_{B2}$ – относительная (в долях года) продолжительность выпадений твердых и жидких осадков соответственно;

α – поправка на отличие в интенсивностях вымывания твердыми и жидкими осадками;

δ_i – доля массы примеси, приходящаяся на i -ю фракцию частиц;

λ_i – постоянная вымывания аэрозольных частиц i -го размера.

Сухой поток на почву находится по формуле

$$P_c = \sum (v_{i1} \cdot \Delta t_{c1} + v_{i2} \cdot \Delta t_{c2}) q_i, \quad (27)$$

где v_{i1} – скорость сухого осаждения в зимний период;

Δt_{c1} – относительная продолжительность залегания снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков в этот период;

v_{i2} – скорость сухого осаждения на лишенную снежного покрова подстилающую поверхность;

Δt_{c2} – относительная продолжительность отсутствия снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков в этот период;

q_i – среднегодовая массовая концентрация i -й фракции частиц в приземном слое атмосферы.

Суммарная нагрузка загрязняющих веществ за время действия источника t на почвенный слой глубиной h и плотностью ρ не должна превышать ПДК, т. е, должно соблюдаться выражение

$$(P_M + P_C) = P = \text{ПДК} \cdot h \cdot \rho / t. \quad (28)$$

Если суммарное содержание загрязняющего вещества в почве с учетом рассеивания в пахотном слое не должно превышать ПДК, лимитирующая доза пылевого выброса, поступающего в почву, определится выражением, аналогичным используемому в агротехнике (Касатиков В. А., 1989).

$$D = \frac{(\text{ПДК} - C_{\phi}) \cdot m}{C_B}, \quad (29)$$

где C_{ϕ} – исходное содержание загрязняющего вещества в почве, мг/кг;
 C_B – содержание загрязняющего вещества в пыли, мг/кг;
 m – масса пахотного слоя почвы в пересчете на сухое вещество.

Таким образом, проблема нормирования загрязнения почв техногенными примесями может быть решена с использованием рассмотренной методики. Однако для реализации методики необходимо решение ряда проблем, главной из которых является сравнение результатов модельных расчетов с результатами натуральных наблюдений содержания загрязняющих веществ в почвах в зонах влияния промышленных предприятий. За длительное время работы предприятия обычно меняется технология, как производства, так и выброса в атмосферу, поэтому точно оценить величину выброса и его состав достаточно сложно. Это приводит к существенной неопределенности модельных расчетов, поскольку данные параметры моделей являются определяющими. Тем не менее, почвы являются важной ресурсной составляющей в городах, и игнорирование нормирования атмосферного воздействия приводит к катастрофическим последствиям их загрязнения.

Рассмотренная методология прогнозирования, нормирования и оценки атмосферного воздействия источников загрязнения на окружающую среду может служить основой управления таким воздействием (рис. 1.1). При этом необходимо установить наиболее информативный и «уязвимый» элемент геохимического ландшафта (приземная атмосфера, снежный покров, почвенный слой), на который следует разрабатывать ПДВ.

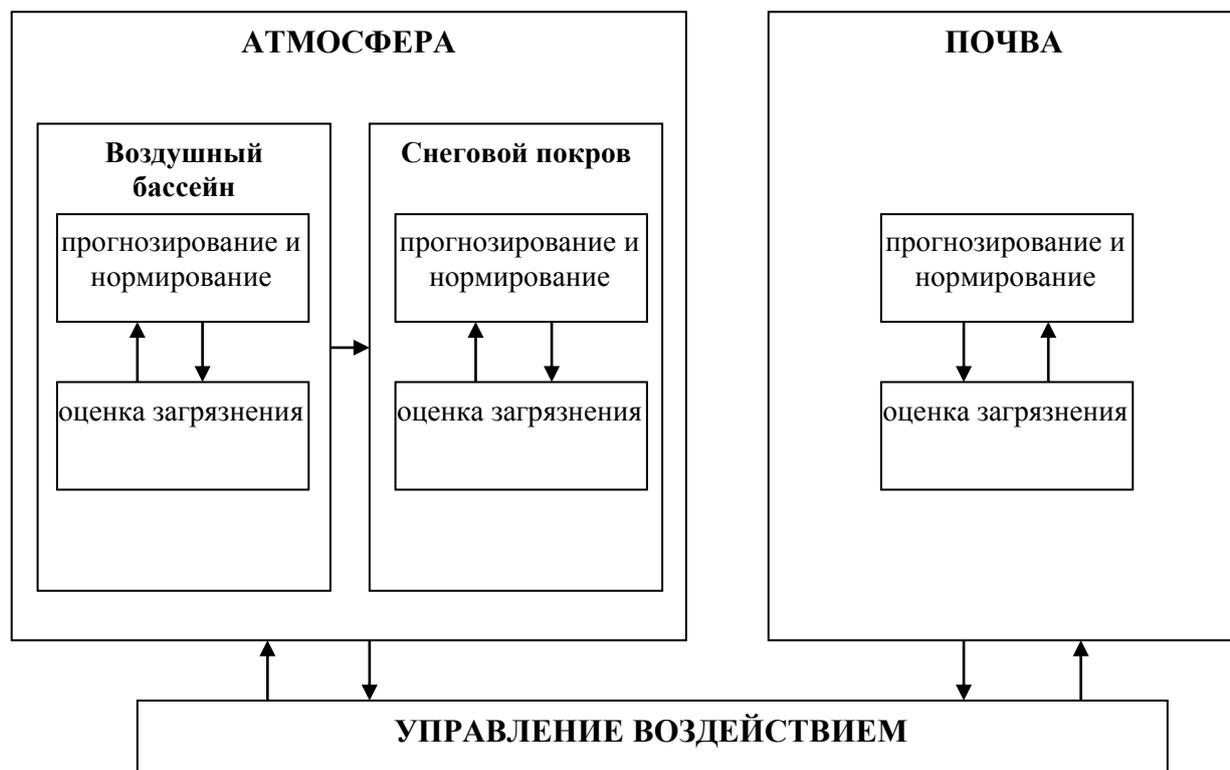


Рис. 1.1 Схема прогнозирования, нормирования и оценки атмосферного воздействия предприятий на окружающую среду

1.4. Миграция загрязняющих веществ через зону аэрации

Интенсивность загрязнения горизонта подземных вод определяется защитными свойствами зоны аэрации. Защищающая способность этой зоны зависит от многих факторов, которые можно разделить на две группы: ландшафтные и физико-химические.

К основным ландшафтным факторам относятся наличие в разрезе слабопроницаемых пород, их мощность и фильтрационные свойства, а также глубина залегания подземных вод. К слабопроницаемым породам, перекрывающим водоносный горизонт, относятся, главным образом, элювиально-делювиальные образования.

К физико-химическим факторам относятся взаимодействие загрязняющих веществ с породами зоны аэрации. В результате воздействия этих факторов происходит удаление загрязняющих веществ из водной фазы и задерживание их породой вследствие механико-физических, физико-химических и биогеохимических процессов.

Скорость движения металлов через глинистые породы определяется скоростью молекулярно-диффузионного и конвективного массопереносов, осложненных сорбцией.

Молекулярно-диффузионный перенос происходит в очень слабопроницаемых породах с коэффициентом фильтрации, составляющим 10^{-5}

м/сутки и менее. В этом случае исходное дифференциальное уравнение миграции вещества через зону аэрации имеет вид

$$q = -D_M \cdot \frac{dc}{dx}, \quad (30)$$

где q – удельный поток вещества;
 D_M - коэффициент молекулярной диффузии;
 dc/dx – градиент концентраций.

При условиях $C(0,t) = C_{\text{вх}}$ и $C(x,0) = C_e$ ($C_{\text{вх}}$ – концентрация на входе в зону аэрации, C_e – фоновая концентрация компонента) решение этого уравнения имеет вид

$$\bar{C} = \frac{C(x,t) - C_e}{C_{\text{вх}} - C_e} = \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{\frac{D_M \cdot t}{n}}}. \quad (31)$$

Связь между координатой точки x и временем t появления в этой точке заданной концентрации C в соответствии с формулой (31) выразится следующим образом

$$X = \sqrt{\frac{D_M \cdot t}{n}} \operatorname{erfc} \cdot (1 - \bar{C}), \quad (32)$$

$$t = \left\{ \frac{x}{\operatorname{erfc} \cdot (1 - \bar{C})} \right\}^2 \cdot \frac{n}{2 \cdot D_M}, \quad (33)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ – символ интеграла вероятности;
 $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$;
 $\operatorname{aerfc}(z)$ – обратная функция от $\operatorname{erfc}(s)$;
 n – пористость.

Поскольку значения коэффициента молекулярной диффузии в горных породах зоны аэрации малы $D_M = (1 - 10) \cdot 10^{-6}$ см²/с, то молекулярно-диффузионный перенос способен вызвать заметное перемещение вещества только за очень длительное время. В связи с этим роль молекулярной диффузии в переносе загрязнения невелика – она влияет лишь на выравнивание концентраций внутри поровых каналов в породе.

Конвективный перенос описывается уравнением

$$q = c \cdot V, \quad (34)$$

решение которого запишем

$$C(x,t) = f \cdot (t - xn/v), \quad (35)$$

где $f(t-xn/v)$ – единичная функция (при $t < xn/v$, при $t > xn/v$ $f = 1$ и $C = 1$).

Таким образом, при чисто конвективном переносе происходит полное («поршневое») вытеснение природных подземных вод зоны аэрации загрязненными с резким изменением содержания компонента от начальной концентрации ее до входной $C_{вх}$

К поглощению металлов в породе зоны аэрации при фильтрации загрязненных вод может привести, кроме собственно сорбционных процессов, также задержка их в закрытых «тупиковых» порах и ряд других явлений. Для суммарной оценки кинетики этих процессов используется уравнение

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{dC}{dt}, \quad (36)$$

где β – коэффициент распределения, который следует рассматривать как обобщенный параметр, определяемый опытным путем;

N – суммарное количество вещества, сорбированное и задержанное породой. Величина, обратная коэффициенту распределения, называется коэффициентом Генри $-K_r$.

Решением уравнений (30), (34) будут являться те же самые уравнения (31), (36) с заменой активной пористости неэффективную

$$n_{эф} = n + 1/\beta.$$

Кроме концентрации загрязняющих веществ, поступающих в водоносный горизонт через зону аэрации, для оценки интенсивности миграционных потоков необходимо определить также следующие характеристики:

- время достижения фильтрующимися с поверхности земли металлосодержащими водами уровня грунтовых вод;
- расход инфильтрующихся вод.

Их определение существенно различается в зависимости от режима увлажнения поверхности земли. При «мокроем» складировании отходов (хвосты и шламохранилища) в фильтрации через зону аэрации участвуют, кроме атмосферных осадков, еще и технические воды, большой расход которых довольно быстро (за 1-2 года) приводит к возникновению подпертого режима фильтрации. При инфильтрации через загрязнённые почвы и сухом складировании отходов расход воды в зоне аэрации обеспечивается только атмосферными осадками и поэтому носит сезонный характер. Количество этих вод относительно невелико, что определяет формирование свободного режима инфильтрационного питания.

Приближенная оценка времени достижения уровня грунтовых вод фильтрующимися сточными водами при мокром складировании отходов для условий однородного разреза зоны аэрации и постоянства уровня в хранилище может быть выполнена по формуле

$$t = \left(\frac{\mu \cdot H_0}{k} \right) \cdot \left[\frac{m}{H_0} - \ln \left(1 + \frac{m}{H_0} \right) \right], \quad (37)$$

где H_0 – высота столба сточных вод в хранилище;

k и m – соответственно коэффициент фильтрации и мощность зоны аэрации;

μ – недостаток насыщения пород зоны аэрации ($\mu = n - n_e$);

n – пористость;

n_e – начальная влажность пород зоны аэрации. Поскольку n_e обычно неизвестно, то вместо μ при расчете можно использовать значение n .

Расчеты по формуле (37) показали, что время проникновения стоков до грунтовых вод существенно зависит от фильтрационных свойств пород зоны аэрации, но в целом это время невелико. Так, при $k = 0,5$ м/сут время движения стоков не превышает нескольких суток даже при относительно большой мощности зоны аэрации ($m > 10$ м); при $k < 0,5$ м/сут время фильтрации возрастает до нескольких десятков суток, при $k \ll 0,01$ м/сут и $m > 20$ м больше первых сотен суток.

При двухслойном строении зоны аэрации со слабопроницаемым верхним слоем (экраном) время инфильтрации стоков с поверхности земли до уровня грунтовых вод складывается из времени движения в верхнем (t_1) и нижнем (t_2) слоях. Время (t_1) определяется по формуле (37) с использованием параметров k_1 и m_1 для верхнего слоя. Время t_2 определяется по следующей формуле

$$t_2 = \frac{n_2 \cdot H_0}{k_2} \left\{ \frac{m_2}{H_0} \left[l \frac{m_1}{H_0} \left(\frac{k_2}{k_1} l \right) \right] \ln \left(1 + \frac{m_2}{H_0 + m_1} \right) \right\}, \quad (38)$$

где n_2 , m_2 , k_2 – соответственно пористость, мощность и коэффициент фильтрации нижнего, относительно хорошо проницаемого слоя.

Анализ показал, что при $k_1/k_2 < 0,1$ время движения в двухслойном разрезе в основном определяется временем движения через верхний, слабопроницаемый слой. Поэтому для приближенной оценки времени движения стоков через двухслойный разрез можно ограничиться определением по формуле (37) времени движения стоков через слабопроницаемый слой путем подстановки в эту формулу параметров слабопроницаемого слоя. В случае неоднородного слоистого строения зоны аэрации возможен другой приближенный подход: приведение неоднородного разреза к однородному со средним коэффициентом фильтрации, определяемым по формуле

$$k_c = \frac{m}{\left(\frac{m_1}{k_1} + \frac{m_2}{k_2} + \dots + \frac{m_i}{k_i} \right)}, \quad (39)$$

где m_1, m_2, \dots, m_i и k_1, k_2, \dots, k_i – соответственно мощности и коэффициенты фильтрации слоев;

m – мощность зоны аэрации ($m = m_1 + m_2 + m_3$).

При фильтрации с поверхности земли сточных вод, сбрасываемых с постоянным расходом (Q в приемник площадью F), могут быть два случая. Если $q \geq k$, то на поверхности земли образуется изменяющийся во времени столб сточных вод $H_0 = f(t)$ и время фильтрации до уровня грунтовых вод может быть определено по формуле

$$t = \frac{m}{\frac{(1-n) \cdot k}{2 \cdot n} + \sqrt{\frac{(1-n)^2 \cdot k^2}{4 \cdot n^2} + \frac{q \cdot k}{n}}}, \quad (40)$$

если $q \leq k$,

где k – коэффициент фильтрации пород зоны аэрации в случае однородного разреза, а $q = Q/F$, то попадающие на поверхность земли воды полностью идут на фильтрацию, не образовав на поверхности столба воды ($H_0 = 0$), что характерно для объектов сухого складирования отходов или инфильтрации атмосферных осадков через зону аэрации. В этом случае время достижения стоками уровня грунтовых вод может быть определено по формуле

$$t = \frac{m \cdot n}{\sqrt[3]{q^2 \cdot k}}. \quad (41)$$

Фильтрационный расход для хранилищ изометричной формы радиуса R_k при мокром складировании отходов определяется в зависимости от однородности водоносного пласта. Для однородного водоносного пласта

$$Q_\phi = \frac{k \cdot m \cdot H_0}{0,366 \cdot l g \cdot (R/R_k)}, \quad (42)$$

где R – расстояние от центра хранилища до контура питания водоносного горизонта (реки). Для двухслойного пласта

$$Q_\phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot m_2 \cdot H_0}{[\theta(\lambda)]}, \quad (43)$$

где

$$\theta(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{[\lambda \cdot I_1(\lambda)]},$$

$$\lambda = R_k \sqrt{\frac{k_1}{(k_2 \cdot m_2 \cdot m_1)}};$$

I_0 и I_1 – функции Бесселя мнимого аргумента соответственно нулевого и первого порядков.

При $R_k \geq 5 \sqrt{\frac{k_2 \cdot m_2 \cdot m_1}{k_1}}$ имеем $I_0(\lambda) \approx I_1(\lambda)$, и тогда

$$Q_{\phi} \approx 2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot m_2 \cdot H_0 \cdot R_k \sqrt{\frac{k_1}{(k_2 \cdot m_2 \cdot m_1)}}. \quad (44)$$

При свободном режиме инфильтрационного питания подземных вод (объекты сухого складирования отходов или почвенные геохимические аномалии) расход сточных вод через зону аэрации будет определяться её фильтрационными свойствами. Если выполняется соотношение $q \geq k$, то удельный расход будет равен коэффициенту фильтрации $q = k$. Если $q \leq k$ расход через зону аэрации определится соотношением

$$Q_{\phi} = L \cdot S \cdot q \cdot (k). \quad (44)$$

Приведённые аналитические решения показывают, что интенсивность потоков загрязняющих веществ с поверхности до уровня подземных вод зависит от физических и физико-химических (миграционных) параметров зоны аэрации.

К параметрам, необходимым для расчетов уровней загрязнения подземных вод, относятся коэффициент фильтрации K_{ϕ} , активная пористость породы n , коэффициент молекулярной диффузии D_m и коэффициент распределения β .

Определение K_{ϕ} , n и β глинистых образований удобно на приборе ПФ, схема установки которого представлена на рис. 1.2, а. Методика определения коэффициента фильтрации достаточно хорошо известна. Для опытов по определению активной пористости необходимо поддерживать постоянную скорость фильтрации, желательна близкую к скорости фильтрации из источника загрязнения. Через исследуемый образец пропускается раствор NaCl с концентрацией хлорида, равной $C_{вх}$, и на выходе определяется текущая концентрация C_t в зависимости от времени с построением графика в координатах $C_{от}$ - t (рис. 1.3, а, кривая 1).

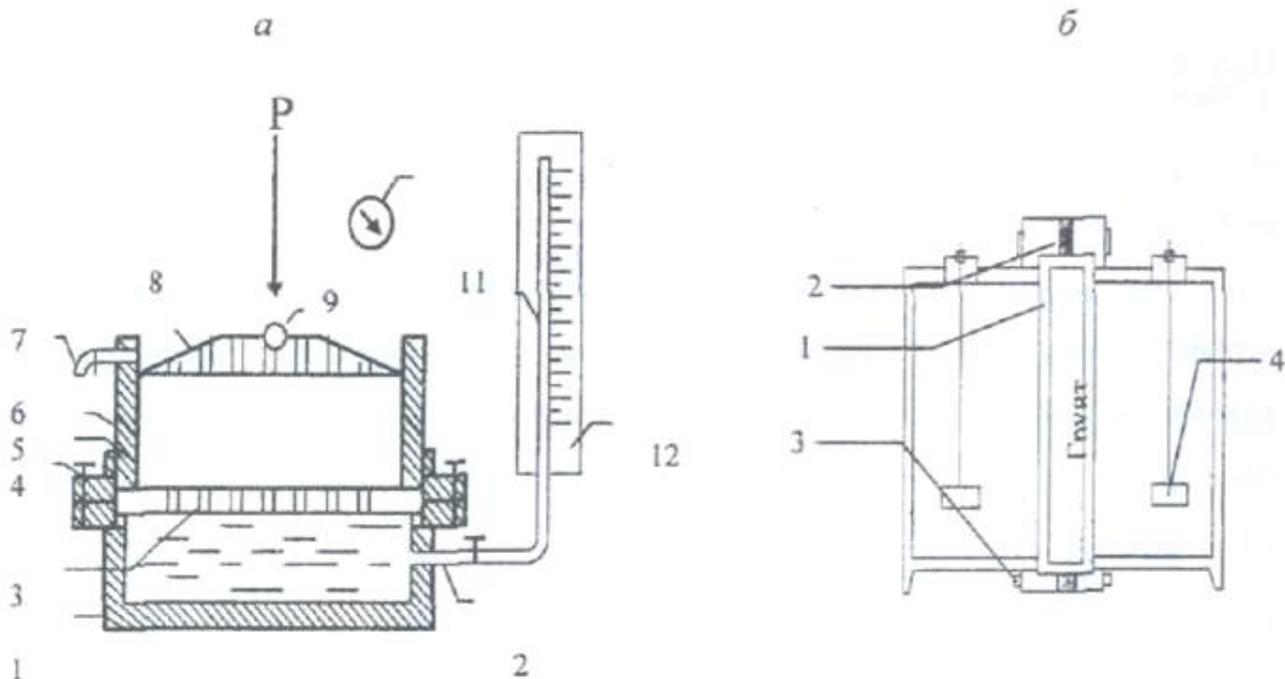


Рис. 1.2 Лабораторная база

для определения миграционных параметров зоны аэрации:

- а - компрессионно-фильтрационный прибор: 1 - база; 2 - штуцер; 3 - решетка; 4 - фланцы с болтами; 5 - кольцо; 6 - направляющий цилиндр; 7 - сливная трубка; 8 - дырчатый штамп; 9 - стальной шарик; 10 - индикатор; 11 - пьезометрическая трубка; 12 - деревянная панель со шкалой;
- б - диффузионный прибор: 1 - перфорированная обойма; 2, 3 - зажимы; 4 - мешалка

По времени достижения половинной концентрации в фильтрате $t_{c=0,5}$ определяется активная пористость по формуле

$$n = \frac{V}{l} \cdot t_{c=0,5}, \quad (46)$$

где $t_{c=0,5}$ – время, при котором концентрация исследуемого компонента в фильтрате составляет $C_{от} = 0,5$ (за $t = 0$ принимается момент входа загрязненной воды в образец породы);

$C_{от}$ – относительная концентрация ($C_{от} = C_T / C_{вх}$, где C_T – текущая концентрация вещества в фильтрате);

$C_{вх}$ – входная концентрация вещества – на входе раствора в образец породы;

V – скорость фильтрации;

l – длина образца.

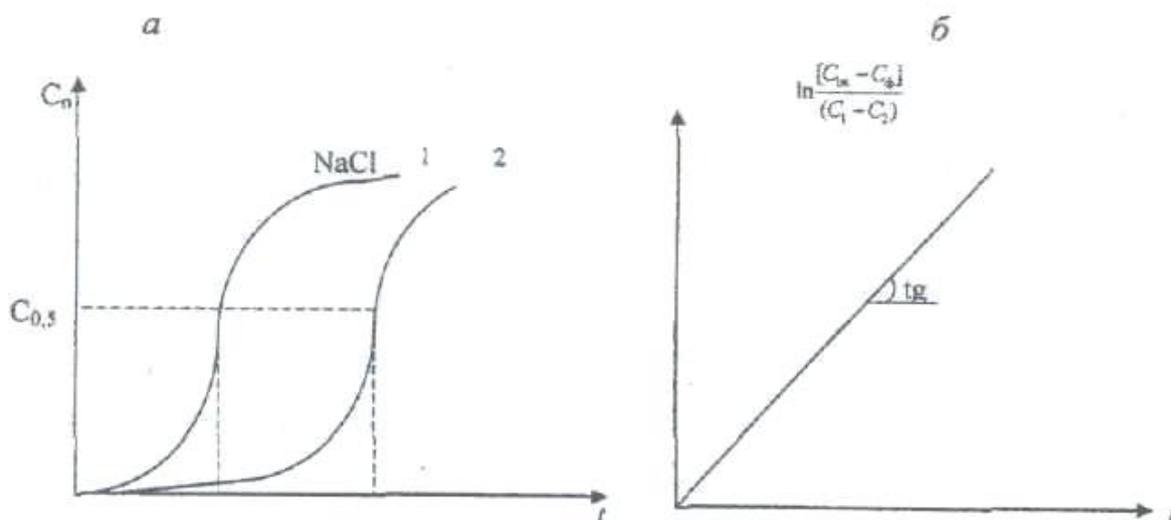


Рис. 1.3 Характерные графики

для определения миграционных параметров зоны аэрации
 а - коэффициента распределения; б - коэффициента молекулярной диффузии

При определении коэффициента распределения используется та же методика, что и для активной пористости. Через исследуемый образец пропускают раствор NaCl с концентрацией хлорида, равной $C_{вх}$ и на выходе определяют текущую концентрацию C_t в зависимости от времени с построением графика в координатах $C_{от} - t$. Затем через образец пропускают раствор исследуемого сорбирующегося компонента с фиксацией на выходе его концентрации в зависимости от времени и построением графика $C_{от.к.с} - t$ (рис. 1.3, а, кривая 2). По графику при концентрации $C_{от}$ и $C_{от.к.с}$, равной 0,5, определяется время задержки прихода половинной концентрации в растворе сорбирующегося компонента относительно несорбирующегося Δt . Коэффициент распределения определяется по формуле

$$\beta = \frac{n \cdot l}{V \cdot \Delta t}, \quad (47)$$

где V – скорость фильтрации;
 l – длина образца.

Для определения коэффициента молекулярной диффузии D_m удобно использовать двухкамерную диффузионную установку (см. рис. 1.2, б). В ходе опыта в один сосуд (ячейку) заливается фоновый раствор или дистиллированная вода, а во второй - раствор диффундирующего вещества с концентрацией, соответствующей содержанию этого вещества в поверхностном источнике загрязнения. Объемы обоих сосудов равны. Между сосудами помещается образец фунта, через который осуществляется диффузионный перенос вещества. После истечения некоторого времени (1-3 сут) производится отбор проб воды из обеих ячеек и их анализ. Затем процедура повторяется.

Строится график в координатах $\ln[(C_{\text{вх}} - C_{\text{ф}})/C_1 - C_2] - t$ (рис. 1.3, б). Значение D_m , вычисляется по формуле

$$D_m = \frac{\text{tg}\varphi(W_1 + W_2) \cdot L}{F}, \quad (48)$$

где $\text{tg}\varphi$ – тангенс угла наклона графика $\ln[(C_{\text{вх}} - C_{\text{ф}})/C_1 - C_2] - t$ к оси абсцисс;

W_1 и W_2 – объемы первой и второй ячеек;

L – длина образца;

F – площадь поперечного сечения образца.

1.5. Миграция загрязняющих веществ в подземных водах

Загрязняющие вещества в подземных водах зоны насыщения перемещаются преимущественно потоками фильтрующих вод, гидродинамические поля которых в основном определяют траектории миграции и формирование пространственной структуры ореолов загрязнения. При схематизации пространственной структуры фильтрационного потока допускается пренебрежение нормальной напластованию компоненты скорости фильтрации. Целесообразность такого подхода не исключается и при описании миграционных процессов. Плановая фильтрационная модель позволяет в первом приближении заменить двухмерную модель одномерной. Применение одномерных моделей наиболее корректно при незначительных мощностях водоносного горизонта, измеряемых первыми десятками метров.

Для прогнозирования движения загрязнения необходимо также схематизировать гидрогеологические условия территории по режиму фильтрации, неоднородности, напорам, граничным условиям, миграционным параметрам и на основе этого принять схему расчета.

В подземных водах зоны интенсивного водообмена основной формой переноса загрязнения является вынужденная конвекция мигрантов с движущимися частицами в потоке. При описании конвективного переноса используется схема поршневого вытеснения, при котором усредняются скорости течения во внутриводном и трещинном пространстве. При расчетах можно учесть и другие параметры водоносного горизонта, такие как гидро дисперсия, фильтрационная неоднородность и ряд других с использованием соответствующих аналитических решений или моделирования.

Прогнозируемыми характеристиками являются концентрация загрязняющих веществ в подземных водах, дальность их распространения, время, за которое загрязненные подземные воды достигнут ближайших водоёмов и водотоков, где происходит их разгрузка.

Концентрация загрязняющих веществ в подземных водах под техногенно-минеральными образованиями (ТМО) в любой год его эксплуатации с мокрым складированием отходов составляет

$$C = \frac{(W_0 \cdot C_\phi + W_q \cdot C_\phi + W_c \cdot C_c)}{W_0 + W_q + W_c}, \quad (49)$$

где C_ϕ – концентрация вещества в грунтовых водах до начала эксплуатации ТМО;

W_0 – общий объем грунтовых вод под ТМО ($W_0 = LShn$);

W_q – объем чистых грунтовых вод, которым частично замещается объем загрязненных грунтовых вод за период T ($W_q = ShTV_e$);

W_c – объём сточных вод, поступающих через зону аэрации до уровня грунтовых вод ($W_c = Q_\phi T$);

C_c – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах на подошве зоны аэрации;

L и S – длина и ширина ТМО;

h – мощность водоносного горизонта;

n – пористость водоносного горизонта;

V_e – скорость фильтрации.

Расчетная зависимость для прогноза изменения во времени концентрации загрязняющих веществ под ТМО сухого складирования отходов и почвенных геохимических аномалий с сезонным инфильтрационным питанием подземных вод в j -й год его эксплуатации имеет вид

$$C_j = \frac{(W_{oc} \cdot C_{j-1} + W_q \cdot C_\phi + W_c \cdot C_c)}{W_0 + W_c}, \quad (50)$$

Концентрация загрязняющих веществ после инфильтрационного периода в первый год

$$C_j = \frac{(W_0 \cdot C_\phi + W_c \cdot C_c)}{W_0 + W_c}, \quad (51)$$

где C_j – концентрация загрязняющих веществ в грунтовых водах под ТМО или почвенной геохимической аномалией в любой j -й год после начала его эксплуатации;

C_{j-1} – концентрация загрязняющих веществ в грунтовых водах в предыдущем году;

W_{oc} – объем загрязненных грунтовых вод, оставшихся под ТМО или почвенной геохимической аномалией после их вытеснения чистыми водами в межсезонный период ($W_{oc} = Shn(L - V_e T/n)$).

Особенность расчетов по формулам (50) и (51) заключается в следующем. Концентрация загрязняющих веществ в грунтовых водах на последующий год определяется по концентрации предыдущего года. Следовательно, для прогноза концентрации загрязнения на j -й год после начала эксплуатации необходимо выполнить предварительные ($j-1$) расчеты, начиная с первого года. Например,

для определения концентрации на десятый год после начала эксплуатации ТМО надо знать концентрацию загрязняющих веществ в предыдущем, т. е. девятом, году. Определив по формуле (51) концентрацию загрязнения в первый год, можно по формуле (50) последовательно оценить концентрацию на второй, третий, четвертый и все последующие годы, вплоть до требуемого.

Расстояние x , на которое переместятся загрязненные воды за время t от линейного источника загрязнения

$$x = \frac{V \cdot t}{n_{\text{эф}}}. \quad (52)$$

Если источник загрязнения имеет круглую форму (в этом случае он может быть заменен круговой галереей с расходом, равным расходу фильтрующихся вод), расстояние x , на которое переместятся загрязненные воды по пласту за время t под влиянием фильтрационного расхода ($Q_{\text{ф}}$) и естественного движения подземных вод (V_e) _{t} приближенно определяется по формуле

$$x = \sqrt{\frac{R_k^2 + Q_{\text{ф}} \cdot t}{\pi \cdot n \cdot m}} + \frac{V_e \cdot t}{n} - R_k. \quad (53)$$

Вверх по потоку подземных вод распространение загрязнения ограничено. Используя формулы (52), (53), можно оценить время, за которое загрязненные подземные воды достигнут ближайших водоемов и водотоков, в которые разгружаются подземные воды.

Фильтрационный расход загрязнённых подземных вод, поступающих в поверхностные воды, может быть определён гидродинамическим, балансовым или гидрологическим методами.

Подземные воды по характеру движения и разгрузки подразделяются на:

- подземные воды в зонах депрессионных воронок рудничного водоотлива;
- подземные воды, каптированные локальными источниками децентрализованного водоснабжения;
- подземные воды, находящиеся в естественных условиях движения, разгрузка которых происходит в гидрографическую сеть.

В первом случае загрязняющие вещества, поступившие с поверхности в подземные воды, попадают в рудничный водоотлив, а затем участвуют в обратном цикле технического водоснабжения предприятия или сбрасываются в местную гидрографическую сеть. Интенсивность их миграции при этом значительна, так как под воздействием рудничного водоотлива сформировались весьма обширные депрессионные воронки, составляющие десятки и сотни квадратных километров.

Во втором случае загрязняющие вещества могут попасть в систему питьевого или технического водоснабжения, что приведет к их загрязнению.

В третьем случае происходит естественное движение загрязненных подземных вод к местному базису дренажа и разгрузка в него. Подземные воды

здесь можно рассмотреть как среду транзита загрязнения от поверхности земли до гидрографической сети.

Различные гидродинамические условия определяют целевое назначение нормирования воздействия на подземные воды. При этом наиболее жёсткие требования могут быть предъявлены в третьем случае, так как подземные воды являются здесь связующим звеном в системе поверхность - водный объект.

От количества загрязняющих веществ, поступающих с инфильтрационными водами из ТМО или почвенных геохимических аномалий, зависит их содержание в подземных водах. Поэтому вопрос о регулировании интенсивности загрязнения имеет важное практическое значение.

Предельно допустимый сброс загрязняющих веществ в подземные воды определяется исходя из того, что их содержание в подземных водах под ТМО или почвенной геохимической аномалией не должно превысить заданный максимальный предел. Максимальное содержание металлов в подземных водах может быть принято равным ПДК определённой категории водопользования (табл. 1.8).

Фильтрация сточных вод из ТМО происходит не только во время его эксплуатации, т. е. в течение периода сброса в него отходов и его заполнения, но и в течение некоторого времени после прекращения сброса в него отходов. То же относится и к почвенным геохимическим аномалиям. Расчетный срок T наращивания концентрации загрязняющего вещества в подземных водах под ними.

$$T = T_3 + T_p,$$

где T_3 – срок работы ТМО (время, в течение которого будет производиться сброс в него отходов) или время формирования почвенной геохимической аномалии;

T_p – время, в течение которого после прекращения сброса загрязняющих веществ в ТМО происходит их вынос или время разрушения почвенной геохимической аномалии.

Заданная максимальная концентрация загрязняющего вещества в подземных водах, исходя из которой находится предельная его концентрация в инфильтрационных водах, определяется с учетом смешения фильтрующихся сточных вод с подземными водами под ТМО или почвенной аномалией и последующим отжатием образующейся смеси загрязненных вод естественным потоком подземных вод.

Принимается следующая упрощенная схема этого процесса. ТМО или почвенная геохимическая аномалия схематизируются в виде квадрата, одна из сторон которого ориентирована по направлению потока подземных вод.

Предельно допустимые концентрации металлов в водах

Элемент	Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения по СанПину 2.1.4.559-96, мг/дм ³		
	показатель вредности		класс опасности
	санитарно-токсикологический	органолептический	
Fe		0,3	3
Mn		0,1	3
Cr	0,05		3
Ni	0,1		3
Cu		1,0	3
Zn		5,0	3
Pb	0,03		2
Cd	0,001		2
Hg	0,0005		1
As	0,05		2

Примечание: Классы опасности: 1 класс – чрезвычайно опасные; 2 класс – высокоопасные; 3 класс – опасные.

Годовой объем фильтрующихся сточных вод попадает в водоносный горизонт в самом начале года, а затем в течение года происходит отжатие смеси загрязненных вод естественным потоком подземных вод. В начале следующего года очередной годовой объем фильтрующихся сточных вод смешивается с оставшейся под ТМО от предыдущего года частью объема загрязненных вод и объемом вновь поступивших с естественным потоком чистых подземных вод. После смешения в течение года происходит отжатие естественным потоком подземных вод образовавшегося объема загрязненных вод и далее до конца расчетного срока Т. В указанной схеме предполагается, что длина пути, проходимого подземными водами по пласту за 1 год, значительно меньше длины стороны ГО, что имеет место в большинстве случаев, так как скорость движения подземных вод обычно мала, а размеры ТМО или почвенных геохимических аномалий значительны.

Инфильтрационные воды загрязняют, прежде всего, верхнюю часть водоносного горизонта, а затем загрязнение распространяется вглубь. В водоносных пластах небольшой мощности загрязнение захватывает всю мощность водоносного горизонта, а в горизонтах большой мощности – преимущественно его верхнюю и среднюю части. Поэтому принимается, что смешение инфильтрационных вод с подземными происходит по всей мощности водоносного горизонта, если она не превышает 20 м, на 80 % мощности, если она составляет 20-40 м, и на 70 % мощности, если она превышает 40 м.

Расчетная формула для определения предельно допустимого сброса (ПДС) загрязняющего вещества в т/год получена на основе решения уравнения

(49). Для упрощения расчетов нелинейная зависимость концентрации вещества в подземных водах от времени заменена прямолинейной. Также при расчете можно пренебречь различиями физических свойств (плотность, вязкость) сточных и подземных вод и физико-химическими процессами взаимодействия между водами и породой.

С учетом этого расчетная формула принимает вид

$$\text{ПДС} = \left\{ C_{\text{макс}}(\alpha m L^2 + W_c) - \alpha m L \left[X_0 C + (L \cdot n - X_0)(C_{\text{макс}} - C) \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}, \quad (54)$$

где $C_{\text{макс}}$ – максимальная заданная концентрация загрязняющего вещества в подземных водах под ТМО или почвенной геохимической аномалией, мг/дм³;

C – содержание загрязняющего вещества в подземных водах в естественных условиях, мг/дм³;

m – мощность водоносного горизонта, м;

α – безразмерный коэффициент учета мощности водоносного горизонта при смешении фильтрующихся сточных вод с подземными водами ($\alpha = 1$ при $m \leq 20$ м, $\alpha = 0,8$ при $20 \text{ м} < m < 40$ м, $\alpha = 0,7$ при $m \geq 40$ м);

L – длина стороны ТМО или почвенной геохимической аномалии, м;

n – пористость водоносных пород, безразмерная величина;

W_c – годовой объем сточных вод, фильтрующихся из ТМО или почвенной геохимической аномалии, м³;

$X_0 = 365 K_{\phi} I_e$, м;

K_{ϕ} – коэффициент фильтрации водоносных пород, м/сут;

I_e – уклон естественного потока подземных вод, безразмерная величина;

T – расчетное время (число лет), на конец которого концентрация загрязняющего вещества в подземных водах не должна превысить значение $C_{\text{макс}}$.

С использованием формулы (54) возможно нормирование воздействия инфильтрационных (сточных) вод на подземные воды. Оно необходимо тогда, когда прогнозные концентрации в подземных водах превысят ПДК для одной из категорий водопользования.

1.6. Миграция загрязняющих веществ в поверхностных водах

Количественная оценка воздействия рассмотренных источников на поверхностные воды сводится к прогнозу содержания загрязняющих веществ в последних и определению величины предельно допустимых сбросов. Расчетный метод определения условий отведения сточных вод в водные объекты производится на основе уравнения баланса, учитывающего фоновую концентрацию, гидравлические и гидрометрические особенности водного объекта, возможную степень разбавления сточных вод, сорбционные процессы в водоёме и ряд других факторов, влияющих на содержание загрязняющих веществ. В результате рационального выделения и разумной аппроксимации

существенных процессов моделируемое явление представляется в виде некоторой эквивалентной ему системы уравнений. Полученные уравнения, обычно дифференциальные, допускают последующую численную реализацию. При формировании типа аналитической модели, прежде всего, учитывается характер загрязнения, т. е. является оно консервативным или нет. Так как металлы являются консервативными веществами, загрязнение ими заменяется, в сущности, исследованием гидравлического типа. При этом считается, что процессы сорбции или процессы седиментации не являются существенными.

Пространственное распределения загрязняющих веществ в потоке реки, а также его изменения во времени, где, в сущности, моделируются процессы перемешивания, производится на основе уравнений турбулентной диффузии. Распределение растворенных и взвешенных веществ в потоке может быть описано уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} + U_z \frac{\partial c}{\partial z} = A \frac{g}{\gamma} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) - u \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (55)$$

где A – коэффициент турбулентного обмена;

γ – удельный вес воды;

g – ускорение силы тяжести;

u – гидравлическая крупность частиц;

U_x, U_y, U_z – компоненты скорости течения относительно координат x, y, z .

Во многих случаях река проявляет себя как одномерная структура, поэтому процесс распространения загрязняющих веществ приближенно можно рассматривать как одномерный. При этом изменение концентрации как показателя качества воды рассматривается только для створов полного перемешивания, а процессы диффузии либо вообще не рассматриваются, либо проявляются в виде продольной дисперсии загрязняющего вещества.

Распределение загрязняющих веществ по сечению реки может быть неравномерным на значительном расстоянии от места выпуска сточных вод. Для нормирования сбросов необходимо знать соотношение максимальной и средней концентраций загрязняющего вещества в сечении потока. При этом важно установить расстояние от места выпуска до створа полного перемешивания. Распределение концентраций может быть приближенно найдено с помощью метода расчета разбавления сточных вод в реках и представлено в нормативных документах по расчёту ПДС.

1.6.1. Разбавление сточных вод в реках

Разбавление, хотя оно и приводит к уменьшению концентрации загрязняющих ингредиентов, само по себе не следует рассматривать как фактор самоочищения потока потому, что суммарное количество загрязняющего вещества в потоке не уменьшается. Для водотоков используются в основном

два метода расчета кратности разбавления n и коэффициента смешения g - метод ВНИИВОДГЕО и метод ТЛИ.

Метод ВНИИВОДГЕО применяется при выполнении следующего условия:

$$\frac{q}{Q} = 0,1 - 0,0025, \quad (56)$$

где Q – расход реки года 95 % -ной водной обеспеченности;
 q – расход сточных вод.

Коэффициент смешения, показывающий, какая часть речного стока участвует в разбавлении сточных вод, находится по формуле

$$g = \frac{1-B}{1+Q \cdot \frac{B}{q}}, \quad (57)$$

где B – безразмерный коэффициент, определяемый по формуле

$$B = e^{-\alpha \sqrt[3]{x}}, \quad (58)$$

где x – расстояние от выпуска до контрольного створа (для рыбохозяйственных водоемов не более 500 м);

α – коэффициент, учитывающий гидравлические условия смешения.

$$\alpha = \gamma \cdot \varphi \sqrt[3]{\frac{D}{q}}, \quad (59)$$

где γ – коэффициент, зависящий от расположения выпуска вод в водоток (при выпуске у берега он равен 1,0, а в стрелке реки 1,5);

φ – коэффициент извилистости, равный отношению расстояния по фарватеру x от места выпуска до контрольного створа по прямой;

D – коэффициент турбулентной диффузии, определяемый по формулам для летних условий

$$D = \frac{q \cdot V \cdot H}{M \cdot C}, \quad (60)$$

для зимних условий

$$D = \frac{q \cdot V \cdot H}{74 \cdot n_{\text{пр}} \cdot C}, \quad (61)$$

где M – функция коэффициента Шези ($M = 0,7C + 6$ при $C < 60$ и $M = 48$ при $C > 60$);

C – коэффициент Шези;

$n_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент шероховатости;

V – скорость, м/с;

H – глубина, м.

После расчета коэффициента смешения можно определить кратность разбавления:

$$n = 1 + \frac{Q_{95} \cdot g}{q} \quad (62)$$

Метод расчета кратности разбавления ТЛИ основан на аналитическом решении уравнения турбулентной диффузии

$$n = \frac{H\sqrt{\pi}VD_yX}{q} \left\{ erf \left(\frac{b\sqrt{V}}{2\sqrt{D_yX}} \right) + erf \left(\frac{(B-b)\sqrt{V}}{2\sqrt{D_yX}} \right) \right\} + 1, \quad (63)$$

где b – расстояние от берега до выпуска сточных вод (при береговом выпуске равно 0);

B – ширина реки;

D_y – коэффициент дисперсии в поперечном сечении;

H – средняя глубина реки года 95 %-ной водной обеспеченности;

X – расстояние до контрольного створа;

V – средняя скорость течения реки на данном участке в год 95 %-ной водной обеспеченности.

Для рек шириной до 50-60 м коэффициент смешения в поперечном сечении рекомендуется определять по формуле

$$D_y = \frac{41,6 \cdot R \cdot W}{(Re)}, \quad (64)$$

где R – гидравлический радиус (с известной степенью допустимости можно принять для летних условий равным глубине реки; для зимних условий - половине глубины);

W – динамическая скорость, определяемая по формуле

$$W = \frac{V\sqrt{g_m}}{C}, \quad (65)$$

где g_m – ускорение силы тяжести;

C – коэффициент Шези. Он определяется по формуле

$$C = \frac{1}{n_{пр}} \cdot R^y, \quad (66)$$

где $n_{пр}$ – приведенный коэффициент шероховатости;

y – коэффициент, определяемый по формуле

$$y = 2,5\sqrt{n_{\text{пр}}} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(n_{\text{пр}} - 1), \quad (67)$$

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{ш}}[1 + \beta^{1,5}]^{0,67}, \quad (68)$$

где $n_{\text{ш}}$ – коэффициент шероховатости для открытых русел, определяемый по специальным таблицам

$$\beta = \frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ш}}}, \quad (69)$$

где $n_{\text{л}}$ – коэффициент шероховатости льда (для периода конец февраля - начало марта равен 0,04-0,015);

Re – число Рейнольдса, определяемое по формуле

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu}, \quad (70)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воды. Его можно вычислить по формуле

$$\nu = \frac{0,1178}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00021(T)^2}, \quad (71)$$

где T – температура воды.

1.6.2. Прогноз и анализ концентрации загрязняющих веществ в реках

При наличии множества источников поступления загрязняющих веществ в поверхностные воды прогнозное содержание i -го вещества в створе полного перемешивания (контрольном створе) реки определится по формуле

$$C_{\text{к.ст}} = C_{\text{ф}} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{СТ1}}^i - C_{\text{ф}}}{n_1} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{СТ2}}^i - C_{\text{ф}}}{n_2} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{СТ3}}^i - C_{\text{ф}}}{n_3} + C_{\text{д.от}}, \quad (72)$$

где $C_{\text{ф}}$ – фоновое содержание i -го вещества; второй член уравнения характеризует суммарное поступление загрязняющих веществ со сбросами сточных вод; третий - с подземными водами; четвертый - с поверхностным стоком с площади геохимических аномалий и ТМО; пятый – приращение концентраций в поверхностных водах за счёт поступления из донных отложений. Если первый источник загрязнения является «явным», т. е. предприятие отчитывается за него, то остальные члены уравнения, имеющие наибольший вклад в загрязнение рек, практически не учитываются.

Прогнозная концентрация загрязняющих веществ в контрольном створе реки должна отвечать достаточно жёстким требованиям рыбохозяйственных

ПДК, так как все водные объекты Среднего Урала используются для рыбохозяйственных целей (табл. 1.9).

При расчёте допустимой концентрации в контрольном створе реки, сбрасываемые вещества группируются по лимитирующему признаку вредности (ЛПВ). Металлы для водоемов рыбохозяйственного значения относятся к токсикологическому или санитарно-токсикологическому ЛПВ.

Таблица 1.9

ПДК для поверхностных водоемов,
используемых для рыбохозяйственных целей, мг/дм⁵

Элемент	Лимитирующий признак вредности	
	токсикологический	санитарно-токсикологический
Fe	0,01	
Mn	0,01	
Cr	-	0,001
V	0,001	
Ni	0,01	
Co	0,01	
Cu	0,001	
Zn	0,01	
Pb	0,1	
Cd	0,005	
Hg	0,00001	
As	0,05	

Если вещества относятся к одному ЛПВ, то для определения допустимой нагрузки загрязняющих веществ на водоток необходимо применять принцип аддитивности, который учитывает полное суммирующее экологическое воздействие каждого из этих веществ

$$D = \frac{\sum C_{к.ст}}{\sum ПДК} < 1, \quad (73)$$

где D – коэффициент суммирующего воздействия нескольких веществ одного признака вредности.

Если это выражение больше 1, то за предельно допустимую концентрацию в контрольном створе необходимо принять долю ПДК

$$\frac{\sum C_{к.ст}}{\sum ПДК} = D. \quad (74)$$

Предельно допустимая концентрация i-го вещества в контрольном створе с учетом аддитивности определяется из выражения

$$C_{\text{пр.доп.к.ст}}^i = \frac{C_{\text{к.ст}}^i}{D}. \quad (75)$$

1.6.3. Нормирование воздействия загрязняющих веществ на водные объекты

Согласно работе, если для всех сбросов сточных вод расчетная концентрация i -го вещества в контрольном створе $C_{\text{к.ст}}$ меньше ПДК или доли ПДК с учётом аддитивности, то за допустимую концентрацию данного вещества в сбросе принимают его фактическую концентрацию: $C_{\text{доп.ст}}^i = C_{\text{ст}}^i$.

Если $C_{\text{к.ст}}$ больше ПДК, то допустимая концентрация вещества в сбросе рассчитывается по формуле для консервативных веществ

$$C_{\text{доп.ст}}^i = n \cdot C_{\text{пр.доп.к.ст}} - C_{\phi}(n - 1)$$

где $C_{\text{пр.доп.к.ст}}$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества в контрольном створе, равная ПДК или доли ПДК с учетом суммирующего воздействия.

Расчет предельно допустимых сбросов сточных вод (т/год) осуществляется по формуле

$$\text{ПДС}^i = 31,5 C_{\text{доп.ст}}^i q, \quad (77)$$

где q – расход сточных вод, м³/с.

Предельно допустимые сбросы являются важнейшим экологическими нормативами воздействия горно-металлургических комплексов на водные объекты, за которые предприятия несут экономическую ответственность. Поэтому неправильный или неполный учёт этого воздействия приводит, с одной стороны, к негативным экологическим последствиям, а с другой - необоснованным экономическим санкциям. Для ГМК как источника гидрогенного воздействия на окружающую среду может использоваться следующая схема разработки ПДС (рис. 1.4).

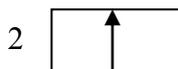
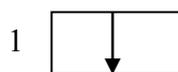
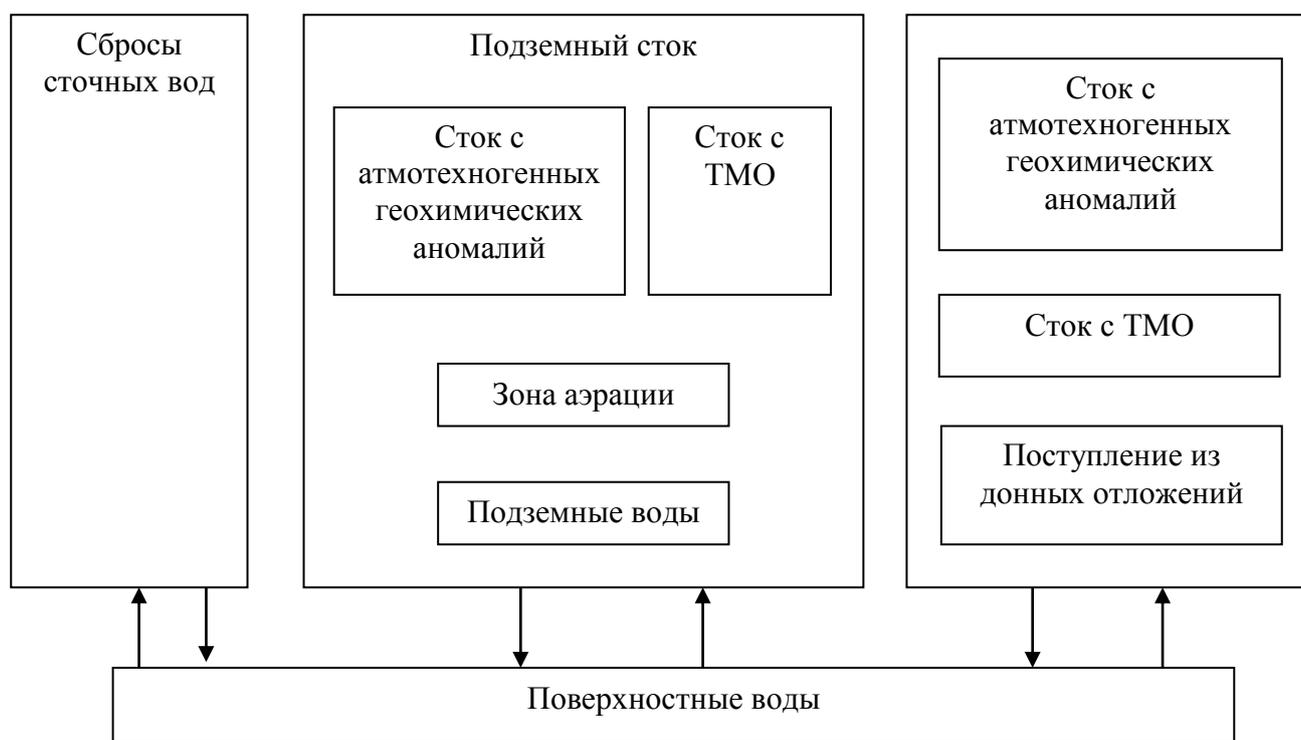


Рис. 1.4 Схема разработки предельно допустимых сбросов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты от горно-металлургических комплексов

1 - прогнозирование воздействия; 2 - нормирование воздействия

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит миграция загрязняющих веществ в атмосфере?
2. Назовите основные показатели, участвующие в расчетах предельно допустимых выбросов?
3. Как формируется загрязнение снежного покрова?
4. Какими показателями характеризуется интенсивность миграции загрязняющих веществ из атмосферы на снежный покров?
5. Как определить среднесуточную концентрацию загрязняющих веществ в воздухе, исходя из содержания загрязняющих веществ в снежном покрове и длительности его существования?
6. Как формируется загрязнение почвенного слоя?
7. От каких факторов зависит интенсивность миграции загрязняющих веществ из атмосферы на почвенный слой?

8. Как определить норму воздействия загрязняющих веществ на почвенный слой?
9. Назовите основные факторы, определяющие миграцию загрязняющих веществ в зоне аэрации.
10. Какие показатели необходимо определить для расчета миграции загрязняющих веществ через зону аэрации?
11. Назовите параметры, необходимые для расчета уровней загрязнения подземных вод. Как определить их в лабораторных условиях?
12. От каких факторов зависит прогнозные концентрации загрязняющих веществ в подземных водах и норматив предельно допустимого сброса в них?
13. Чем определяется миграция загрязняющих веществ в поверхностных водах?
14. Охарактеризуйте методику расчета разбавления сточных вод в реках.
15. Каким образом рассчитываются прогнозные концентрации загрязняющих веществ в реки и предельно допустимые сбросы в них?

ГЛОССАРИЙ

Воды зоны аэрации – подземные воды, находящиеся в порах и пустотах горных пород, залегающих от поверхности земли до уровня фунтовых вод или до поверхности зоны капиллярного поднятия над водоносным горизонтом.

Выброс предельно допустимый (ПДВ) – объем (количество) загрязняющего вещества за единицу времени, превышение которого ведет к неблагоприятным последствиям в окружающей природной среде или опасно для здоровья человека (ведет к превышению предельно-допустимых концентраций - ПДК - в окружающей источник загрязнения среде); *В. залповый* – единовременный концентрированный выброс значительного количества загрязняющих веществ в окружающую среду.

Диффузия – движение частиц среды, приводящее к переносу вещества и выравниванию концентраций или к установлению равновесного распределения концентраций конкретного вещества в данной среде. При отсутствии макроскопического движения среды (напр., конвекция) Д. молекул (атомов, ионов) определяется их тепловым движением (т. н. молекулярная Д.). В неоднородной системе вода - порода - газ - живое вещество при молекулярной Д. в отсутствие внешних воздействий диффузионный поток (поток массы) пропорционален градиенту его концентрации. Здесь коэффициент пропорциональности называется коэффициентом Д. В физике также рассматривают Д. электронов проводимости, нейтронов и др.

Загрязнение – привнесение в среду или возникновение в ней новых, обычно нехарактерных для нее физических, химических, биологических агентов и свойств, превращающее ее в частично или полностью непригодную для использования. З. может быть вызвано исключительно техногенными факторами.

Источник загрязнения: 1) точка выброса веществ (труба, и т. п.); 2) хозяйственный объект, производящий загрязняющее вещество; 3) регион, откуда поступают загрязняющие вещества (при дальнем и трансграничном переносе); 4) внерегиональный фон загрязнений, накопленных в среде (напр., в воздушной – CO₂, в водной – их кислотность и т. п.).

Концентрация фоновая: 1) содержание веществ в воздухе или воде, определяемое глобальными и региональными естественно происходящими процессами; 2) содержание веществ в воздухе или воде, определяемое глобальной и региональной суммой естественных и техногенных процессов; 3) содержание веществ в воздухе населенных мест, определяемое неучитываемыми производственными и транспортными выбросами и (или) приносом загрязнителей из смежных регионов.

Норма выброса – суммарное количество газообразных и (или) жидких отходов, разрешаемое предприятию для сброса в окружающую среду. Объем Н. в. определяется из расчета, что кумуляция вредных выбросов от всех предприятий данного региона не создает в нем концентрации загрязнителей, превышающих ПДК.

Норма загрязнения – предельное количество загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду, допускаемое нормативными актами (см. ПДВ).

Окружающая среда – это экотоп биосферы – ноосферы или экотопосферы. Ох. включает в себя косную и биокосную составляющую биосферы -ноосферы: атмосферу, гидросферу, педосферу и верхнюю часть литосферы. О.с. представляет собой совокупность природных, технических и информационно-коммуникационных систем, объектов, явлений и факторов, прямо или косвенно влияющих на условия жизни и развития человека и живых организмов.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) – максимальная концентрация данного токсического вещества, при которой не ухудшается здоровье, работоспособность, самочувствие и настроение человека и не наблюдается неблагоприятных наследственных изменений у потомства.

Прогноз воздействия на среду – предсказание изменений в природной среде в результате воздействия на нее проектируемого, строящегося или недавно введенного в эксплуатацию производственного предприятия, сооружения или их совокупности.

Сброс предельно допустимый (веществ в водный объект) (ПДС) – масса вещества в сточных водах, максимально допустимая к отведению в установленном режиме в данном пункте в единицу времени с целью обеспечения норм качества воды в контрольном пункте.

Сорбция (от лат. sorbeo – поглощаю) – поглощение твердым телом или жидкостью вещества из окружающей среды. Поглощающее тело называется сорбентом, поглощаемое – сорбтивом (сорбатом).

Хвостохранилище – устройство для приема и хранения отвальных хвостов.

Химическое загрязнение – загрязнение окружающей среды, формирующееся в результате изменения ее естественных химических свойств или при поступлении в среду химических веществ, несвойственных ей, а также в концентрациях, превышающих фоновые (естественные).

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассчитать миграцию загрязняющих веществ в окружающей среде от воздействия предприятий:

1) Определить прогнозные концентрации загрязняющих веществ и нормы воздействия на атмосферу, снежный покров, почвы, подземные и поверхностные воды.

2) Определить фильтрационные и миграционные параметры горных пород в лабораторных условиях.

3) Предложить природоохранные мероприятия по уменьшению негативного влияния предприятий.

Задание 1

1) Данные для расчета загрязнения атмосферы:

$$F = 3;$$

$$W_0 = 100 \text{ м/с};$$

$$H = 30 \text{ м};$$

$$A = 160;$$

$$\eta = 2;$$

$$T_{\text{вых}} = 400 \text{ C}^\circ;$$

$$T = 25 \text{ C}^\circ;$$

$$\Delta T = 375 \text{ C}^\circ.$$

2) Данные для расчета загрязнения снежного покрова и почв:

$$C_{\text{сн}}(\text{Mn}) = 183,1 \text{ мкг/л};$$

$$C_{\text{сн}}(\text{Fe}) = 15910 \text{ мкг/л};$$

$$P = 1300 \text{ г/см}^3;$$

$$(\text{Mn}) = 760;$$

$$W(\text{Fe}) = 890;$$

$$K = 5,7;$$

$$\text{ПДК}(\text{Mn}) = 150 \text{ мг/кг};$$

$$\text{ПДК}(\text{V}) = 1500 \text{ мг/кг};$$

$$C_{\text{фон}}(\text{Mn}) = 175 \text{ мг/кг};$$

$$C_{\text{фон}}(\text{V}) = 1680 \text{ мг/кг};$$

$$C_{\text{в}}(\text{Mn}) = 8900 \text{ г/т};$$

$$C_{\text{в}}(\text{Fe}) = 49500 \text{ г/т};$$

$$m = 672 \text{ т/га}.$$

3) Данные для расчета загрязнения подземных вод:

$$I = 0,005;$$

$$h = m = 30 \text{ м};$$

$$S = 1000 \text{ м};$$

$$L = 1000 \text{ м};$$

$$n_a = 0,43;$$

$T = 50$ лет;
 $Q_{\phi} = 4,76$ л/сут.

4) Данные для расчета загрязнения поверхностных вод:

$\phi = 1$;
 $\gamma = 1$;
 $V = 0,1$ м/с;
 $H = 1$ м;
 $Q = 1$ м³/с;
 $n_{ш} = 0,04$;
 $n_{л} = 0,02$;
 $q = 0,019$ м³/с;
 $x = 500$ м.

Задание 2

1) Данные для расчета загрязнения атмосферы:

$F = 2,5$;
 $H = 50$ м;
 $A = 160$;
 $\eta = 2$;
 $\Delta T = 375$ С°.

2) Данные для расчета загрязнения снежного покрова:

Для никеля:

$W(\text{Ni}) = 1100$;
 $a = 0,5$;
 $P = 1300$ г/м³;
 $C_{сн} = 201,9$ мкг/дм³;
 $C_{возд} = 119,3 \cdot 10^{-9}$ г/м³

Для свинца:

$W(\text{Pb}) = 450$;
 $C_{сн} = 667,1$ мкг/дм³;
 $C_{возд} = 963,6 \cdot 10^{-9}$ г/м³

3) Данные для расчета загрязнения почв:

$m = 672$ т/га;

Для никеля:

ПДК = 85 мг/кг;
 $C_{\phi} = 61$ мг/кг;
 $C_{в} = 16476$ г/т;

Для свинца:

ПДК = 30 мг/кг;
 $C_{\phi} = 22$ мг/кг;
 $C_{в} = 203$ г/т.

4) Данные для расчета загрязнения подземных вод:

$$\begin{aligned}I &= 0,003; \\h = m &= 60 \text{ м}; \\S &= 1100 \text{ м}; \\L &= 2200 \text{ м}; \\n_a &= 0,3; \\T &= 50 \text{ лет}; \\Q_{\phi} &= 1,6 \text{ л/сут.}\end{aligned}$$

5) Данные для расчета загрязнения поверхностных вод:

$$\begin{aligned}\varphi &= 1; \\\gamma &= 1; \\V &= 0.2 \text{ м/с}; \\H &= 2 \text{ м}; \\Q &= 2 \text{ м}^3/\text{с}; \\n_{ш} &= 0.04; \\n_{л} &= 0.02; \\q &= 0.01 \text{ м}^3/\text{с}; \\x &= 500 \text{ м}.\end{aligned}$$

Задание 3

1) Данные для расчета загрязнения атмосферы:

$$\begin{aligned}F &= 2; \\W_0 &= 0,5 \text{ м/с}; \\H &= 50 \text{ м}; \\A &= 160; \\\eta &= 2; \\T_{\text{вых}} &= 420 \text{ C}^0; \\T &= 25 \text{ C}^0; \\\Delta T &= 420 - 25 = 395 \text{ C}^0; \\D &= 1 \text{ м}.\end{aligned}$$

2) Данные для расчета загрязнения снежного покрова:

$$\begin{aligned}W(\text{Cu}) &= 880; \\W(\text{Zn}) &= 1050; \\W(\text{Pb}) &= 450; \\C_{\text{сн}}(\text{Cu}) &= 98,5 \text{ мг/дм}^3; \\C_{\text{сн}}(\text{Zn}) &= 41,8 \text{ мг/дм}^3; \\C_{\text{сн}}(\text{Pb}) &= 21,2 \text{ мг/дм}^3; \\C_{\text{о возд}}(\text{Cu}) &= 72,7 \text{ г/дм}^3; \\C_{\text{о возд}}(\text{Zn}) &= 25,9 \text{ г/дм}^3; \\C_{\text{о возд}}(\text{Pb}) &= 30,6 \text{ г/дм}^3.\end{aligned}$$

3) Данные для расчета загрязнения почв:

$$C_{Cu} = 60 \text{ мг/кг};$$

$$C_{Zn} = 120 \text{ мг/кг};$$

$$C_{Pb} = 29 \text{ мг/кг};$$

$$\text{ПДК}(Cu) = 55 \text{ мг/кг};$$

$$\text{ПДК}(Zn) = 100 \text{ мг/кг};$$

$$\text{ПДК}(Pb) = 30 \text{ мг/кг};$$

$$C_B(Cu) = 9000 \text{ мг/кг};$$

$$C_B(Zn) = 130000 \text{ мг/кг};$$

$$C_B(Pb) = 80000 \text{ мг/кг};$$

$$m = 672 \text{ г/га}.$$

4) Данные для расчета загрязнения подземных вод:

$$I = 0,001;$$

$$h = m = 50 \text{ м};$$

$$S = 2500 \text{ м};$$

$$L = 2000 \text{ м};$$

$$n_a = 0,2;$$

$$T = 50 \text{ лет};$$

$$Q_{\phi} = 3,0 \text{ л/сут}.$$

5) Данные для расчета загрязнения поверхностных вод:

$$C_{\phi}(Cu) = 0,018 \text{ мг/дм}^3;$$

$$C_{\phi}(Zn) = 0,783 \text{ мг/дм}^3;$$

$$C_{\phi}(Pb) = 0,003 \text{ мг/дм}^3;$$

$$\text{ПДК}(Cu) = 0,001 \text{ мг/дм}^3;$$

$$\text{ПДК}(Zn) = 0,01 \text{ мг/дм}^3;$$

$$\text{ПДК}(Pb) = 0,1 \text{ мг/дм}^3;$$

$$q = 0,001 \text{ м}^3/\text{сек};$$

$$Q = 0,010 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Задание 4

1) Данные для расчета загрязнения атмосферы:

$$F = 2;$$

$$W_0 = 400 \text{ м/с};$$

$$H = 100 \text{ м};$$

$$A = 160;$$

$$\eta = 3;$$

$$T_{\text{ВЫХ}} = 100 \text{ C}^0;$$

$$T = 25 \text{ C}^0;$$

$$\Delta T = 100 - 25 = 75 \text{ C}^0;$$

$$D = 2 \text{ м}.$$

2) Данные для расчета загрязнения снежного покрова:

$$\begin{aligned}C_{\text{сн}}(\text{Fe}) &= 9 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3; \\C_{\text{сн}}(\text{Mn}) &= 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3; \\C_{\text{о возд}}(\text{Fe}) &= 0,007 \text{ г/м}^3; \\C_{\text{о возд}}(\text{Mn}) &= 0,005 \text{ г/м}^3; \\P &= 1300 \text{ г/м}^3; \\a &= 0,5.\end{aligned}$$

3) *Данные для расчета загрязнения почв:*

$$\begin{aligned}C_{\text{Fe}} &= 51 \text{ мг/кг}; \\C_{\text{Mn}} &= 39 \text{ мг/кг}; \\C_{\text{Pb}} &= 72 \text{ мг/кг}; \\ПДК(\text{Fe}) &= \text{мг/кг}; \\ПДК(\text{Mn}) &= 1500 \text{ мг/кг}; \\ПДК(\text{Pb}) &= 30 \text{ мг/кг}; \\C_{\text{в}}(\text{Fe}) &= 23442,3 \text{ мг/кг}; \\C_{\text{в}}(\text{Mn}) &= 676,08 \text{ мг/кг}; \\C_{\text{в}}(\text{Pb}) &= 70,79 \text{ мг/кг}; \\m &= 672 \text{ г/га}.\end{aligned}$$

4) *Данные для расчета загрязнения подземных вод:*

$$\begin{aligned}I &= 0,001; \\h = m &= 50 \text{ м}; \\S &= 2500 \text{ м}; \\L &= 2000 \text{ м}; \\n_{\text{а}} &= 0,2; \\T &= 50 \text{ лет}; \\Q_{\text{ф}} &= 3,0 \text{ л/сут}.\end{aligned}$$

5) *Данные для расчета загрязнения поверхностных вод:*

$$\begin{aligned}\varphi &= 1; \\\gamma &= 1; \\V &= 0,1 \text{ м/с}; \\H &= 0,5 \text{ м}; \\Q &= 0,01 \text{ м}^3/\text{с}; \\n_{\text{ш}} &= 0,05; \\n_{\text{д}} &= 0,02; \\q &= 0,001 \text{ м}^3/\text{с}; \\x &= 500 \text{ м}.\end{aligned}$$

Задание 5

1) *Данные для расчета загрязнения атмосферы:*

$$\begin{aligned}F &= 2; \\W_0 &= 300 \text{ м/с}; \\H &= 50 \text{ м};\end{aligned}$$

$A = 160;$
 $\eta = 3;$
 $T_{\text{ВЫХ}} = 100 \text{ C}^{\circ};$
 $T = 25 \text{ C}^{\circ};$
 $\Delta T = 100 - 25 = 75 \text{ C}^{\circ};$
 $D = 1 \text{ м.}$

2) *Данные для расчета загрязнения снежного покрова:*

$C_{\text{сн}}(\text{Fe}) = 7 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3;$
 $C_{\text{сн}}(\text{Mn}) = 8 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3;$
 $C_{\text{о возд}}(\text{Fe}) = 0,006 \text{ г/м}^3;$
 $C_{\text{о возд}}(\text{Mn}) = 0,005 \text{ г/м}^3;$
 $P = 1300 \text{ г/м}^3;$
 $a = 0,5.$

3) *Данные для расчета загрязнения почв:*

$C_{\text{Mn}} = 49 \text{ мг/кг};$
 $C_{\text{Pb}} = 62 \text{ мг/кг};$
 $\text{ПДК (Mn)} = 1500 \text{ мг/кг};$
 $\text{ПДК (Pb)} = 30 \text{ мг/кг};$
 $C_{\text{в}}(\text{Mn}) = 676,08 \text{ мг/кг};$
 $C_{\text{в}}(\text{Pb}) = 70,79 \text{ мг/кг};$
 $m = 672 \text{ г/га.}$

4) *Данные для расчета загрязнения подземных вод:*

$I = 0,002;$
 $h = m = 50 \text{ м};$
 $S = 2500 \text{ м};$
 $L = 2000 \text{ м};$
 $n_a = 0,2;$
 $T = 50 \text{ лет};$
 $Q_{\phi} = 6,0 \text{ л/сут.}$

5) *Данные для расчета загрязнения поверхностных вод:*

$\phi = 1;$
 $\gamma = 1;$
 $V = 0,1 \text{ м/с};$
 $H = 0,6 \text{ м};$
 $Q = 0,01 \text{ м}^3/\text{с};$
 $n_{\text{ш}} = 0,05;$
 $n_{\text{д}} = 0,02;$
 $q = 0,001 \text{ м}^3/\text{с};$
 $x = 500 \text{ м.}$

Пример расчётов миграции загрязняющих веществ

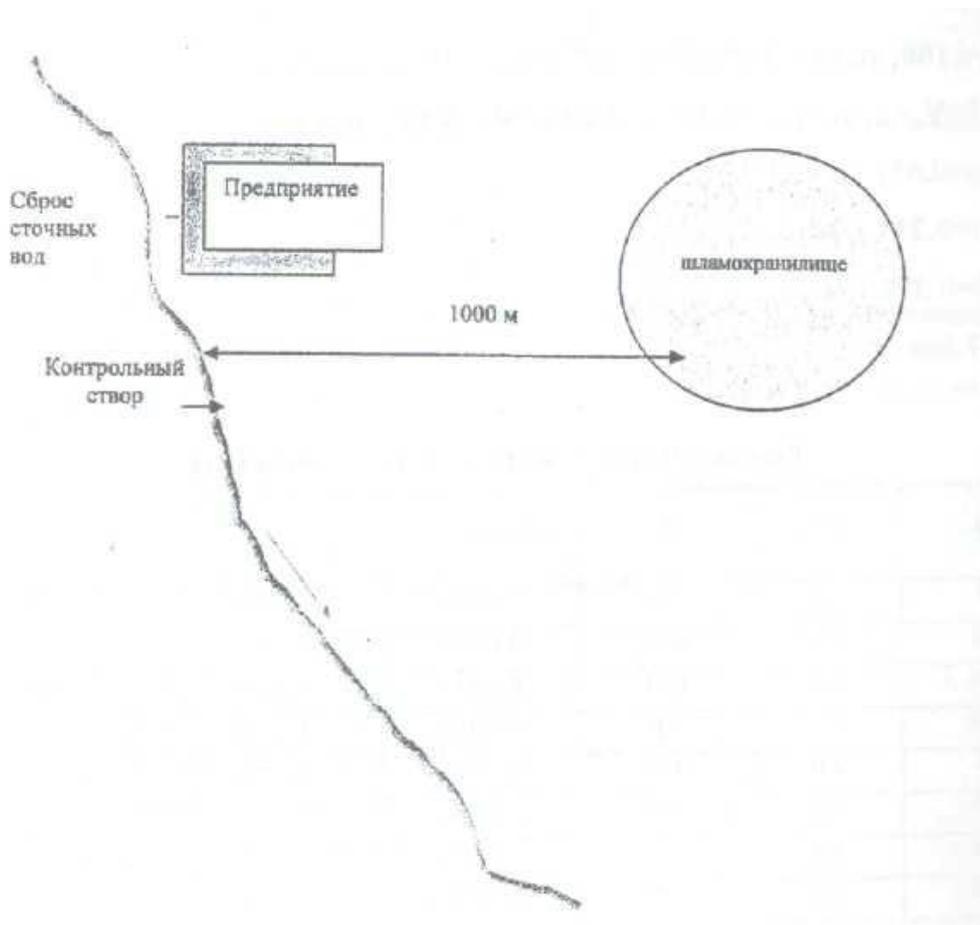


Рис.2.1. Схема расположения объектов

1) Данные для расчета загрязнения атмосферы:

$$A = 160;$$

$$F = 2;$$

$$M(\text{Cu}) = 14,9 \text{ т/год} = 0,47 \text{ г/с};$$

$$M(\text{Zn}) = 61,5 \text{ т/год} = 1,95 \text{ г/с};$$

$$M(\text{As}) = 108,3 \text{ т/год} = 3,43 \text{ г/с};$$

$$H = 50 \text{ м};$$

$$\eta = 2;$$

$$W_0 = 0,5 \text{ м/с};$$

$$D = 1 \text{ м};$$

$$\Delta T = 420^\circ - 25^\circ = 395^\circ.$$

Результаты расчета загрязнения атмосферы:

$$f = 0,0005;$$

$$V_n = 0,9478;$$

$$V_m = 0,013;$$

$$f_e = 0,0017.$$

$$\text{Т.к. } f_e < 100, \text{ то } m = 1 / (0,67 + 0,1 \cdot f^{1/2} + 0,34 \cdot f^{1/3}), m = 1,43.$$

$$\text{Т.к. } 0,5 < V_n < 2, \text{ то } n = 0,532 \cdot V_n^2 - 2,12 \cdot V_n + 3,13, n = 1,59.$$

$$C_m(\text{Cu}) = 0,051 \text{ г/м}^3;$$

$$C_m(\text{Zn}) = 0,21 \text{ г/м}^3;$$

$$C_m(\text{As}) = 0,372 \text{ г/м}^3;$$

$$X_m = 37,5 \text{ м.}$$

Таблица 2.1

Результаты расчёта приземных концентраций

x, м	x/x _m	S _i	C _x = S _i · C _m		
			Cu	Zn	As
3,75	0,1	0,05	0,00255	0,01055	0,01860
11,25	0,3	0,23	0,01173	0,04853	0,08556
22,50	0,6	0,52	0,02652	0,10972	0,19344
37,50	1,0	1,0	0,05100	0,21100	0,37200
75,0	2,0	0,75	0,03825	0,15825	0,27900
150,0	4,0	0,4	0,02040	0,08440	0,14880
300,0	8,0	0,1	0,00510	0,02110	0,03720
375,0	10,0	0,075	0,00383	0,01583	0,02790
450,0	12,0	0,07	0,00357	0,01477	0,02604
525,0	14,0	0,05	0,00255	0,01055	0,01860
750,0	20,0	0,03	0,00153	0,00633	0,01116

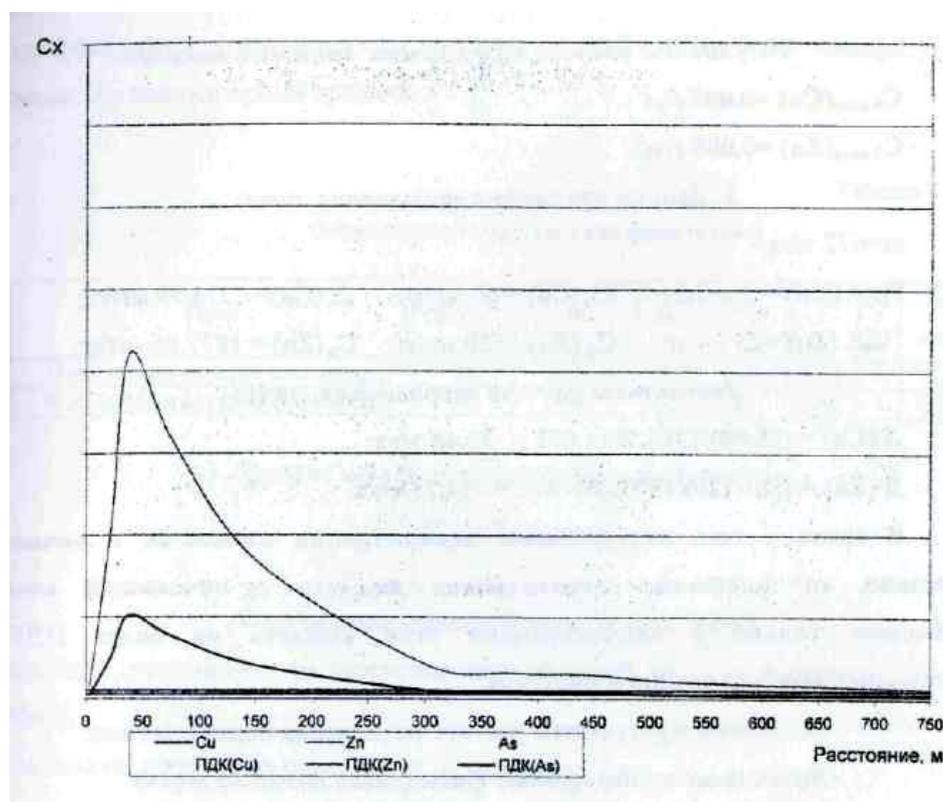


Рис. 2.2. График распределения приземных концентраций

$$0,1 \cdot C_m \leq \text{ПДК.}$$

Для Cu: $0,1 \cdot 51 = 5,1,$

ПДК (Cu)=0,001 мг/м³;

Для Zn: $0,1 \cdot 211 = 21,1$, ПДК (Zn) = 0,005 мг/м³;
Для As: $0,1 \cdot 372 = 3,72$, ПДК (As) = 0,003 мг/м³.
Определяем предельно допустимые выбросы (ПДВ):
ПДВ (Cu) = 5,851 т/год;
ПДВ (Zn) = 14,708 т/год;
ПДВ (As) = 8,866 т/год.

2) *Данные для расчета загрязнения снежного покрова:*
 $\alpha = 0,5$;
 $\rho = 1300 \text{ г/м}^3$;
 $C_{\text{сн}}(\text{Cu}) = 9 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3$;
 $C_{\text{сн}}(\text{Zn}) = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3$.

Результаты расчета загрязнения снежного покрова:
 $C_{0 \text{ возд}}(\text{Cu}) = 0,007 \text{ г/м}^3$;
 $C_{0 \text{ возд}}(\text{Zn}) = 0,005 \text{ г/м}^3$.

3) *Данные для расчета загрязнения почв:*
 $m = 672 \text{ т/га}$;
ПДК(Cu) = 3 мг/кг;
 $C_{\text{ф}}(\text{Cu}) = 60 \text{ мг/кг}$;
 $C_{\text{в}}(\text{Cu}) = 1216,79 \text{ мг/кг}$
ПДК(Zn) = 23 мг/кг;
 $C_{\text{ф}}(\text{Zn}) = 120 \text{ мг/кг}$;
 $C_{\text{в}}(\text{Zn}) = 1877,06 \text{ мг/кг}$;

Результаты расчета загрязнения почв:
 $D(\text{Cu}) = \left(\frac{3-60}{1216,79} \right) \cdot 672 = -31,48 \text{ т/га}$;
 $D(\text{Zn}) = \left(\frac{23-120}{1877,06} \right) \cdot 672 = -34,73 \text{ т/га}$.

В связи с тем, что фоновые концентрации элементов в почвах высокие, то попадание загрязняющих веществ в почвенный слой возможно только с концентрацией этих веществ не более ПДК, установленных для каждого элемента.

4) *Данные и результаты расчета загрязнения подземных вод:*

Определение коэффициента фильтрации песчаных пород Коэффициент фильтрации в лабораторных условиях определяем при помощи прибора – трубки «СПЕЦГЕО». Грунт – песок элювиальный, пылеватый, с содержанием гальки до 10 %. Так как грунт находится в нарушенном состоянии, проводится 2 опыта:

– в предельно рыхлом состоянии;

– в предельно плотном состоянии.

Сначала производим насыщение грунта водой (при отметке напора 0.8), затем – процесс фильтрации (при градиенте напора равном 1).

Коэффициент фильтрации рассчитываем по формуле

$$K_{\phi} = \frac{Q \cdot 864}{t \cdot F \cdot \tau \cdot J}$$

где Q – количество профильтрованной воды;

t – время фильтрации, сек;

F – площадь поперечного сечения металлической трубки, см²;

864 – переводный коэффициент;

τ – температурная поправка - $\tau = 0,7 + 0,03 \cdot T$;

T – температура воды;

J- водонапорный градиент.

Таблица 2.2

Определение коэффициента фильтрации

Грунт	Q, см ³	t, сек	F, см ²	T, °C	τ	J	K _φ , м/сут
В предельно рыхлом состоянии	70	287	25	21	1,33	1	6,34
В предельно плотном состоянии	70	2641	25	21	1,33	1	0,69

Среднее значение коэффициента фильтрации

$$K_{\phi} = \frac{6,34+0,69}{2} = 3,515 \text{ м/сут.}$$

Определение активной пористости пород

Сначала грунт насыщаем дистиллированной водой, затем фильтруем раствор NaCl. Активную пористость определяем по формуле

$$n = \frac{V \cdot t_{0,5}}{l}$$

где V – скорость фильтрации.

$$V = \frac{Q}{F}$$

Q – расход;

F – площадь;

t – время, при котором концентрация хлора равна половине исходной;

l – высота образца.

Определение содержания хлоридов в растворе

- берем 10 мл раствора;
- добавляем 3 капли реактива K_2CrO_4 ;
- титруем раствор $AgNO_3$, измеряем, какой объем пошел на изменение цвета до бурого;
- определяем содержание хлоридов, измеряемое в мг-экв/л:

$$C_{cl} = V_1 \cdot n \cdot 1000/V,$$

где V_1 – объем протитрованного раствора, мл;
 n – нормальность раствора, $n = 0,1$;
 V – объем исходной пробы, $V = 10$ мл.

$$C_{cl} \cdot 35,5 = C_{cl}'$$

Таблица 2.3

Результаты опыта по определению активной пористости

t, сек	V_1 , мл	C_{cl} , мг-экв/л	C_{cl} , мг/л
108	0,2	2	71,0
230	0,2	2	71,0
315	0,3	3	106,5
509	0,4	4	142,0
631	0,5	5	177,5
638	0,6	6	213,0
777	0,7	7	248,5
340	0,8	8	284,0
900	0,8	3	284,0

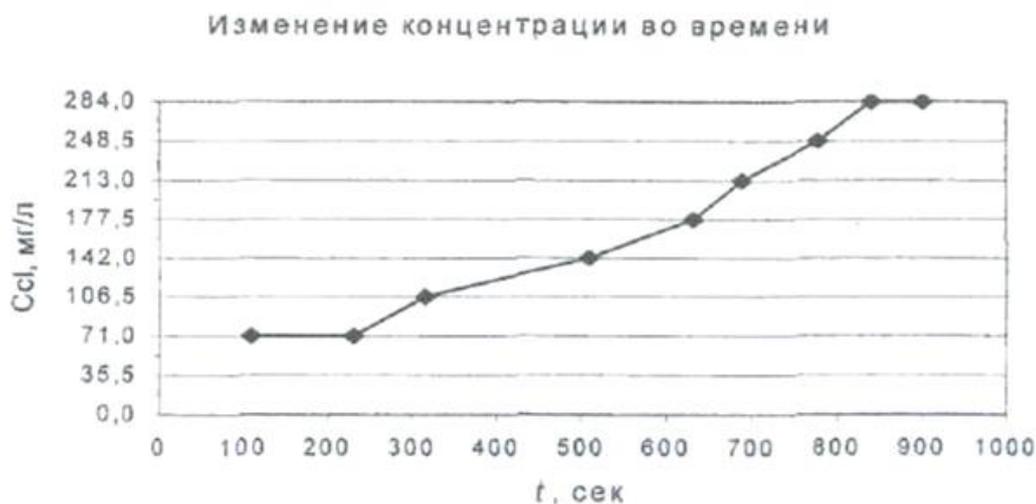


Рис. 2.3. Изменение концентрации хлоридов во времени

Исходная концентрация:

$$2,6 - 35,5 = 461,5 \text{ мг/л.}$$

Время, при котором концентрация хлорида равна половине исходной (определяется по графику)

$$t = 730 \text{ сек.}$$

Расход определяется по пропорции: 10 мл – 108 сек, следовательно, 0,092 мл – за 1 сек.

$$Q = 0,092 \text{ мл/сек.}$$

Площадь рассчитывается, измерив радиус

$$F = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 4,75^2 = 70,88 \text{ см}^2,$$

$$V = \frac{0,092}{70,88} = 0,001 \text{ см/сек.}$$

Высота образца: $l = 10 \text{ см}$;

$$n_a = 0,001 \cdot \frac{730}{10} = 0,073.$$

Результаты расчета загрязнения подземных вод

Действительная скорость продвижения загрязнения:

$$v_d = \frac{K_{\phi} \cdot J}{n_a} = \frac{3,515 \cdot 0,001}{0,073} = 0,048 \text{ м/сут,}$$

где **J** - гидравлический уклон, **J = 0,001**;

n_a – активная пористость.

Время прохождения загрязняющего вещества до реки

$$t = \frac{L}{v_d} = \frac{1000}{0,048} = 20768 \text{ сут.} \approx 57 \text{ лет.}$$

В связи с тем, что время прохождения загрязнения от шла мох ранил ища до реки больше, чем время эксплуатации шламоохранилища, специальных природоохранных мероприятий не предусматривается.

5) Данные для расчета загрязнения поверхностных вод:

$$x = 500 \text{ м};$$

$$\gamma = \phi = 1;$$

$$n_{ш} = 0,05;$$

$$n_d = 0,02;$$

$$v = 0,1 \text{ м/с};$$

$$H = 0,5 \text{ м};$$

$$\begin{aligned}
q &= 0,001 \text{ м}^3/\text{с}; \\
Q &= 0,01 \text{ м}^3/\text{с}; \\
C_{\text{Cu}} &= 0,004 \text{ мг/дм}^3; \\
C_{\text{Zn}} &= 0,024 \text{ мг/дм}^3; \\
C_{\text{As}} &= 0,001 \text{ мг/дм}^3, \\
C_{\phi}(\text{Cu}) &= 0,004 \text{ мг/дм}^3; \\
C_{\phi}(\text{Zn}) &= 0,024 \text{ мг/дм}^3; \\
C_{\phi}(\text{As}) &= 0,001 \text{ мг/дм}^3, \\
C_{\text{сб}}(\text{Cu}) &= 0,077 \text{ мг/дм}^3; \\
C_{\text{сб}}(\text{Zn}) &= 0,179 \text{ мг/дм}^3; \\
C_{\text{сб}}(\text{As}) &= 0,0005 \text{ мг/дм}^3.
\end{aligned}$$

Результаты расчета загрязнения поверхностных вод:

$$\beta = \frac{0,02}{0,05} = 0,4,$$

$$n_{\text{пр}} = 0,5 \cdot [1 + 0,4^{1,5}]^{0,68} = 0,058,$$

$$y = 2,5\sqrt{0,058} - 0,13 - 0,75\sqrt{0,25} \cdot (0,058 - 1) = 0,825,$$

$$c = \frac{0,25^{0,825}}{0,58} = 5,49,$$

$$D = \frac{0,001 \cdot 0,1 \cdot 0,5}{74 \cdot 0,058 \cdot 5,49} = 0,00000212,$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{0,00000212}{0,001}} = 0,128,$$

$$B = e^{-0,128 \sqrt[3]{500}} = 0,363.$$

Коэффициент смешения:

$$g = \frac{1 - 0,363}{1 + 0,01 \cdot \frac{0,363}{0,001}} = 0,138.$$

Кратность разбавления:

$$n = 1 + \frac{0,01 + 0,138}{0,001} = 2,376.$$

Концентрация загрязняющего вещества в контрольном створе реки:

$$C_{\text{к.ст}}(\text{Cu}) = 0,004 + \frac{0,77 - 0,004}{2,376} = 0,035 \text{ мг/дм}^3,$$

$$C_{\text{к.ст}}(\text{Zn}) = 0,024 + \frac{0,179-0,024}{2,376} = 0,089 \text{ мг/дм}^3,$$

$$C_{\text{к.ст}}(\text{As}) = 0,001 + \frac{0,0005-0,001}{2,376} = 0,0008 \text{ мг/дм}^3.$$

Коэффициент аддитивности, учитывающий полное суммирующее воздействие каждого из веществ:

$$D = \frac{\sum C_{\text{к.ст}}}{\sum \text{ПДК}} = \frac{0,035+0,089+0,0008}{0,001+0,01+0,05} = 2,046.$$

$D > 1$, следовательно, за ПДК в контрольном створе принимаем долю от ПДК.

$$C_{\text{пр.доп.к.ст}} = \frac{C_{\text{к.ст}}}{D},$$

$$C_{\text{пр.доп.к.ст}}(\text{Cu}) = \frac{0,035}{2,046} = 0,017,$$

$$C_{\text{пр.доп.к.ст}}(\text{Zn}) = \frac{0,089}{2,046} = 0,043,$$

$$C_{\text{пр.доп.к.ст}}(\text{As}) = \frac{0,0008}{2,046} = 0,0004.$$

Отсюда рассчитываем допустимое содержание в сбросе сточных вод, мг/дм³:

$$C_{\text{доп.сб}} = n \cdot C_{\text{пр.доп.к.ст}} - C_{\text{ф}} \cdot (n - 1),$$

$$C_{\text{доп.сб}}(\text{Cu}) = 2,376 \cdot 0,017 - 0,004 \cdot (2,376 - 1) = 0,035,$$

$$C_{\text{доп.сб}}(\text{Zn}) = 2,376 \cdot 0,043 - 0,024 \cdot (2,376 - 1) = 0,069,$$

$$C_{\text{доп.сб}}(\text{As}) = 2,376 \cdot 0,0004 = 0,001.$$

$$\text{ПДС} = C_{\text{доп.сб}} \cdot q \cdot 31,5,$$

$$\text{ПДС}(\text{Cu}) = 35 \cdot 0,001 \cdot 31,5 = 1,1025 \text{ мг/с} = 0,035 \text{ т/год},$$

$$\text{ПДС}(\text{Zn}) = 69 \cdot 0,001 \cdot 31,5 = 2,1735 \text{ мг/с} = 0,069 \text{ т/год},$$

$$\text{ПДС}(\text{As}) = 1 \cdot 0,001 \cdot 31,5 = 0,0315 \text{ мг/с} = 0,001 \text{ т/год},$$

В связи с тем, что у элементов высокое фоновое содержание в растворенном виде, сброс в поверхностные воды возможен с концентрацией этих элементов не более ПДК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практикум направлен на формирование у студентов комплексного подхода к расчётам загрязнения компонентов окружающей среды, когда миграция загрязняющих веществ от источников загрязнения происходит по всем средам, формируя миграционные циклы. Такой подход прогнозирования и нормирования загрязнения окружающей среды является наиболее правильным, так как учитывает миграционную подвижность загрязняющих веществ. Реализация данного подхода может быть применима для любых природных условий и любых типов объектов воздействия на окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная

1. Семячков А.И. Расчеты миграции загрязняющих веществ. Учебное пособие по курсу ДС.07.01 «Расчеты и моделирование миграции» для студентов специальности – «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологических изысканий». – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. -65 с.
1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. - 448 с.
2. Бочеввер Ф. М., Лапшин Н. К, Орадовская А. Е. Защита подземных вод от загрязнения. - М.: Недра, 1979. - 254 с.
3. Василенко В. И., Назаров И. М., Фридман Щ. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 178 с.
4. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. - М: Недра, 1984. - 362 с.
5. Родзиллер И. Д. Прогноз качества воды водоемов приемников сточных вод. - М, 1984.-272 с.

Дополнительная

6. Бочеввер Ф. М., Гормонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчётов. - М: Недра, 1969. - 358 с.
7. Вызова Н. Л. Рассеяние примеси в приграничном слое атмосферы. - М.: Гидрометеиздат, 1974. - 191 с.
8. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов. - М.: Недра, 1994. - 303 с.
9. Мироненко В. А., Румынии В. Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х томах. Том 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. - М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 1998. -611 с.
10. Семячков А. И. Металлы в окружающей среде горно-металлургических комплексов Урала: Научное издание. - Екатеринбург: Изд-во УГТГА, 2001. -320 с.
11. Черкинскш С. Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. - М.: Стройиздат, 1977. -208 с.
12. Экология горного производства: Учебник для вузов / Мирзаев Г. Г., Иванов Е. А., Щербаков В. М. - М.: Недра, 1991. -320 с.

Учебное текстовое электронное издание

**Сомова Юлия Васильевна
Ильина Оксана Юрьевна
Лимарев Александр Сергеевич**

РАСЧЁТ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Практикум

1,05 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2019 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru