

---

А.М. Степанов  
И.В. Барышева

# **Экологическое нормирование атмосферных выбросов промышленных предприятий**

Учебное пособие

№ 646

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ  
Технологический университет

**МИСиС**

Кафедра теплофизики и экологии металлургического  
производства

А.М. Степанов  
И.В. Барышева

# **Экологическое нормирование атмосферных выбросов промышленных предприятий**

**Учебное пособие**

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом института

Москва Издательство «УЧЕБА» 2005

Рецензент  
канд. техн. наук, проф. В.А. Муравьева

**Степанов А.М., Барышева И.В.**

**С79 Экологическое нормирование атмосферных выбросов промышленных предприятий: Учеб. пособие. – М.: МИСиС 2005. – 35 с**

В пособии рассмотрена оригинальная методика экологического нормирования атмосферных выбросов металлургических комбинатов, разработанная на кафедре ТЭМП в предшествующие годы. Методика основана на сборе экспериментальных данных в окрестностях металлургических комбинатов с использованием квазистационарной модели взаимодействия выбросов отходящих газов и лесных экосистем.

Приведены результаты ряда комбинатов черной и цветной металлургии.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины «Экология металлургического производства и региона».

Предназначено для студентов специальностей 150103 (1103) «Теплофизика автоматизация и экология промышленных печей», 280101 (3301) «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», 280202 (3302) «Инженерная защита окружающей среды».

© Московский государственный институт  
стали и сплавов (технологический  
университет) (МИСиС), 2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                        | 4  |
| 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....                                                            | 6  |
| 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ<br>ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ И ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ..... | 10 |
| 2.1. Основные допущения модели .....                                                  | 10 |
| 2.2. Этапы исследования .....                                                         | 15 |
| 2.2.1. Рекогносцировочный этап исследований .....                                     | 15 |
| 2.2.2. Исследование загрязненности снежного покрова .....                             | 15 |
| 2.2.3. Измерения параметров эффекта .....                                             | 18 |
| 2.2.4. Построение зависимостей доза – эффект .....                                    | 20 |
| 2.2.5. Расчет норматива .....                                                         | 25 |
| 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ<br>МОДИФИЦИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ .....               | 28 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....                                                        | 34 |

## ВВЕДЕНИЕ

Действующие в настоящее время санитарно-гигиенические нормативы в виде системы предельно допустимых концентраций токсических веществ (ПДК) призваны защитить человека от воздействия загрязнений окружающей среды. Но одной этой системы для защиты человека недостаточно, так как окружающая среда воздействует на человека не только непосредственно, но и опосредованно. Непосредственно – через потребляемые им компоненты окружающей среды: воздух, воду, пищу и т.д. Опосредованно – через доброкачественное, продуктивное состояние самой среды, т.е. природных систем океана и суши, ее слагающих, во всем их комплексе, на всех широтах Земли, вне зависимости от того, живут там люди или нет. Даже там, где люди не живут и не ведется никакой хозяйственной деятельности, в отдаленных районах, биосфера выполняет важные для человека функции: продуцирует кислород, очищает воду и воздух, производит биомассу растений и животных, поддерживает циклы энерго- и массообмена, хранит генофонд дикой природы. Все эти компоненты окружающей среды, как и многие другие, здесь не названные, не менее важны для человека, чем непосредственно им потребляемые, и также должны быть охвачены исследованиями, мониторингом, нормированием. В загрязненных зонах городов и промышленных агломераций люди могут существовать и работать только при благополучном и продуктивном состоянии биофона планеты.

Поэтому параллельно с системой санитарно-гигиенических ПДК должна быть разработана система экологических предельно допустимых концентрации (ЭПДК), призванная защитить от антропогенных воздействий природные сообщества, а на ее основе должны быть рассчитаны экологические предельно допустимые атмосферные выбросы промышленных предприятий (ЭПДВ).

В этом направлении работают ряд ученых и научных коллективов Москвы, Санкт-Петербурга и других городов; Уральского и Кольского центров РАН. За рубежом подобные работы также ведутся достаточно широко. Особенно много исследований осуществлено при изучении воздействия на лесные сообщества дымо-газовых выбросов двух металлургических комбинатов: Гузумского (Швеция) и комбината в Садбери (Канада).

Изучение этих работ показало, что полученные в них результаты содержат ценную информацию по отклику различных структурно-

функциональных блоков лесных экосистем на антропогенную, в том числе на токсическую нагрузку. Однако наряду с развитием этих работ возникает необходимость их объединения с тем, чтобы выйти на уровень реакции экосистем как целого на антропогенные воздействия.

Однако обобщить результаты этих работ не представляется возможным, так как они получены на разных объектах, в разных экологических условиях, с использованием различных методов.

Таким образом, нормативы ЭПДК – ЭПДВ в настоящее время находятся в стадии становления, в связи с чем актуальным остается разработка критериев допустимого антропогенного воздействия на природные комплексы.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для разработки критериев для оценки допустимого антропогенного воздействия выбросов промышленных предприятий на компоненты окружающей среды необходимо понять: что, где, когда и как надо изучить в природных экосистемах, чтобы обосновать нормы воздействия на них со стороны промышленных предприятий, а затем пересчитать эти нормативы на выбросы из труб. При этом необходима организация комплексных работ, когда все нужные данные получаются на одних и тех же пробных площадях, по единой методологии, в сжатые фенологические сроки.

В ходе работы необходимо установить однозначное соответствие между четырьмя блоками данных с помощью трех процедур (рис. 1.1).

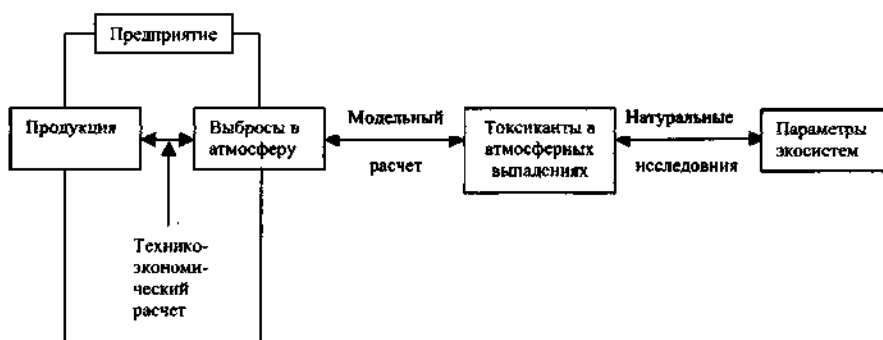


Рис. 1.1. Схема процедуры экологического нормирования

В основу технико-экономических расчетов заложено уравнение материального баланса технологического процесса предприятия. С помощью этого соотношения устанавливается связь продукции промышленного предприятия с максимально возможным сбросом в окружающую среду вредных токсических отходов, а также взаимозависимость экономических показателей производства с условием выполнения природоохранных нормативов.

Уравнение материального баланса любого технологического процесса имеет вид:

$$M_1 + M_2 = M_3 + M_4,$$

где  $M_1$  – основные материалы (сырье);

$M_2$  – вспомогательные материалы (сырье);

$M_3$  – продукция предприятия;

$M_4 = M_4' + M_4''$  – общие отходы производства.

Часть отходов  $M_4'$  улавливается и перерабатывается. Другая часть  $M_4''$  сбрасывается в окружающую среду. Величина  $M_4''$  характеризует технологический процесс производства и степень утилизации отходов и представляет собой максимально возможный (с точки зрения технологии) выброс в окружающую среду. Таким образом, главный природоохранный результат достигается при условии  $M_4'' < \text{ЭПДВ}$ , определение которого и является целью настоящей работы.

Заметим, что все величины в приведенных соотношениях могут быть заданы человеком, проектирующим предприятие. Все, кроме ЭПДВ, которые определяются уже не технологией или экономическими показателями производственного процесса, а исключительно свойствами самой окружающей среды, природных систем, ее составляющих, и могут быть определены только при всестороннем изучении реакции природных комплексов на токсическое воздействие.

Известно, что воздействие токсических веществ на организмы характеризуется свойством пороговости. Классическая токсикология, имеющая уже более чем столетнюю историю развития, оперирует соотношениями типа кривой, показанной на рис. 1.2.

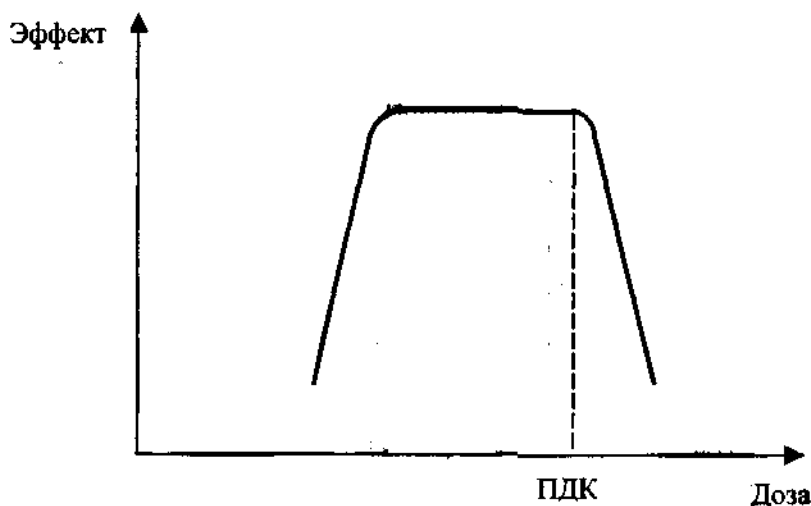


Рис. 1.2. Типичный характер токсикологических зависимостей

Здесь наблюдаются три области действия токсиканта. При малых концентрациях происходит стимулирование жизнедеятельности организма; при высоких концентрациях — подавление этой деятельности, а в средней части кривых наблюдается диапазон токсических доз, в котором живые системы обладают способностью поддерживать норму своего состояния при увеличивающейся токсической дозе воздействия. Это осуществляется, в частности, за счет деятельности плазматических и ядерных мембран, роль которых в процессах обмена веществ изучена достаточно хорошо, а также рядом других процессов в клетках.

На базе исследования таких закономерностей развита система санитарно-гигиенического нормирования в виде набора значений ПДК, которая непрерывно пополняется и совершенствуется, имеет свою историю, свои недостатки и свои перспективы развития и призвана непосредственно защищать человека. Задача этой работы — обосновать, по аналогии с санитарно-гигиеническим, экологическое нормирование токсического воздействия со стороны промышленных предприятий на природные сообщества.

При изучении токсического воздействия на реальную окружающую среду мы всегда имеем дело с тремя множествами: воздействующих факторов, объектов исследований и реакций на токсическое воздействие, что условно может быть обозначено, как  $(m - m - m)$ . Классическая токсикология имеет дело с одним фактором, одним объектом и множеством реакций  $(1 - 1 - m)$ . Между этими крайними случаями помещается экотоксикология, которая исследует последствия дозированного воздействия известного токсиканта (или известного сочетания токсикантов), вносимого в реальные природные сообщества в опыте  $(1 - 1 - m)$  или исследование процессов и последствий воздействия множества факторов реальной окружающей среды на тест-объект  $(1 - 1 - m)$ .

При поисках порога токсического воздействия на окружающую среду необходимо построить зависимость доза — эффект на уровне экосистемы.

Задача эта принципиально более сложная, чем аналогичная в классической токсикологии. В реальной окружающей среде мы не имеем возможности ни разделять компоненты, ни дозировать воздействие, ни экспериментировать в заданных ситуациях. Объективно мы поставлены в условия, когда должны изучать большую систему, не расчлняя ее. Именно в таком подходе и состоит главный принцип системных исследований. Однако исследовать все компоненты трех

множеств заведомо невозможно; следовательно необходимо создать модель, адекватную поставленной задаче и более простую, неизбежно более грубую, но не настолько, чтобы пропал сам эффект (порог токсического воздействия), который мы ищем.

То, что природные сообщества относятся к классу больших систем и должны исследоваться методами системного анализа, ни у кого возражений, по-видимому, не вызывает. Некоторая методическая трудность состоит в отсутствии общепринятого понятия большой системы, при том, что в течение ряда лет разными исследователями предложено несколько десятков определений. Поэтому мы себя вправе предложить еще одно.

Множество взаимосвязанных элементов можно считать системой в том случае, когда взаимосвязи между элементами более существенны, чем свойства и проявления самих элементов в отдельности.

В этом определении присутствует субъективный момент. "Более существенны" для кого? Или – при какой постановке проблемы, в каком аспекте рассмотрения? Несомненно, что одно и то же лесное сообщество в одном случае может рассматриваться как большая система (например, для нашей цели выявления порога токсического воздействия). В другом случае – как множество деревьев, являющееся лишь источником древесины. В таком аспекте рассмотрения взаимосвязи деревьев с остальными элементами сообщества неизбежно менее существенны, что и приводит к пренебрежению ими со стороны лесозаготовителей.

## 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ И ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

### 2.1. Основные допущения модели

**Первое допущение.** Каждый природный комплекс подвергается всей сумме антропогенных воздействий: химическому и радиоактивному загрязнению, воздействию электромагнитных полей, шума и вибраций, рекреационной нагрузке, вытаптыванию при выпасе скота, рубкам, пожарам; осушению и переувлажнению в результате мелиоративных работ; истощению гумусового горизонта в результате вспашки; всем видам антропогенного выветривания почв, искажениям климата в результате антропогенных воздействий глобального масштаба и т.д. вплоть до изменения характеристик околоземного космического пространства, так или иначе воздействующего на каждую природную систему.

Поэтому в качестве объекта исследования необходимо выбрать такой, в окрестностях которого заведомо преобладает какой-то один вид антропогенного воздействия. Например, в зоне влияния металлургических комбинатов преобладают выбросы в атмосферу тяжелых металлов и сернистых соединений; остальные факторы антропогенного воздействия, несомненно, присутствуют также, но менее существенны. Это первое упрощение задачи.

**Второе допущение.** Примем модель черного ящика, т.е. будем рассматривать только параметры на входе и выходе системы. На входе – токсические выпадения из атмосферы, на выходе – изменение основных параметров: биомассы, численности, видового разнообразия структурных блоков экосистемы, учитываемых с возможной полнотой. В данном подходе нет необходимости распутывать сложные пути миграции токсикантов внутри экосистемы, т.е. внутри ее пространственной структуры (допустим, распределение по ярусам) или функционально – по трофическим уровням. Именно по этой причине в данном подходе нет необходимости измерять содержание токсикантов в растениях, почвах, поверхностных водах, животных. Это не значит, что такие измерения совсем не нужны; они не нужны только в данной проблеме. Нас здесь интересует не само содержание токсикантов, а биологические последствия этого для всего природно-

го комплекса, а они могут иметь существенное различие в зависимости от того, в какой части П-образных кривых (см. рис. 1.2) окажутся измеренные содержания токсикантов: в зоне стимулирования жизнедеятельности, в зоне подавления или в зоне регулирования.

**Третье допущение.** В качестве дозы в общем плане необходимо рассматривать всю сумму антропогенных токсикантов, т.е. воздействие тяжелых металлов, радионуклидов, макроэлементов и хлорорганических соединений на воздух, воды, почву, биологические объекты, что может быть представлено в виде матрицы из 16 ячеек, показанной на рис. 2.1. В данном случае мы ограничиваемся одной ячейкой и в качестве воздействующей дозы измеряем содержание тяжелых металлов, накопленных в течении зимнего периода в снеге.

**Четвертое допущение.** Оно состоит в экстраполяции такого уровня атмосферных выпадений на весь год. Известно, что содержания токсикантов в атмосферных выпадениях сильно варьируют, в зависимости от комплекса климатических факторов: температуры, влажности, сорбционной способности аэрозолей, туманов, пыли и т.д., следствием чего является их большая вариабельность в зависимости от времени суток, сезона года, других более долгопериодических процессов. В снеге содержания токсикантов не только консервируются до начала снеготаяния; они автоматически усредняются за весь зимний период (при условии, что на анализ берется полная колонка снега). Именно поэтому исследование содержаний токсикантов в снеге и более информативно, и методически проще.

Почему именно тяжелые металлы взяты в данном случае в качестве трассеров всей суммы воздействующих факторов? Не только потому, что исследуются атмосферные выбросы металлургических производств. Несомненно, что в зоне влияния любого промышленного предприятия всегда присутствуют и сернистые соединения, и оксиды азота, и кислотные выпадения. Для выявления наиболее значимого фактора в зоне влияния комбината "Североникель" вычисляли коэффициенты корреляции между фитомассой травяно-кустарничкового яруса и названными видами загрязнений. Эти коэффициенты составили: по отношению к сумме тяжелых металлов в снеге ( $-0,92$ ); по отношению к содержанию сульфат-иона ( $-0,86$ ); по отношению к pH ( $+0,83$ ); остальные факторы оказались менее значимыми.

Есть еще несколько соображений, позволяющих в данном конкретном примере ограничиться рассмотрением в качестве дозы только суммы тяжелых металлов.

В реальной окружающей среде

Доза

Эффект

|                             | Воздух | Вода | Почва | Биота |
|-----------------------------|--------|------|-------|-------|
| Тяжелые металлы             |        |      |       |       |
| Макроэлементы               |        |      |       |       |
| Радиоактивные элементы      |        |      |       |       |
| Хлорорганические соединения |        |      |       |       |

Fe, Co, Zn, Pb, Cd, Hg,  
As, Se, Mn, Cu, Cr,  
(SO<sub>4</sub>)<sup>-2</sup>

Генерализация

$$\text{Доза} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\max}} 100\%$$

Древесный ярус

Объем древесины, м<sup>3</sup>/га  
Масса листвы, ц/га  
Жизненное состояние  
древостоя, баллы

Травяно-кустарничковый ярус

Фитомасса, ц/га  
Общее проективное  
покрытие, %  
Число видов, шт

Подстилка

Масса, т/га  
Мощность, см  
Условное время  
разложения, лет

Почвенная мезофауна

Биомасса, г/м<sup>2</sup>  
Число экземпляров, шт  
Число видов, шт

Генерализация

$$\text{Эффект} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij}}{A_{i\max}} 100\%$$

Рис. 2.1. Структура зависимости доза – эффект:  $A_{ij}$  –  $i$ -й

биологический параметр на  $j$ -й пробной площадке;  $A_{i\max}$

максимальное значение  $i$ -го параметра в выборке;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го токсиканта в снеге;  $C_{\max}$  – максимальное значение концентрации токсиканта в данной выборке

Экспериментальные данные, собранные вокруг четырех комбинатов цветной металлургии, фиксируют как типичную, следующую ситуацию. На протяжении трансект 20...30 км параметры лесных экосистем меняются почти на два порядка с 80% до 1...2 %; аналогично этому, т.е. в десятки раз, изменяются концентрации тяжелых металлов в снеге; однако концентрация сернистых соединений на этом же расстоянии от центра выбросов падает всего в 1,5 – 1,6 раза. Например, на расстоянии 1 км от комбината "Североникель" содержание сульфат-иона в снеге составляет  $4 \cdot 10^{-5}$  г/г, а на расстоянии 20 км –  $2,5 \cdot 10^{-5}$  г/г.

Проблема "кислых дождей", рассматриваемая в странах Западной Европы и США как главная, в России не имеет такой остроты вследствие того, что там эффективно очищают отходящие газы от аэрозолей, а у нас этого не делается. Результатом этого является эффективное сорбирование кислот аэрозолями с образованием плохо растворимых солей, выпадение их из атмосферы и захоронение их в почвах, откуда они растениями усваиваются плохо, либо совсем не усваиваются. На этом явлении основан метод борьбы с кислотными выбросами ТЭЦ и ТЭС с помощью добавления в камеру сгорания мелкодисперсной доломитовой пыли, что применяется в нашей стране на ряде электростанций.

**Пятое допущение.** При выборе параметров, которые необходимо фиксировать в качестве эффекта от воздействия промышленных токсикантов, могут рассматриваться несколько приближений.

Биогеохимический круговорот веществ осуществляется в биогеоценозе всей совокупностью живых организмов. Этих последних делят на три главные функциональные группы: продуценты, редуценты, консументы. В условиях наземных систем продуценты состоят в основном из фотосинтезирующих растений. В первом приближении достаточно ограничиться контролем продукционного процесса, как основного в биогеоценозе, по состоянию которого можно судить о жизнеспособности и степени нарушенности всей системы, т.е. ограничиться регистрацией параметров живой растительности. Деятельность редуцентов в значительной степени связана с разложением подстилки. Ее параметры: запас, скорость разложения являются важными показателями состояния сообщества в целом. Исследование фитоценоза, включая подстилку, – второе, более точное приближение к решению задачи. Третьим, и наиболее точным, будет комплексный учет всех трех функциональных групп биогеоценоза, при этом среди животных важнейшим является блок почвенных беспозвоночных.

В итоге, в применении к лесным системам, практически необходимым является измерение следующих параметров (см. рис. 2.1). В древесном ярусе: запас древесины ( $\text{м}^3/\text{га}$ ), масса листвы или хвой ( $\text{ц}/\text{га}$ ), жизненное состояние древостоя (баллы); в травяно-кустарничковом ярусе: фитомасса ( $\text{ц}/\text{га}$ ), общее проективное покрытие (%), число видов. В северных регионах необходимо оценивать параметры мохово-лишайникового яруса, фиксируя фитомассу, общее проективное покрытие и число видов; в подстилке — массу ( $\text{ц}/\text{га}$ ), мощность (см), условное время разложения (годы) или степень разложения х/б ткани (%); в блоке почвенной мезофауны: число экземпляров, биомассу ( $\text{мг}/\text{м}^2$ ) и количество видов. Могут использоваться данные о мелких млекопитающих, почвенных микроорганизмах и т.д. Важно, чтобы каждый структурно-функциональный блок экосистемы был представлен равным количеством измеренных параметров.

**Шестое допущение.** Модель предполагает квазистационарность объекта, т.е. изменения дозы должны быть настолько медленны, чтобы система успела к ним приспособиться (например, прирастить или снизить биомассу). Иными словами, залповые сбросы или резкие изменения дозы типа аварии адекватно не отражаются текущим состоянием экосистемы.

Здесь начинают проявляться динамические характеристики системы: инерционность в изменении параметров, скорости собственных колебаний, времена релаксации, периоды полувыведения и т.п., тут будет необходима уже другая модель и будет решаться другая проблема — проблема динамической устойчивости. Именно ограничение квазистационарными состояниями системы позволяет регистрировать биомассы растительности ярусов лесных систем, а не продукцию, что существенно проще.

**Седьмое допущение.** Вытекает из требования проведения работ в сжатые фенологические сроки, практически в течении двух недель, когда параметры фитоценоза меняются не существенно. Для получения статистически достоверного результата необходимо проведение серии экспериментов, а также для того, чтобы избежать годовых колебаний измеряемых параметров. В идеале длительность серии должна составлять 11 лет (главный солнечный, а следовательно, и климатический цикл); на практике приходится ограничиваться исследованиями в течение 2 — 5 сезонов в одни и те же фенологические фазы состояния фитоценозов.

Таковы основные свойства (допущения) принятой модели.

## **2.2. Этапы исследования**

Последовательные этапы осуществления процедуры экологического нормирования рассмотрим на примере четырех металлургических комбинатов: Карабашского медеплавильного комбината (КМК) в регионе Южного Урала, Красноуральского медеплавильного комбината (КрМК) в регионе Среднего Урала, комбинатов “Печенганикель” и “Североникель” в регионе Кольского полуострова.

### **2.2.1. Рекогносцировочный этап исследований**

На первом этапе исследований определяется тип биогеоценоза, господствующего в современную эпоху на территориях в окрестностях комбината, с тем, чтобы была обеспечена возможность заложения достаточного количества пробных площадей (обычно 15...20) для получения достоверного результата. Требование однотипности исследуемых лесных биогеоценозов является весьма строгим. Одинаковое положение в рельефе, уклон и экспозиция склона, микро-рельеф, степень увлажнения и одинаковые в своей основе почвы входят в число признаков, по которым выбираются пробные площади. Но главное внимание уделяется наличию схожего флористического состава, подробному геоботаническому описанию фитоценозов. Только при соблюдении этих условий различия в измеренных на пробных площадях параметрах могут быть отнесены за счет воздействия атмосферных выбросов комбината. Контрольные площади выбираются заведомо вне зоны влияния промышленных выбросов комбината, но в пределах того же ботанико-географического района.

### **2.2.2. Исследование загрязненности снежного покрова**

На втором этапе работы исследуется загрязненность снежного покрова тяжелыми металлами. Отбор проб снега производится в период перед снеготаянием на выбранных пробных площадях. Смешанные образцы снега фильтруют под давлением непосредственно после ставивания для отделения взвесей, на которых в разной степени сорбированы тяжелые металлы. В образовавшийся фильтрат добавляют реагент – тиюоксинат натрия,  $C_9H_6NSNa \cdot 2H_2O$ , который связывает ионы металлов во внутрикомплексные соединения и второе фильтрование отделяет их от раствора. Фильтрат после второго фильтрования сливают, оба фильтра высушивают, упаковывают в фильтровальную бумагу и в таком состоянии они могут храниться долгое

время до химического анализа без потери или неконтролируемых добавок исследуемого вещества. Эта процедура позволяет извлекать из снеговой воды до 96...98 % микроэлементов.

Необходим учет и сернистых соединений. Через трубы металлургических комбинатов сера вылетает в виде многочисленных соединений, основными из которых являются:  $\text{SO}_2$  – сернистый ангидрид,  $\text{SO}_3$  – серный ангидрид,  $\text{H}_2\text{S}$  – сульфиды,  $(\text{SO}_3)^{-2}$  – сульфиты,  $(\text{SO}_4)^{-2}$  – сульфаты,  $(\text{S}_2\text{O}_3)^{-2}$  – тиосульфаты, меркаптаны, однако большая их часть является неустойчивыми соединениями и через некоторое время пребывания в атмосфере переходит в сульфаты, по суммарному содержанию которых в снеге судят об общем количестве сернистых соединений.

В табл. 2.1 представлены данные по содержанию тяжелых металлов и сернистых соединений в снеге в окрестностях комбината «Севвероникель». Даже ограничившись этими приоритетными токсикантами, мы имеем девять воздействующих факторов. Поэтому рассматривать действие каждого в отдельности было бы некорректно. Необходимо учитывать, что искомая зависимость доза – эффект на экосистемном уровне относится к классу реальных соотношений, (множество причин, множество объектов, множество следствий).

Мы допустили бы ошибку, если бы придавали этой зависимости токсикологический смысл, поскольку все металлы действуют совместно в реальной обстановке, поэтому генерализация дозы необходима не только для сокращения (сжатия) информации, но и по сути дела.

Если бы мы просто вычисляли среднее арифметическое содержания всех токсикантов в снеге, то получили бы в основном серу, концентрация которой в данном случае на 5 порядков больше концентраций остальных ингредиентов. Усреднение необходимо проводить в процентах, когда максимальное значение содержания каждого поллютанта в исследуемой выборке принимается за 100 %.

Поступая таким образом, мы не игнорируем специфичность действия отдельных микроэлементов и соединений на растительность. Считается, что совместное действие ряда токсических агентов может вызвать синергетические эффекты, или, наоборот, может быть антагонистическим, ослабляющим; все это и реализуется в реальном лесном сообществе, которое мы исследуем, и находит свое отражение в регистрируемых биологических параметрах.

Но это также означает, что токсичность того или иного вещества оказывается зависящей от состава смеси токсикантов; именно поэтому их усреднение производится со статическими весами, равными единице. Суммировать их с коэффициентами, соответствующими

индивидуальной токсичности, определенной в лабораторных условиях, методами классической токсикологии (один токсикант, один объект, множество следствий), было бы неверно.

Таблица 2.1

**Содержания тяжелых металлов и сернистых соединений  
в окрестностях металлургического комбината «Североникель»**

| ПП    | Mn    | Zn    | Cu    | Fe    | Cd    | Co    | Pb    | Ni    | (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup> | Σ /9 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|------|
| мкг/л |       |       |       |       |       |       |       |       |                                  |      |
| Ю-2   | 14,0  | 22,8  | 716,2 | 508,9 | 0,29  | 13,4  | 12,5  | 513,7 | 280400                           |      |
| Ю-5   | 25,1  | 35,9  | 569,6 | 627,9 | 0,14  | 20,6  | 8,6   | 797,8 |                                  |      |
| Ю-10  | 15,8  | 34,7  | 178,5 | 163,0 | 0,28  | 10,8  | 14,0  | 169,5 | 52000                            |      |
| Ю-20  | 8,6   | 39,8  | 113,7 | 223,1 | 0,22  | 13,6  | 8,6   | 103,9 | 27000                            |      |
| Ю-30  | 11,5  | 21,0  | 98,5  | 257,3 | 0,27  | 9,9   | 9,2   | 66,9  | 16000                            |      |
| 3-70  | 3,0   | 16,9  | 97,4  | 58,4  | 0,15  | 2,6   | 2,6   | 36,7  |                                  |      |
| 3-86  | 5,8   | 6,7   | 28,6  | 40,3  | 0,04  | 2,0   | 1,1   | 39,0  | 7200                             |      |
| ПО    | 0,3   | 0,4   | 0,3   | 2,5   | 0,003 | 0,03  | 0,2   | 1,0   | 1,5                              |      |
| %     |       |       |       |       |       |       |       |       |                                  |      |
| Ю-2   | 55,8  | 57,3  | 100,0 | 81,0  | 100,0 | 65,0  | 89,3  | 64,4  | 100,0                            | 79,2 |
| Ю-5   | 100,0 | 90,2  | 79,5  | 100,0 | 48,3  | 100,0 | 61,4  | 100,0 |                                  | 84,9 |
| Ю-10  | 62,9  | 87,2  | 24,9  | 26,0  | 96,6  | 52,4  | 100,0 | 21,3  | 18,5                             | 54,4 |
| Ю-20  | 34,3  | 100,0 | 15,9  | 35,5  | 75,9  | 66,0  | 61,4  | 13,0  | 9,6                              | 45,7 |
| Ю-30  | 45,8  | 52,8  | 13,8  | 41,1  | 93,1  | 48,0  | 65,7  | 8,4   | 5,7                              | 41,6 |
| 3-70  | 11,9  | 42,5  | 13,6  | 9,3   | 51,7  | 12,6  | 18,6  | 4,6   |                                  | 20,6 |
| 3-86  | 23,1  | 16,8  | 4,0   | 6,4   | 13,8  | 9,7   | 7,9   | 4,9   | 2,6                              | 9,9  |

*Примечание.* ПП – пробная площадка; ПО – предел обнаружения; Ю-2 – Ю-30 и др. – пробная площадь к югу (3 – западу) от комбината на расстоянии 2...30 км.

В итоге мы получаем одно число, обозначенное в последней графе табл. 2.1 как  $\sum /9$  (среднеарифметическое из 9 значений), которое характеризует дозу.

### 2.2.3. Измерения параметров эффекта

На третьем этапе исследований в качестве эффекта от воздействия дозы используются численные параметры древесного и травяно-кустарничкового ярусов, подстилки, данные по почвенной мезофауне, микроартроподам и альгофлоре, измеренные в течение нескольких полевых сезонов в одни и те же фенофазы развития лесных сообществ (в середине июля). Они сведены в табл. 2.2, где соблюдено статистическое равенство, когда каждый структурно-функциональный блок лесной системы представлен равным числом показателей (по три).

Все приведенные характеристики лесных сообществ измерены по общепринятым методикам. Ни один из измеренных параметров не характеризует лесное сообщество в целом. Каждый из них, являясь частью одной генеральной совокупности, отражает процесс постепенной деградации лесной системы под воздействием выбросов комбината, но каждый в своей специфической форме; кривые их изменения в зависимости от расстояния до центра выбросов в разной степени коррелируют друг с другом, имеют различные абсолютные числовые значения и разные единицы измерения.

Для генерализации этих данных, каждый из них должен быть переведен в безразмерную величину. Это достигается делением каждого показателя на его максимальное значение в данной выборке, нормированное на единицу или на 100 %, после чего производится усреднение. Таким образом достигается генерализация эффекта и он может быть представлен одной величиной, которая была названа интегральным коэффициентом сохранности – ИКС:

$$\text{ИКС} = 1/n \sum_{i=1}^n (A_{ij}/A_i) 100 \%,$$

где  $A_{ij}$  – значение  $i$ -го показателя;  $A_i$  – максимальное значение того же параметра в выборке;  $j$  – номера пробных площадей.

## Биологические параметры в Мончегорске

| Параметры                        | Единицы измерения       | Направление  |              |              |              |              |                |              |
|----------------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
|                                  |                         | Ю-2          | Ю-5          | Ю-10         | Ю-20         | Ю-30         | 3-90           | 3-86         |
| Древесный ярус                   |                         |              |              |              |              |              |                |              |
| 1. Поперечное сечение древостоя  | м <sup>2</sup> /га<br>% | 1,6<br>7,2   | 3,8<br>17,0  | 4,0<br>17,9  | 5,9<br>26,5  | 6,5<br>29,1  | 22,3<br>100    | 15,6<br>70,0 |
| 2. Запас древесины               | м <sup>3</sup> /га<br>% | 2,2<br>1,9   | 17,8<br>15,3 | 21,2<br>18,2 | 36,3<br>31,2 | 36,8<br>31,6 | 116,4<br>100,0 | 91,8<br>78,9 |
| 3. Жизненное состояние древостоя | баллы<br>%              | 5,0<br>40,0  | 4,5<br>44,4  | 4,5<br>44,4  | 4,5<br>44,4  | 3,5<br>57,1  | 2,5<br>80,0    | 2,0<br>100,0 |
| ИКС <sub>1</sub>                 | %                       | 16,4         | 25,6         | 26,8         | 38,3         | 39,3         | 93,3           | 83,0         |
| Травяно-кустарничковый ярус      |                         |              |              |              |              |              |                |              |
| 4. Фитомасса                     | ц/га<br>%               | 16,8<br>27,1 | 7,1<br>11,4  | 24,2<br>39,0 | 32,0<br>51,5 | 40,7<br>65,5 | 62,1<br>100,0  | 52,9<br>85,2 |
| 5. Общее проективное покрытие    | %<br>% %                | 25,0<br>17,2 | 19,1<br>13,1 | 18,0<br>12,4 | 70,2<br>48,3 | 85,0<br>58,6 | 120,5<br>82,8  | 145,0<br>100 |
| 6. Число видов                   | шт<br>%                 | 6<br>15,8    | 4<br>10,5    | 12<br>31,6   | 25<br>65,8   | 30<br>78,9   | 28<br>73,7     | 38<br>100    |
| ИКС <sub>2</sub>                 | %                       | 18,2         | 18,6         | 27,2         | 46,7         | 53,5         | 89,4           | 89,1         |
| Почвенная мезофауна              |                         |              |              |              |              |              |                |              |
| 7. Численность                   | экз/м <sup>2</sup><br>% | 8<br>1,4     | 22<br>3,9    | 22<br>3,9    | 184<br>32,9  | 318<br>56,8  |                | 560<br>100   |
| 8. Биомасса                      | г/м <sup>2</sup><br>%   | 0,03<br>0,5  | 0,34<br>5,2  | 0,27<br>4,2  | 1,03<br>15,9 | 1,71<br>26,3 |                | 6,5<br>100   |
| 9. Число видов                   | шт<br>%                 | 5<br>21,4    | 2<br>14,3    | 7<br>50,0    | 10<br>71,4   | 12<br>85,7   |                | 14<br>100    |
| ИКС <sub>3</sub>                 | %                       | 14,7         | 20,2         | 24,6         | 44,5         | 54,4         | 89,4           | 92,7         |
| Мелкие млекопитающие             |                         |              |              |              |              |              |                |              |
| 10. Численность                  | экз/га<br>%             | 0,8<br>1,1   |              | 50,6<br>71,0 | 50,4<br>70,7 |              | 71,3<br>100    |              |
| 11. Биомасса                     | кг/га<br>%              | 0,2<br>1,2   |              | 1,2<br>70,6  | 1,2<br>70,6  |              | 1,7<br>100     |              |
| 12. Число видов                  | шт<br>%                 | 33<br>66,7   |              | 50<br>100    | 42<br>83,4   |              | 33<br>66,7     |              |
| ИКС <sub>12</sub>                | %                       | 14,7         | 20,9         | 24,6         | 53,5         | 59,5         | 89,4           | 91,7         |

Примечание. ИКС — интегральный коэффициент сохранности.

Потребность в обобщенном показателе состояния экосистем была всегда, и в разное время в качестве такового использовались различные комбинации измеряемых величин. Смысл введенного коэффициента (ИКС) близок к разработанным ранее индексам, однако отличается использованием большего набора безразмерных параметров, полученных применением приема нормирования на максимальное значение.

Нормированные и пространственно сопряженные данные приведены в табл. 2.2 вместе с интегральными коэффициентами сохранности, которые подсчитывались в разном составе: по трем, шести, девяти, двенадцати параметрам, причем при подсчете всех трех параметров подстилки брались обратные величины, поскольку для этих показателей меньшее число соответствует лучшему состоянию.

#### **2.2.4. Построение зависимостей доза – эффект**

Объединение генерализованных данных по загрязнению снега (доза) и параметров экосистем (эффект) для четырех рассматриваемых комбинатов выполнено на рис. 2.2, где по осям абсцисс отложены суммы тяжелых металлов (%), а по осям ординат – интегральные коэффициенты сохранности (%).

Рассмотрение этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Во всех случаях обнаруживается четко выраженный порог воздействия суммы всех антропогенных факторов на состояние лесных экосистем, относящихся к различным регионам страны. Очевидно, что значение суммы токсикантов, соответствующее порогу антропогенного воздействия, должно быть принято в качестве предельно допустимого экологического норматива в каждом конкретном регионе и для конкретного типа биогеоценоза.

Еще раз подчеркнем, что полученный результат не означает, что измеренные токсиканты единственная причина наблюдаемой деградации лесных сообществ; они составляют лишь часть токсического комплекса, являясь трассерами всей суммы антропогенных воздействий, а обнаружение порога воздействия в разных природных зонах свидетельствует, что эти трассеры в данном случае и в рамках принятой модели выбраны правильно.

Найденные пороговые критерии предельно допустимой антропогенной нагрузки на лесные сообщества весьма точно соответствуют по своему численному значению двум другим критериям, выдвинутым нами ранее. Первый из них исходит из того, что лесной фитоценоз в хорошем состоянии характеризуется полночленной, вертикальной (ярусной) и горизонтальной, (парцелиарной) структурой. Пока эта структура сохраняется, хотя отдельные параметры экосистемы (например, фитомасса травяно-кустарничкового яруса, общее проективное покрытие и др.) могут быть снижены, нагрузка на экосистему допустима.

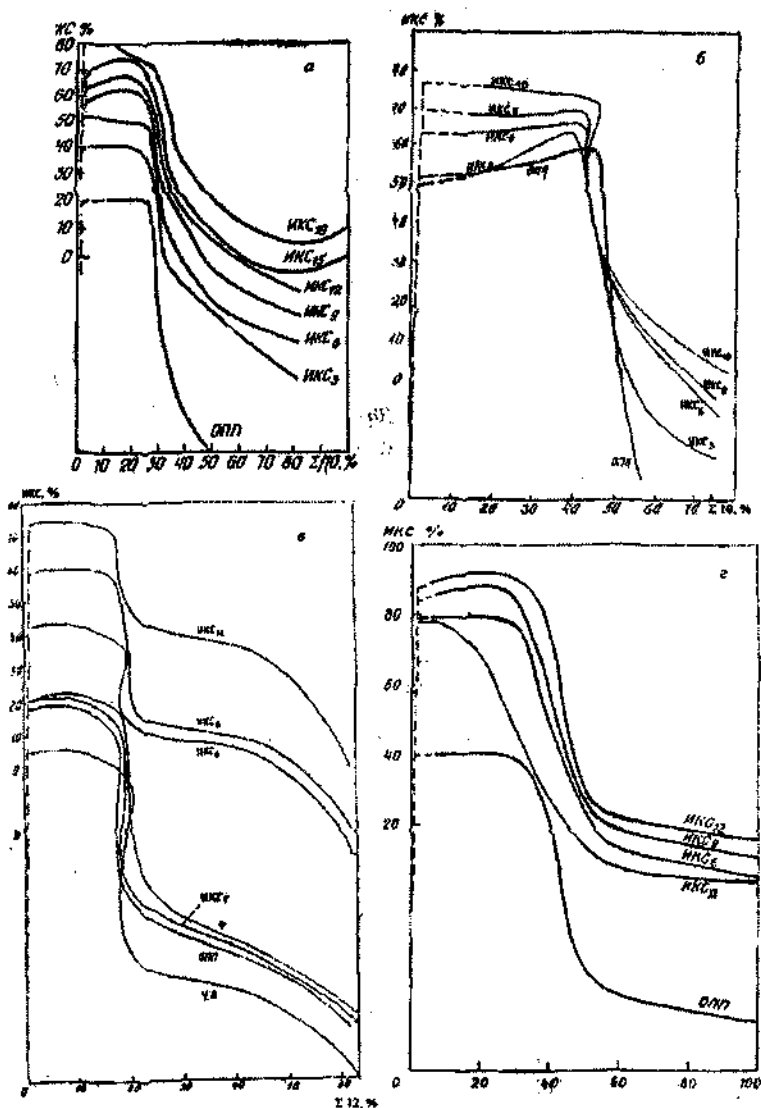


Рис. 2.2. Доза - эффект зависимости для лесных экосистем в зоне влияния атмосферных выбросов четырех комбинатов цветной металлургии: а - г - соответственно КМК, КрМК, комбинаты «Печenganикель» и «Североникель». ИКС<sub>д</sub> и ИКС<sub>т</sub> - соответственно интегральный коэффициент древостоя и травяно-кустарничкового яруса; Ф - фитомасса; Ч. В - число видов

Второй критерий определяет допустимую антропогенную нагрузку по факту незавершенности биогеохимического круговорота элементов, маркером которого является аномальное накопление подстилки, фиксируемое в окрестностях металлургических комбинатов на некотором расстоянии от центра выбросов.

2. Полученные зависимости доза – эффект на экосистемном уровне весьма точно соответствуют по своему характеру токсикологической кривой для отдельных организмов, показанной на рис. 1.2. Левые, ниспадающие ветви кривых на рис. 2.2 проведены теоретически (пунктиром) на основании очевидного соображения, что в среде, не содержащей никаких химических соединений и элементов, лес расти не будет. Очевидно также и то, что в реальной окружающей среде мы никогда не сможем получить данных в этой области.

Если горизонтальный участок токсикологических зависимостей для организмов (см. рис. 1.2) объясняется в основном действием клеточных плазматических и ядерных мембран, то в случае лесных сообществ на рис. 2.2 горизонтальные участки кривых могут быть объяснены взаимозамещением более чувствительных видов более толерантными при движении по направлению к центру выбросов. Этот механизм явления иллюстрируется рис. 2.3, на котором приведено изменение фитомассы видов травяно-кустарничкового яруса в подзоне северной тайги при увеличении токсической нагрузки на лесное сообщество.

Здесь обращает на себя внимание зеркальная (в общих чертах) симметрия кривых фитомассы брусники и вороники, а также подобный характер хода кривых по парам: вороника – черника и брусника – багульник. Парное подобие указывает на схожесть экологических ниш данных видов, а зеркальная симметрия – на разную (но по парам также схожую) толерантность по отношению к сумме воздействующих факторов. В итоге в некотором интервале антропогенных нагрузок происходит эффективное замещение более чувствительных видов более толерантными, и фитомасса травяно-кустарничкового яруса поддерживается на постоянном уровне, несмотря на увеличение токсической нагрузки. Но так продолжается только до определенного предела, когда исчерпываются резервы видового разнообразия данного биогеоценоза и начинается снижение фитомассы и других параметров, фиксируемое как порог токсического воздействия.

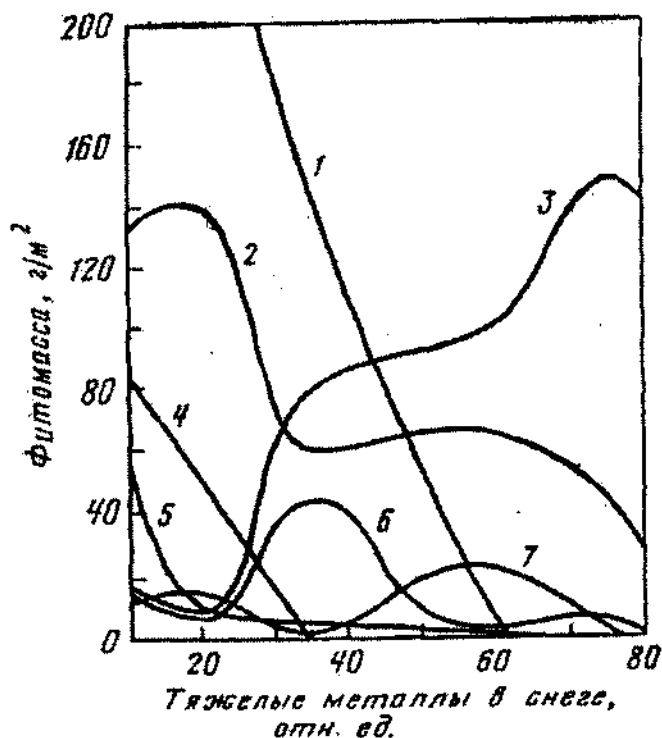


Рис. 2.3. Ценоотическая значимость видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов в зависимости от загрязнения: 1 – кладония; 2 – брусника; 3 – вороника; 4 – плевроцеум; 5 – дикранум; 6 – черника; 7 – багульник

Необходимо подчеркнуть, что несмотря на внешне схожий результат, стратегии его достижения у отдельных организмов и экосистем различные, можно даже сказать противоположные. Организм, стремясь в стрессовой ситуации сохранить свою структуру (форму, морфологию), изменяет свои функции, а экосистема, стремясь сохранить свои функции, изменяет свою структуру.

Но это также означает, что найденный пороговый критерий токсической нагрузки на экосистему не является универсальным; он гарантирует только продуцирование биомассы (и, в стехиометрическом соответствии, кислорода), а также поддержание на постоянном уровне суммы других измеряемых в данном случае параметров экосистем, но не видового разнообразия. Для промышленности это самый легкий критерий. Для сохранения генетического разнообразия

природы он недостаточен. Очевидно, что в качестве универсальных должны быть найдены другие, более строгие критерии предельно допустимой нагрузки, ориентированные на сохранение генофонда дикой природы.

3. Во всех случаях наиболее четко порог токсического воздействия выражен на кривой ИКС<sub>6</sub>, являющейся суммой параметров древесного и травяно-кустарничкового ярусов. Можно воспользоваться этими шестью параметрами, чтобы ответить на вопрос: возможно ли минимизировать процедуру экологического нормирования, ограничившись в качестве отклика экосистемы на антропогенную нагрузку каким-либо одним показателем? С этой целью вычислены коэффициенты парной корреляции  $r$  между каждым из шести названных параметров и ИКС<sub>6</sub>. Наибольшая корреляция обнаружена во всех случаях у общего проективного покрытия (ОПП) травяно-кустарничкового яруса ( $r = 0,97$ ), поэтому кривые ОПП введены на рис. 2.2.

Это означает, что для определения порога токсического воздействия на исследованные лесные экосистемы необходимо и достаточно из биологических параметров измерить только ОПП травяно-кустарничкового яруса, что сильно упрощает всю процедуру экологического нормирования. Такое измерение, как показывает опыт, возможно провести с высокой точностью, если использовать группу наблюдателей-экспертов, прошедших предварительную тренировку, и при условии отсутствия взаимовлияния (анонимный опрос).

Полученный вывод о том, что травяно-кустарничковый ярус более адекватно характеризует лесную экосистему, чем древостой, кажется парадоксальным только с первого взгляда. На самом деле древостой формируется в течение длительного времени и несет в своих параметрах информацию о многих экологических факторах и их изменении в течение десятилетий, в то время как травяно-кустарничковый ярус оперативно реагирует на изменение ситуации.

4. Порог токсического воздействия на кривых ОПП обозначен наиболее четко, тогда как на зависимостях, являющихся суммой многих параметров, он закономерно размыт.

5. На кривых, относящихся к Красноуральскому медеплавильному комбинату и комбинату «Печенганикель», наблюдается парадоксальный участок вблизи порога токсического воздействия, когда при увеличении токсической нагрузки состояние лесных экосистем улучшается. Это связано с эффектом стимулирования роста при малых дозах токсического воздействия и свидетельствует о том, что в

реальных условиях северной тайги лес испытывает недостаток элементов минерального питания.

6. По этой же причине в ряде случаев фоновое состояние леса (при малых токсических нагрузках) характеризуется меньшим значением ИКС.

7. В блоке данных, относящихся к комбинату «Североникель», видно, что древесный ярус не имеет порога токсического воздействия. По-видимому, на северном пределе своего существования древесный ярус в значительно большей степени зависит от суммы экологических условий, чем от воздействия токсических выбросов комбината. А нормирование в зоне влияния атмосферных выбросов комбината «Печенганикель» выполнено вообще без учета древесного яруса.

8. Это указывает на универсальность наблюденных закономерностей, которые, как минимум, годятся для зоны тундр, а вполне возможно и для степей, хотя таких работ нами не проводилось.

9. Подъем ИКС<sub>15</sub> и ИКС<sub>18</sub> в зоне сильного загрязнения Карабашского медеплавильного комбината объясняется учетом почвенных микроартропод и почвенных водорослей, которые в этих условиях дают вспышку численности, занимая освобождающиеся экологические ниши.

### **2.2.5. Расчет норматива**

На пятом этапе работ осуществляется пересчет найденного критерия на выбросы из труб комбината.

Однозначное соответствие между выпадениями из атмосферы ( $\text{мг/м}^2$ ) год с выбросами из труб предприятия (тыс. т в год) определяется расчетами по математическим моделям локального атмосферного переноса, сложность которых определяется необходимостью учета большого количества факторов, характеризующих как сами выбросы, так и климат, рельеф местности, шероховатость поверхности, зависящей также от большого количества факторов и т.д. Во всех случаях это отдельная, самостоятельная научная проблема, требующая разработки громоздких алгоритмов и много часов машинного времени.

Для наших целей приблизительных оценок достаточно воспользоваться простыми модельными соображениями. В применении к условиям КМК рассмотрим три предельных приближения локального атмосферного переноса токсикантов. В приближении диффузии, молекулярной или турбулентной, выбросы осуществляются в объеме шара, обратно пропорционально  $R^3$ ; при строго круговой розе ветров выбросы оседают в площадь круга и распределяются обратно про-

порционально  $R^2$ ; в пределе, если предположить, что ветер круглый год дует в одном направлении и выпадения происходят в коридоре элементарной ширины, распределение выпадений будет подчиняться соотношению обратной пропорциональности.

В реальной обстановке выпадения из атмосферы осуществляются по сценарию, промежуточному между вторым и третьим приближениями и проблема сводится к определению показателя степени в интервале от 1 до 2, в которую надо возвести выпадения, чтобы получить суммарные выбросы из труб. Если изменения этого показателя в интервале от 1 до 2 принять линейным, то он может быть определен по соотношению

$$Y(X) = 1 + 1,11(X - 0,1),$$

где  $X$  – отношение малой и большой осей эллипса, которым аппроксимируется роза ветров в исследуемом районе. Это справедливо, если принять допущение, что элементы рельефа и атмосферная устойчивость мало влияют на форму полей загрязнения. Тогда

$$\text{ЭПДВб} = Q(\text{Вп}_{\text{max}})^{-Y(X)} / \text{ЭПДВп},$$

где ЭПДВб – экологические предельно допустимые выбросы предприятия, тыс.т/год;  $Q$  – текущие выбросы предприятия тыс.т/год;  $\text{Вп}_{\text{max}}$  – максимальное значение выпадений токсикантов окрестностях предприятия в (%), определяемое нами экспериментально. Для Карабашского комбината оно равно 84 %; ЭПДВп – определено нами по порогу токсического воздействия и равно для Карабашского медеплавильного комбината 25 %.

Для розы ветров в районе этого комбината значение  $X$  приблизительно составляет 0,5. Тогда  $Y = 1,44$  и

$$\text{ЭПДВб} = Q(84/25) = Q3,36^{-1,44} = Q/5,7.$$

Иными словами, для того чтобы удовлетворить обнаруженному критерию допустимой нагрузки, выбросы Карабашского медеплавильного комбината должны быть снижены в 5,7 раза. Если такое снижение выбросов комбината реально осуществить, то пораженная зона, являющаяся в настоящее время антропогенной пустыней, лишенной высшей растительности, зарастет (разумеется, не сразу) бе-

резовым лесом, удовлетворяющим критерию допустимой нагрузки. Продолжительность такого сукцессионного процесса, по-видимому, будет не менее 25...30 лет и только при дополнительных рекультивационных работах возможно сокращение этого срока.

Полученные экологические нормативы применимы в регионе, ограниченном критерием инвариантности макроклиматической обстановки. Практически это означает, что на равнине они могут быть использованы в круге радиусом 200...250 км или в квадрате со стороной 400...500 км в пределах одного ботанико-географического района.

Таковы основные этапы процедуры экологического нормирования атмосферных выбросов промышленных предприятий.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ

Наличие высокой корреляции ОПП травяно-кустарничкового яруса со всей лесной экосистемой позволяет сильно упростить описанную методику, сведя исследование биологических параметров только к регистрации ОПП (%) и ЖСД (жизненного состояния древостоя, баллы). Оба параметра регистрируются визуально методом экспертных оценок.

По такой упрощенной методике проведено нормирование атмосферных выбросов Орско-Халиловского металлургического комбината (ОХМК) в Оренбургской области.

ОПП напочвенной растительности (травяно-кустарничкового яруса) определяется на глаз как площадь, на которую эта растительность проектируется и измеряется в процентах от площади всей учетной площадки. Учетная площадка обозначается проволоочной или деревянной рамкой квадратной формы размером  $0,5 \times 0,5$  м<sup>2</sup>. Обычно на пробной площадке проводится оценка ОПП на 15...20 учетных площадках и в качестве измеренного значения ОПП берется среднее арифметическое.

Диапазон изменения ОПП обычно колеблется от 5 до 150 %. Необходимо приобрести определенный навык в оценке ОПП на глаз. Для этого группу экспертов (обычных людей без особой подготовки) некоторое время тренируют в определении различных ОПП под наблюдением специалиста, имеющего опыт такой работы. Соответствующий навык набирается довольно быстро (0,5...1 ч).

ЖСД измеряется на глаз по шестибалльной системе (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Шкала оценки жизненного состояния древостоя в баллах

| Баллы | Состояние древостоя | Признаки                                                                                                                                                                |
|-------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5     | Здоровый            | Внешние признаки повреждений отсутствуют                                                                                                                                |
| 4     | Ослабленный         | Появление отдельных сухих ветвей в кроне (не более 20 %), слабая ажурность кроны, некроз хвои или листьев в пределах 3...10 %, незначительное снижение прироста побегов |

| Бал-<br>лы | Состояние<br>древостоя | Признаки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3          | Сильно<br>ослабленный  | Суховершинность кроны, ажурность ее увеличена, число сухих ветвей варьирует от 20 до 50 %, некроз хвоя и листьев от 10 до 50 %, наблюдается периферийное расположение хвоя, укорачивание длительности жизни хвоя, желтый цвет хвоя или листьев, небольшой прирост побегов                                                                                     |
| 2          | Отмирающий             | Вегетирует незначительная часть побегов, сухих ветвей от 50 до 90 %, прироста практически нет, хвоя и листья желто-бурые, частично осыпающиеся, некрозом охвачено от 50 до 100 % хвоя и листьев. Для ели характерно наличие приземных функционирующих побегов при сухой остальной части кроны (так называемые розетки). Начало поселения стволовых вредителей |
| 1          | Сухостной              | Сухостной. Деревья обработаны стволовыми вредителями                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 0          |                        | Сухостной, лежащий на земле                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

Ниже приводится пример результатов работы группы экспертов на пробной площади ЮВ-3,5 в окрестностях ОХМК (табл. 3.2), где приняты следующие обозначения:

У/п – учетная площадка;

$\Sigma/8$  – среднеарифметическое из 8 значений в строке;

$\Sigma/16$  – среднеарифметическое из 16 значений в столбце.

Результатом работы экспертов на пробной площади ЮВ-3,5 являются значения ОПП = 89,8 % и ЖСД = 4,1 балла.

Таблица 3.2

Пробная площадь ЮВ-3,5

| №           | Эксперты |      |      |       |      |      |      |      |            |
|-------------|----------|------|------|-------|------|------|------|------|------------|
|             | А        | Б    | В    | Г     | Д    | Е    | Ж    | З    | $\Sigma/8$ |
| 1           | 90       | 75   | 80   | 90    | 100  | 75   | 90   | 100  | 87,5       |
| 2           | 55       | 60   | 35   | 70    | 75   | 60   | 75   | 60   | 61,3       |
| 3           | 55       | 55   | 70   | 75    | 70   | 50   | 65   | 70   | 63,8       |
| 4           | 100      | 85   | 95   | 115   | 105  | 80   | 95   | 110  | 98,1       |
| 5           | 100      | 90   | 95   | 110   | 100  | 70   | 110  | 105  | 97,5       |
| 6           | 95       | 95   | 110  | 140   | 97   | 110  | 105  | 100  | 106,5      |
| 7           | 80       | 85   | 93   | 100   | 85   | 80   | 95   | 95   | 89,1       |
| 8           | 90       | 95   | 99   | 140   | 90   | 90   | 80   | 95   | 97,4       |
| 9           | 90       | 95   | 103  | 160   | 87   | 95   | 90   | 100  | 102,5      |
| 10          | 60       | 70   | 80   | 60    | 77   | 65   | 80   | 80   | 71,5       |
| 11          | 55       | 75   | 89   | 90    | 65   | 60   | 75   | 85   | 74,3       |
| 12          | 40       | 60   | 90   | 80    | 60   | 60   | 70   | 90   | 68,8       |
| 13          | 65       | 70   | 90   | 90    | 80   | 80   | 95   | 95   | 83,1       |
| 14          | 110      | 110  | 120  | 130   | 120  | 150  | 115  | 120  | 121,9      |
| 15          | 95       | 130  | 140  | 180   | 105  | 100  | 105  | 115  | 121,9      |
| 16          | 60       | 80   | 107  | 110   | 100  | 90   | 95   | 100  | 92,8       |
| $\Sigma/16$ | 77,5     | 83,1 | 93,5 | 108,8 | 88,5 | 82,2 | 90,0 | 95,0 | 89,8       |
| ЖСД         | 4        | 5    | 4    | 3,5   | 5    | 4,5  | 1,5  | 5    | 4,1        |

Полученные результаты для ОХМК представлены на рис. 3.1 и в табл. 3.3, где в числителе приведены абсолютные значения измеренных параметров, а в знаменателе – относительные величины, полученные путем нормирования максимального значения в выборке на 100 %.

Таблица 3.3

**Биологические параметры природных систем в зоне влияния  
атмосферных выбросов ОХМК**

| Год  | Показатель |       | Пробные площади |      |      |        |      |       |       |
|------|------------|-------|-----------------|------|------|--------|------|-------|-------|
|      |            |       | ЮЗ-11           | Ю-5  | Ю-4  | ЮВ-3,5 | Ю-3  | Ю-2,7 | В-1,5 |
| 1996 | ЖСД        | баллы | 5,0             | 4,3  | 4,2  | 4,1    | 2,8  | 2,7   | 1,5   |
|      |            | %     | 100             | 86   | 84   | 82     | 56   | 54    | 30    |
|      | ОПП        | %     | 114,9           | 60,6 | 96,6 | 89,8   | 46,7 | 50,9  | 35,2  |
|      |            | % %   | 100             | 53   | 84   | 78     | 41   | 44    | 31    |
| 1998 | ЖСД        | баллы | 3,9             | 3,0  | 2,2  | 2,9    | 2,5  | 2,9   | 2,4   |
|      |            | %     | 100             | 76,9 | 56,4 | 74,4   | 64,1 | 74,4  | 61,5  |
|      | ОПП        | %     | 45,0            | 53,2 | 58,1 | 26,8   | 13,2 | 22,9  | 16,8  |
|      |            | %     | 77,5            | 91,6 | 100  | 46,1   | 22,7 | 39,4  | 29,0  |
|      | ИКС        | %     | 88,8            | 84,2 | 78,2 | 60,2   | 43,4 | 56,9  | 45,2  |

Снижение норматива по сравнению с 1996 г. вероятнее всего произошло из-за возможного спада производства, в то время как снижение значения ИКС в 1998 г. по сравнению с 1996 г. можно скорее всего объяснить засушливым летним сезоном 1998 г.

В целом по всем исследованным комбинатам полученные результаты могут быть представлены в виде кратности превышения текущих атмосферных выбросов над допустимыми:

$$\text{КМК} = 5,7 \pm 0,8$$

$$\text{КрМК} = 3,5 \pm 0,5$$

$$\text{«Североникель»} = 3,7 \pm 0,6$$

$$\text{«Печенганикель»} = 6,3 \pm 0,9$$

$$\text{ОХМК} = 9(6) \pm 1,0 \text{ (результат в скобках относится к 1998 г.)}$$

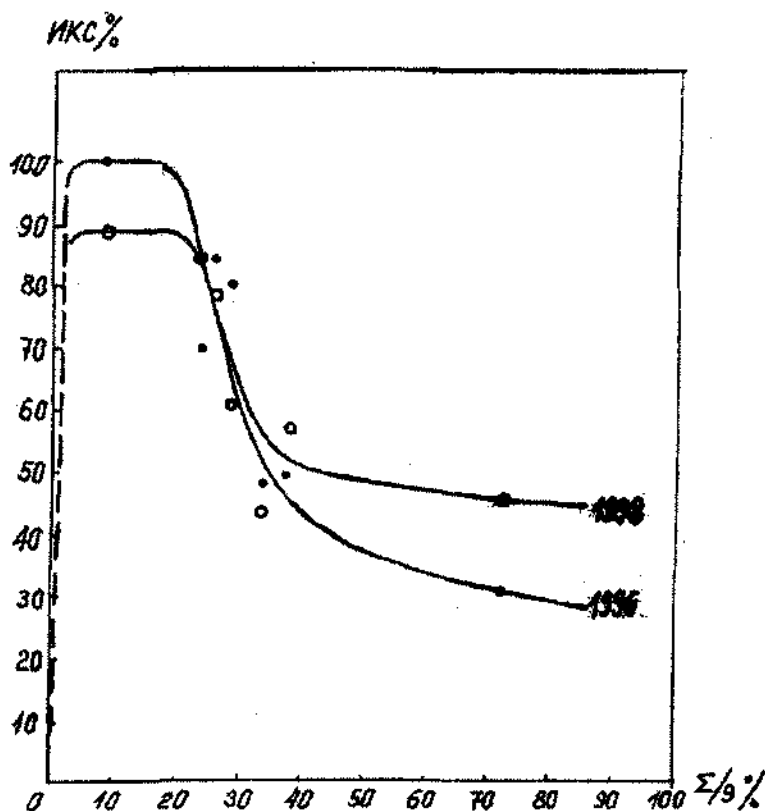


Рис. 3.1. Зависимости доза – эффект для Орско-Халиловского металлургического комбината

Снова отметим, что относительно большие значения для комбината «Печенганикель», ОХМК и КМК объясняются тем, что в этих регионах лесные системы находятся на экологических пределах своего существования (на северном, в случае комбината «Печенганикель», и на южном, в случаях КМК и ОХМК).

Наконец, необходимо коснуться еще одного аспекта описанной методики – возможности применения ее для другого объекта – автодороги, являющейся также источником воздействия дымо-газовых выбросов на лесные экосистемы.

В качестве объекта исследований была взята Московская кольцевая автодорога (МКАД) как наиболее напряженная автомагистраль страны (6,5 тысячи автомашин в час).

В последнее время в районе МКАД было замечено резкое ухудшение состояния лесных экосистем. Обратил на себя внимание внезапный и резкий характер воздействия, что обычно свидетельствует о пороговом свойстве доза – эффект зависимостей, поэтому применение методики экологического нормирования атмосферных выбросов металлургических комбинатов к новому объекту – МКАД представляется вполне логичным.

В течение 1999 – 2001 гг. с учетом розы ветров Московского региона были проведены соответствующие измерения зимой и летом на четырех трансектах, перпендикулярных полотну автодороги в районах: Ясенево, Рублево, Лосиный остров, Капотня на одних и тех же пробных площадях на расстояниях 10, 30, 70, 110, 200, 400 м от полотна автодороги (рис. 3.2). В табл. 3.4 и на рис. 3.3 приводятся данные для трансекты Капотня, обобщенные за весь период измерений.

Порог токсического воздействия на лес в районе 70 % превышен пока не более чем на  $20/70 = 28...30\%$ .

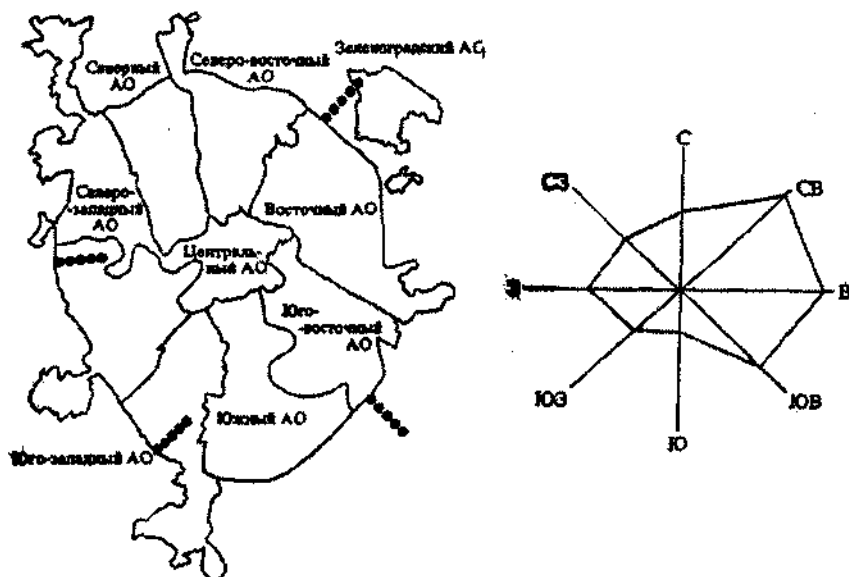


Рис. 3.2. Расположение пробных площадей в районе МКАД.

Дозы воздействия и параметры лесных экосистем на трансекте Капотия в 1999 – 2001 гг.

| Элемент             | 10 м   |      | 30 м   |      | 70 м   |      | 110 м  |      | 200 м |      | 400 м  |      |
|---------------------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|-------|------|--------|------|
|                     | мкг/л  | %    | мкг/л  | %    | мкг/л  | %    | мкг/л  | %    | мкг/л | %    | мкг/л  | %    |
| Cu                  | 15,3   | 92,7 | 15,7   | 95,2 | 8,5    | 51,5 |        |      | 16,5  | 100  | 7,4    | 44,8 |
| Zn                  | 112    | 82,5 | 71,8   | 53,1 | 135    | 100  | 74,0   | 54,7 | 105   | 77,4 | 15,8   | 11,7 |
| Pb                  | 26,4   | 97,1 | 27,2   | 100  | 9,3    | 34,2 | 20,7   | 76,1 | 7,9   | 29,0 | 12,0   | 44,1 |
| Cd                  | 0,34   | 77,3 | 0,44   | 100  | 0,23   | 52,3 | 0,29   | 65,9 | 0,2   | 45,5 | 0,08   | 18,2 |
| Ni                  | 3,2    | 82,1 | 3,9    | 100  | 1,2    | 30,8 |        |      | 0,7   | 17,9 | 1,6    | 41,0 |
| Mn                  | 42,0   | 100  | 36,9   | 87,9 | 24,6   | 58,6 | 39,3   | 93,6 | 10,9  | 26,0 | 10,7   | 25,5 |
| Fe                  | 2820   | 100  | 2375   | 84,2 | 532    | 18,9 | 1402   | 49,7 | 335   | 11,9 | 444    | 15,7 |
| $\Sigma/7$          | 90,2   |      | 88,6   |      | 49,5   |      | 68,0   |      | 44,0  |      | 28,7   |      |
| 1/ОПП,<br>%         | 0,0098 |      | 0,0097 |      | 0,0110 |      | 0,0113 |      | ,0135 |      | 0,0125 |      |
|                     | 72,6   |      | 71,8   |      | 81,5   |      | 83,7   |      | 1000  |      | 92,6   |      |
| ЖСД,<br>баллы,<br>% | 1,1    |      | 2,5    |      | 2,9    |      | 3,1    |      | 2,4   |      | 2,5    |      |
|                     | 35,5   |      | 80,6   |      | 82,9   |      | 100    |      | 77,4  |      | 80,6   |      |
| ИКС,<br>%           | 54,6   |      | 76,2   |      | 82,2   |      | 91,8   |      | 88,7  |      | 86,6   |      |

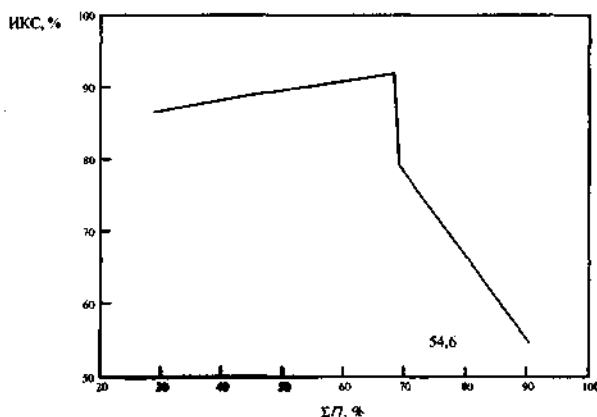


Рис. 3.3. Доза – эффект зависимость для лесных экосистем в районе Капотни

Результаты исследований наглядно доказывают возможность использования данной методики для оценки воздействия на лесные экосистемы антропогенных выбросов загрязняющих веществ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

*Степанов А.М.* Экспериментальное определение допустимой антропогенной нагрузки на лесные экосистемы//Проблемы устойчивости биологических систем: Сб. ст. Харьков, 1990. С. 352 – 353.

Комплексная экологическая оценка техногенного воздействия на экосистемы южной тайги / А.М. Степанов, Р.Р. Кабиров, Т.В. Черненкова и др. М.: ЦЭПЛ, 1992. 246 с.

*Черненкова Т.В., Степанов А.М.* Воздействие металлургических производств на лесные экосистемы Кольского полуострова. М.: ЦЭПЛ, 1995. 251 с.

**СТЕПАНОВ Александр Михайлович**  
**БАРЫШЕВА Ирина Викторовна**

## **ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Учебное пособие**

Редактор *Г.Б. Преображенская*

Компьютерная верстка *М.А. Шамариной*

---

|                                             |                 |                  |
|---------------------------------------------|-----------------|------------------|
| Подписано в печать 5.12.05                  | Бумага офсетная |                  |
| Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> | Печать офсетная | Уч.-изд. л. 2,25 |
| Рег. № 774                                  | Тираж 180 экз.  | Заказ 945        |

---

Московский государственный институт стали и сплавов,  
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4

Издательство «Учеба» МИСиС,  
117419, Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9  
Тел.: 954-73-94, 954-19-22

Отпечатано в типографии издательства «Учеба» МИСиС,  
117419, Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9  
ЛР №01151 от 11.07.01