



Б. И. Марченко

Анализ риска: основы оценки экологического риска



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-технологическая академия

Б. И. МАРЧЕНКО

**АНАЛИЗ РИСКА: ОСНОВЫ ОЦЕНКИ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА**

Учебное пособие

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2018

УДК 502/504(075.8)

ББК 20.1я73

М30

*Печатается по решению кафедры техносферной безопасности и химии
Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного
Федерального университета (протокол № 6 от 16 февраля 2018 г.)*

Рецензенты:

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой гигиены
факультета повышения квалификации и профессиональной переподготовки
специалистов Ростовского государственного медицинского университета

Г. Т. Айдинов

доктор медицинских наук, заведующий лабораторией санитарной
микробиологии водных объектов и микробной экологии человека
Ростовского научно-исследовательского института микробиологии и
паразитологии *П. В. Журавлев*

Марченко, Б. И.

М30 Анализ риска: основы оценки экологического риска : учебное посо-
бие / Б. И. Марченко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-
Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета,
2018. – 148 с.

ISBN 978-5-9275-3061-8

В учебном пособии дается представление о различных видах риска; рас-
сматриваются принципы и закономерности формирования экологического рис-
ка; основные понятия, цели и задачи методологии анализа и оценки экологиче-
ского риска, обусловленного неблагоприятными воздействиями на окружаю-
щую среду, включая последствия чрезвычайных ситуаций природного, антро-
погенного и техногенного характера.

Изложены основные принципы и критерии, лежащие в основе междунаро-
дно признанной методологии оценки экологического риска и риска для здоровья
населения, концепция которого в настоящее время рассматривается как основ-
ной инструмент научного обоснования разрабатываемых оптимизационных
управленческих решений в сфере охраны окружающей среды. Подробно рас-
смотрен алгоритм процедуры оценки риска, включающий этапы идентификации
опасности, оценки зависимости «доза – ответ», оценки экспозиции и характери-
стики риска.

Для студентов специальности 20.03.01 «Техносферная безопасность».

УДК 502/504(075.8)

ISBN 978-5-9275-3061-8

ББК 20.1я73

© Южный федеральный университет, 2018

© Марченко Б. И., 2018

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНТРОПОГЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ КАК ИСТОЧНИКИ РИСКА	6
1.1. Классификация антропогенных факторов риска	8
1.2. Воздействие человека и техносферы на окружающую среду	10
1.3. Техногенные и природно-техногенные системы	13
1.4. Влияние техногенных систем на окружающую среду	19
1.5. Загрязнение окружающей среды	23
2. РИСКИ. ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА РИСКА	25
2.1. Классификации рисков	27
2.2. Принципиальная схема анализа риска	30
2.3. Экологические риски	33
2.4. Особенности восприятия экологического риска населением..	36
2.5. Методологические подходы к оценке экологического риска..	39
2.6. Оценка экологических рисков в техносфере	43
3. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ	52
3.1. Введение в анализ экологического риска для здоровья	55
3.2. Идентификация опасности	64
3.3. Оценка зависимости «доза – ответ»	86
3.4. Оценка экспозиции	105
3.5. Характеристика риска	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	146

ВВЕДЕНИЕ

Резкий рост численности населения Земли на протяжении XX в. и многократное увеличение объемов промышленного и сельскохозяйственного производства, выработки энергии сопровождалось экстремально быстрым развитием и повсеместным распространением новых технических систем и технологических процессов. Итогом этого явилось значительное увеличение доли обусловленных деятельностью людей потоков вещества, энергии и информации в общем биогенном круговороте, и как следствие этого – экстремальные изменения в функционировании всей биосферы.

В области охраны окружающей среды в последние десятилетия находят широкое применение понятия *техногенеза* и *техносферы*. Под **техногенезом** принято понимать комплекс процессов, связанных с формированием элементов материальной культуры и совершенствованием техники, что неизбежно приводит к изменениям в окружающей среде, включая среду обитания человека. **Техносфера** в настоящее время рассматривается как континуум всех видов технической деятельности людей, который полностью охватывает ландшафтную оболочку нашей планеты, проникает в глубины литосферы и выходит в космическое пространство за пределы атмосферы. Техносфера принципиально отличается от любой другой из оболочки Земли, биосферы и ноосферы, и по своему генезису, и по специфике становления, и по динамике развития, и по уровню активности. Само понятие «техносфера» указывает на ее «искусственный» характер, подчеркивает приоритетную роль техники в жизнедеятельности людей [5, 11].

Деятельность людей связана с вовлечением различных природных ресурсов в так называемый **ресурсный цикл**, представляющий собой многоэтапные трансформации и перемещения в пространстве веществ, используемых человеком, включая их добычу, переработку, превращения и заключительную утилизацию с возвращением в природу. Ресурсные циклы протекают совместно с естественными циклами соответственно в социально-экономической и природной средах, составляя с последними единые **естественно-ресурсные циклы**.

Деятельность людей в настоящее время обуславливает значительную часть суммарной биогеохимической динамики веществ на Земле.

Так, человечество потребляет более 2 % пресной воды, поступающей в биосферный круговорот от растений суши за счет процесса *транспирации* – прохождения влаги через растения и последующего испарения с поверхности листьев, стеблей и цветков. Почти 20 % всего биотического газообмена приходится на его антропогенный компонент, люди используют 10 % общей продукции биомассы на нашей планете, а ежегодный дефицит в балансе вещества достиг почти 100 млн тонн. Сегодняшняя, на начало XXI в., ситуация расценивается как критическая в связи с тем, что: во-первых, потребление ресурсов планеты намного превышает скорость их естественного воспроизводства, а это является причиной необратимой качественной и количественной деградации литосферы и биосферы; и, во-вторых, происходит интенсивное загрязнение биосферы производственными и бытовыми отходами, сопровождающееся нарушениями экологических систем и состояния здоровья человеческой популяции [15].

Высокая интенсивность применения природных ресурсов и сопутствующая этому деградация окружающей среды связана одновременно как с научно-технической революцией, так и с демографической ситуацией (увеличение численности населения и активные процессы урбанизации). Принципиальная схема взаимодействия следствий научно-технической революции и демографических процессов в рамках системы «социум – окружающая среда» объединяет в себя две подсистемы – *социально-экономическую* и *природно-ресурсную* (рис. 1).



Рис. 1. Взаимодействие основных факторов в системе «социум – окружающая среда» (по В.Ф. Протасову и А.В. Молчанову, 1995)

1. АНТРОПОГЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ КАК ИСТОЧНИКИ РИСКА

Воздействие человека на окружающую среду реализуется посредством **антропогенных факторов** – обусловленных процессами социального обмена веществ и энергии явлений, процессов, объектов и веществ, которые влияют на природные системы сообща с факторами естественного происхождения. Основной удельный вес в структуре антропогенных факторов приходится на результаты производственной деятельности человека, и лишь незначительная их доля представлена благоприятными воздействиями, например, организация водохранилищ и лесопосадки.

Одна из классификаций антропогенных факторов предусматривает подразделение их на четыре группы:

- **факторы-тела** – рельеф, водоемы, обрабатываемые почвы, сооружения и другие подобные, которые в ряде случаев обладают ограниченными пространственными пределами и значительной продолжительностью воздействия, вплоть до веков и тысячелетий. Основная часть факторов-тел не обладает подвижностью, исключения составляют *интродуцированные организмы*, обладающие способностью к перемещению в пространстве либо за счет способности к передвижению (животные) и переносу спор и семян растений (под биологической интродукцией подразумевается преднамеренное или случайное переселение особей какого-либо вида животных и растений за пределы естественного ареала в новые для них места обитания; интродукция является процессом введения в некую экосистему чужеродных ей видов);

- **факторы-вещества**, к которым относятся химические вещества и соединения, в том числе радиоактивные и искусственно созданные, присутствующие в сточных водах, выбросах в атмосферный воздух и других средах. После попадания в окружающую среду факторы-вещества не обладают пространственной стабильностью, их концентрация, локализация и интенсивность влияния на компоненты природы динамичны. Те факторы-вещества, которые обладают значительной устойчивостью в окружающей среде, способны накапливаться (акку-

мулироваться) в ней и сохраняться в неизменном виде десятилетиями и даже веками;

- **факторы-процессы**, включая многообразную деятельность людей, влияние на окружающую среду домашних животных и сельскохозяйственных растений, добыча полезных ископаемых из литосферы, гидросферы и атмосферы, антропогенные эрозия почв и круговорот веществ и другие. Факторы-процессы могут быть приурочены как к ограниченному, так и к значительным пространствам; способны непосредственно или косвенно влиять на окружающую среду (например, коррозия материалов и эрозия почв);

- **факторы-явления** – тепловые излучения, магнитные и электромагнитные поля, вибрация и шум, загрязненность атмосферного воздуха, водной среды и другие. Факторы-явления обладают определенными качественными и количественными параметрами воздействия на окружающую среду, во многом определяющимися удалением от их источников.

Собственно антропогенными факторами допустимо признавать только те созданные людьми объекты и вещества, а также обусловленные их деятельностью явления и процессы, которые отсутствовали в окружающей среде до появления *Homo sapiens*. Подобные антропогенные факторы могут иметь региональный характер, если они отсутствовали до вмешательства людей только в данном регионе, или быть сезонными, не существовавшими ранее в соответствующем сезоне.

Если какие-либо вещества, объекты, явления или процессы антропогенного происхождения по своим параметрам соответствуют уже существующим природным аналогам в данном пространственном континенте и в данный период времени, то антропогенными эти факторы можно признать лишь в том случае, если они количественно преобладают над естественным фоном (например, если тепло, излучаемое промышленными источниками в окружающую среду, обуславливает повышение ее температуры). Подобные факторы следует обозначать как **количественно-антропогенные**.

Если человеческое влияние проявляется в форме трансформации материальных объектов, явлений или процессов в какое-либо иное новое качество, причем подобный переход имеет место в природе и без участия

людей, то факторы, детерминирующие указанные процессы, обозначаются как **качественно-антропогенные** (например, вода, образовавшаяся при таянии ледников из-за антропогенного потепления климата) [3, 8, 11].

1.1. Классификация антропогенных факторов риска

По природе:

- *механические* (например, препятствия для миграции ихтиофауны при строительстве гидросооружений);
- *физические* (например, электромагнитные поля или ионизирующие излучения);
- *химические* (химические элементы и соединения – ксенобиотики и другие экотоксиканты);
- *биологические* (например, воздействие интродуцированных организмов, естественный отбор под влиянием человеческой деятельности);
- *ландшафтные*, к которым относятся искусственные водоемы и водотоки, изменения рельефа и другие.

По общим особенностям:

- *первичные* – непосредственно обусловленные человеком;
- *вторичные* – формирующиеся в окружающей среде под комплексным влиянием первичных антропогенных и естественных факторов (например, химические соединения, образующиеся при разложении пестицидов в окружающей среде).

По времени происхождения и воздействия:

- *появившиеся в прошлом* – во-первых, уже прекратившие свое воздействие, но при сохранении его последствий; во-вторых, воздействии которых продолжается в настоящем (например, созданное ранее водохранилище или интродуцированный биологический вид);
- *производимые и воздействующие непосредственно в настоящее время* – во-первых, воздействующие в момент генерации (радиоволны, ионизирующие излучения и другие); во-вторых, воздействующие определенный временной период по завершении производства (например, стойкие химические экотоксиканты, попавшие в окружающую среду).

По длительности воздействия:

- *актуальные только во время их генерации* (вибрация, шум, электромагнитные поля, ионизирующие излучения и другие);
- *кратковременного воздействия* (например, попадание в почву быстро испаряющихся химических соединений);
- *длительного воздействия* (загрязнение местности долгоживущими радиоактивными изотопами, созданный человеком искусственный рельеф, интродуцированные биологические виды и другие).

По возможности аккумуляции в окружающей среде:

- *не способные к аккумуляции*, характеристики которых определяются объемом и интенсивностью воздействия (например, шумовое и вибрационное воздействие);
- *способные к кратковременной аккумуляции*, что обуславливает усиление их влияния (например, запыление атмосферного воздуха);
- *способные к неопределенно продолжительной и непрерывной аккумуляции* (радионуклиды с продолжительным временем полураспада, стойкие химические поллютанты, изъятие ископаемых и другие).

По способности к миграции в окружающей среде:

- *не способные к миграции*, воздействующие в точке генерации или на определенной дистанции от нее (например, вибрация и шумовое воздействие, электромагнитные поля);
- *мигрирующие с потоками атмосферного воздуха или воды* (пыль, химические экотоксиканты и другие);
- *мигрирующие со средствами их генерации* (различные транспортные средства, люди);
- *способные к самостоятельной миграции* (например, подвижные организмы).

По масштабам воздействия:

- *воздействующие только в точке генерации* (например, механическое воздействие);
- *воздействующие в точке их генерации и на определенной от нее дистанции* (взвешенные вещества в воде и другие);
- *способные к воздействию на любом расстоянии* (например, стойкие химические вещества в атмосфере, долгоживущие радионуклиды).

По стойкости вызываемых изменений в окружающей среде:

- *обуславливающие относительно кратковременные обратимые изменения* (загрязнение воды и воздуха не стойкими веществами и другие);
- *обуславливающие относительно необратимые изменения* (некоторые варианты интродукции биологических видов, организация водохранилищ и искусственных водотоков и другие);
- *способные вызывать абсолютно необратимые изменения в окружающей среде* (полное уничтожение биологических видов, изъятие полезных ископаемых и другие).

По видам деятельности человека – связанные с:

- индивидуальным воздействием (например, браконьерство);
- промышленным производством;
- добычей полезных ископаемых;
- энергетическими отраслями (теплоэнергетикой, гидроэнергетикой, атомной энергетикой и другими);
- обрабатывающей промышленностью – металлургической, химической, металлообрабатывающей, пищевой и другими отраслями;
- сельскохозяйственным производством (растениеводство и животноводство);
- здравоохранением (зоны рекреации, курорты и т.д.);
- охраной природы (например, заповедники и заказники, биотехнические мероприятия);
- транспортом, строительной индустрией, лесной промышленностью, охотопромыслом, сбором дикоросов [2, 8, 15].

1.2. Воздействие человека и техносферы на окружающую среду

Антропогенное и техногенное воздействие представляет собой *влияние производственной и непроизводственной деятельности людей на свойства природных систем*, подразделяемое на категории в соответствии:

- **с общим характером антропогенных воздействий, определяемых видами деятельности людей**, включая, во-первых, транс-

формацию ландшафтов и нарушение целостности природных комплексов; во-вторых, изъятие полезных ископаемых и других природных ресурсов; в-третьих, загрязнения окружающей среды;

- **материально-энергетической природой воздействий**, включая механические, физические, физико-химические, химические, биологические факторы и агенты, а также их разнообразные комбинации;

- **категориями объектов влияния** (природные ландшафты, недра, флора и фауна, гидросфера и атмосфера, человек и другие);

- **количественными характеристиками влияния** – пространственными масштабами (глобальные, региональные и локальные), единичностью или множественностью, интенсивностью воздействий и степенью их опасности (соответствие регламентам, уровень риска и т.п.);

- **временными параметрами и различиями влияний по специфике наступающих изменений**: обратимые и необратимые, стойкие и нестойкие, прямые и опосредованные, кратковременные и длительные, с выраженными или скрытыми следовыми эффектами и т.п.

- **формами влияния человека на окружающую среду**:

- *прямое влияние* (непосредственное), например, освоение земель для сельскохозяйственного производства; сооружение водохранилищ и искусственных водотоков (каналов); строительство городов и промышленных объектов; добыча полезных ископаемых и т.д. Дифференцируют *антропическую* (непосредственное влияние человека как живого организма); *антропогенную* (хозяйственная деятельность человека), *аддитивную* (совокупную), *кумулятивную* (с накоплением эффекта) и *синэргическую* (потенцирование эффектов за счет сочетания факторов) *формы прямого воздействия*;

- *опосредованное влияние*, например, непреднамеренная трансформация окружающей среды из-за цепных реакций либо вторичных эффектов, обусловленных хозяйственной деятельностью людей (например, загрязнение окружающей среды, процессы эрозии и опустынивания);

- **преднамеренностью влияния человека на окружающую среду**:

- *преднамеренное воздействие* представляет собой сознательное запланированное целенаправленное действие, осуществляемое в интересах удовлетворения определенных потребностей социума (например,

освоение земель под сельскохозяйственное производство; сооружение водохранилищ, каналов и оросительных систем; строительство городов и промышленных предприятий);

○ *непреднамеренное воздействие* – это побочные эффекты преднамеренного воздействия (например, загрязнение окружающей среды, изменения климата, разрушение озонового слоя), которые не всегда сразу проявляются и часто носят негативный характер;

• **особенностями технических средств**, посредством которых осуществляется воздействие людей на окружающую среду:

○ *стационарные средства* – это различные инженерные сооружения, созданные людьми с применением искусственных или естественных материалов (промышленные предприятия, плотины, каналы и т.п.). Их воздействие, как правило, пространственно локализовано и в большинстве случаев непрерывно во времени;

○ *нестационарные средства* (машины, оборудования и другие средства производства), характер воздействия которых имеет кратковременный характер; их воздействие может периодически повторяться, но не может быть непрерывным; последствия такого воздействия могут сохраняться длительное время;

• **различиями в характере воздействия различных технических средств (техносферы) на окружающую среду:**

○ *производственные системы* объединяют добывающие (горно-промышленные, лесохозяйственные, сельскохозяйственные и другие) и перерабатывающие предприятия. Воздействие на окружающую среду добывающих предприятий обусловлено, во-первых, изъятием из нее веществ и энергии, и, во-вторых, загрязнением ее отходами производства. Для *перерабатывающих* предприятий в основном свойственен второй путь;

○ *управляющие системы* могут быть неподвижными и регулирующими объектами. *Неподвижные* объекты (например, лесные полосы или противоселевые сооружения) преднамеренно ускоряют, замедляют или полностью останавливают потоки воздуха, воды, снега, твердых частиц и т.д. *Регулирующие объекты* обладают подвижными устройствами, которые позволяют направленно изменять потоки веществ (плотины, затворы на каналах и другие);

○ примерами *нейтральных сооружений* являются здания, дороги, мосты, нефтепроводы и другие подобные объекты, не рассчитанные на изъятие веществ и энергии, не образуют отходов, но способные являться преградой для воды, атмосферного воздуха или миграции животных.

Иными словами, вариантами **антропогенного воздействия (влияния техносферы) на окружающую среду** являются: во-первых, *изъятие вещества и энергии*; во-вторых, *выбросы и сбросы отходов производства или других химических веществ* (например, пестицидов), а также *энергии*; в-третьих, *перераспределение вещества и энергии в окружающей среде, трансформации компонентов или процессов в природных системах*; в-четвертых, *привнесение в природные системы чуждых технических или техногенных объектов*.

Мерой антропогенного влияния на окружающую среду в виде изъятий, привнесений или перемещений веществ и энергии является **нагрузка**. Принципиально важным является определение **нормы нагрузки**, под которой понимается та величина антропогенного воздействия, которая не приводит к нарушениям функций природной системы. При этом **критической** или **предельно допустимой нагрузкой (ПДН)** признается та, при превышении которой происходит деструкция структуры природной системы и нарушение ее функций [2, 11, 15].

1.3. Техногенные и природно-техногенные системы

Одной из базисных потребностей человека является потребность в безопасности, в том числе в минимизации или полном устранении риска возникновения экологически обусловленной и экологически зависимой патологии, техногенных аварий и катастроф.

Активная *техногенная деятельность* людей по формированию искусственной среды обитания, включая прогресс промышленного производства и энергетики, привела к деструктивным изменениям в биосфере с формированием принципиально нового типа среды обитания – *техносферы*, объединяющей в себе всю совокупность материальных результатов человеческой деятельности, что часто сопровождается

ухудшением состояния здоровья населения на популяционном уровне, материальными потерями и другими нежелательными эффектами. Процессы модификации окружающей среды, происходящие под воздействием производственной деятельности человека, принято обозначать термином «техногенез». Техногенез объединяет неоднородные процессы *преобразования биосферы под комплексным воздействием процессов геохимической природы, которые обусловлены деятельностью человечества по изъятию из окружающей среды, сосредоточиванию и перегруппировке химических элементов, их минеральных и органических соединений*. Техногенез, с точки зрения экологии, рассматривается как *финальная стадия эволюционного развития биосферы, сопровождаемая нарушениями баланса в природе, установившегося функционирования и замкнутости контуров биотических круговоротов из-за антропогенного привнесения в окружающую среду чужеродных для нее веществ, явлений и процессов*. При этом распространение техносферы по поверхности Земли принято называть *техносферогенезом*. Иными словами, техносфера, изначально сотворенная людьми в целях максимального удовлетворения их потребностей в безопасности и комфорте, сама начинает играть роль нового источника различных опасностей.

К основным тенденциям техногенеза в новейшей истории относятся, во-первых, рост потребления энергии; во-вторых, модификация структуры топливного баланса с переходом от преимущественного использования дров и угля к доминированию углеводородного топлива, а также увеличение доли альтернативных вариантов энергетики, в том числе ядерной и гидроэнергетики; в-третьих, многократное увеличение добычи и переработки минеральных руд и нерудных материалов (полезных ископаемых); в-четвертых, существенный рост объемов и видоизменение структуры машиностроительной отрасли (развитие станкостроения, производства двигателей внутреннего сгорания, автомобилей, электроники и автоматики; военно-промышленного комплекса); в-пятых, интенсивные процессы химизации во всех отраслях хозяйственной деятельности (многократный рост производства минеральных удобрений, пестицидов, пластмасс, лекарственных препаратов, синтетических моющих средств, синтетических волокон и т.д.); в-шестых, урба-

низация с ростом и развитием городов, увеличением доли городского населения, преобразованиями в сельской местности. Важнейшим результатом техногенеза стало то, что в настоящее время объем потоков материи и энергии, связанных с производственной деятельностью человека, стали практически сравнимыми с масштабами однотипных процессов в природе. Особое значение имеет то, что техногенный круговорот веществ в значительной степени является разомкнутым, что нарушает изначальную относительную замкнутость биотического круговорота и соответственно устойчивость баланса в биосфере. За счет деятельности человека происходит не только замещение исходной биосферы, формирующейся техносферой, но и угнетение процессов саморегуляции, происходящих в рамках биосферы. Компоненты техносферы интегрируются в окружающую среду, взаимодействуют с существовавшими изначальными природными системами, что приводит к формированию систем принципиально нового уровня – нообиогеоценозов, компонентом которых являются нооценозы, представляющие собой объединение социума, средств и продуктов трудовой деятельности.

Вариантами нообиогеоценозов являются:

- *технобиогеоценозы*, которые формируются при организации, функционировании и развитии объектов промышленности;
- *агроценозы*, обусловленные деятельностью людей в сфере сельскохозяйственного производства;
- *урбабиогеоценозы*, образующиеся как итог строительства городских и поселковых населенных пунктов, транспортных коммуникаций.

Техносфера, как коренным образом преобразованная человеком при непосредственном либо косвенном воздействии технических средств часть биосферы, подразделяется на *природно-техногенные* и *собственно техногенные системы*. Важнейшим компонентом техносферы является *производственная среда* – континуум, в котором проходит трудовая деятельность людей. В пределах техносферы проживает практически все урбанизированное население, новые, *техносферные, условия обитания* которого (производственные, транспортные и бытовые) *существенно отличаются от исходных биосферных условий, прежде всего*

повышенной интенсивностью воздействия неблагоприятных техногенных факторов риска.

Результаты взаимодействия людей с окружающей средой могут варьировать в значительном диапазоне от благоприятных до катастрофических, сопровождающихся гибелью людей и деструкцией компонентов среды обитания. Приоритетными причинами экологических бедствий являются *техногенные катастрофы* и *аварийные ситуации* с массовым выбросом химических и радиоактивных поллютантов, обуславливающие непоправимый ущерб для окружающей среды и экологических систем.

Техногенные системы как *сложные, искусственно созданные людьми конструкты, которые, являясь открытыми, функционируют во взаимодействии с окружающей средой, обмениваясь с ней веществами и энергией*, дифференцируются:

- *по отрасли промышленности* на добывающие, энергетические, перерабатывающие, транспортные, сельскохозяйственные и другие;
- *по размеру занимаемой территории* – в диапазоне от небольшого производственного объекта до огромного территориально-производственного комплекса;
- *по степени урбанизированности территории* – от небольшого поселка городского типа до мегаполиса;
- *по уровню воздействия на окружающую среду*, определяемому количественными и качественными параметрами выбросов и сбросов;
- *по резистентности к внешним и внутренним трансформациям.*

Основными *типами техногенных систем* являются селитебные, относящиеся к жилой зоне и инфраструктуре, промышленные, транспортные, рекреационные, лесотехнические, водоохраные и сельскохозяйственные (агроландшафты). Границы техногенной системы определяются *границами зоны влияния входящих в систему промышленных предприятий на окружающую среду*. Суммарное воздействие антропогенных составляющих природно-техногенной системы на природные компоненты можно определить как **техногенную нагрузку**. Факторами риска для окружающей среды являются, во-первых, *потенциальные источники опасности* (например, объекты для хранения высокоток-

сичных химических или радиоактивных отходов) и *экстремальные условия их функционирования* (высокое давление, гидравлические удары и другие); во-вторых, *события, инициирующие катастрофы и аварии* (нарушения технологических процессов и спонтанные технологические реакции – взрывы, разгерметизация, неисправности оборудования и другие); в-третьих, *факторы, способствующие эскалации аварии* (например, ошибки персонала, отказ систем безопасности, неблагоприятные метеорологические условия); в-четвертых, *выбросы и сбросы экополлютантов, накопление токсичных веществ и их последствий в окружающей среде*.

Биологический обмен веществ, на протяжении столетий бывший основой взаимодействия человека и окружающей среды, в ходе становления современной цивилизации заменялся **социальным обменом веществ и энергии** между человеческим обществом и природой. Для оценки воздействия людей на природу оптимальной является **система социального обмена веществ** (Лаптев И.П., 1975), в соответствии с которой все техногенные системы дифференцируют на четыре типа:

- **захватывающей системы**, забирающей из окружающей среды вещества и энергию, а затем трансформирующей их в состояние, доступное для транспортирования (например, горнорудные и сельскохозяйственные предприятия);

- **перерабатывающей системы**, основной задачей которой является преобразование захваченных веществ и энергии в доступное для использования человеком состояние (например, перерабатывающая промышленность и очистные сооружения системы централизованного водоснабжения);

- **выделительной системы**, обеспечивающей предотвращение или минимизацию нежелательного воздействия на население и среду его обитания неусвоенных социумом веществ и энергии (например, очистные сооружения);

- **транспортирующей системы**, основная задача которой состоит в сокращении потерь и ускорении транспортировки веществ и энергии, к которой относятся все виды транспорта (рис. 2).

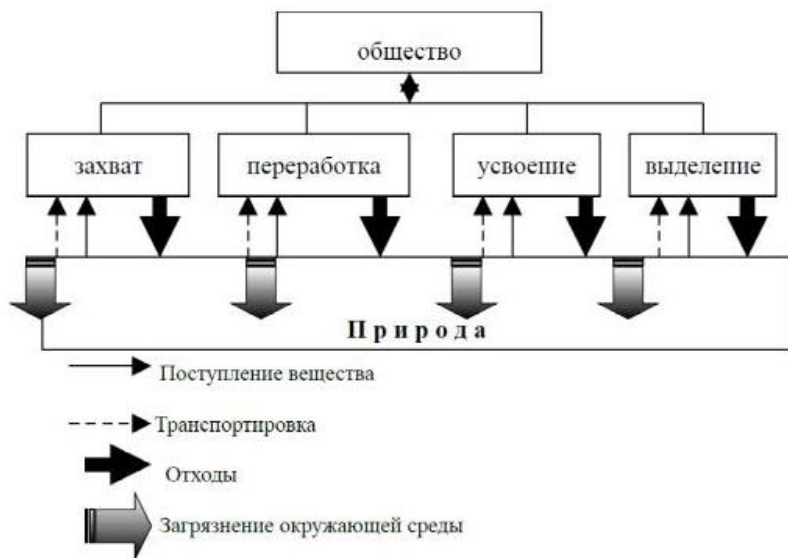


Рис 2. Социальный обмен веществ и энергии

Дифференцируют несколько *типов социального обмена веществ и энергии*, включая:

- **автономный тип** с практически полным обеспечением ячейки общества необходимыми веществами и энергией из непосредственно окружающей ее природы, без транспортирования их из-за пределов ячейки (типичен для докапиталистических формаций). Для автономного типа свойственно слабое воздействие на окружающую среду при низкой интенсивности обменных процессов;

- **снабжающий тип** с массивным захватом веществ и энергии, последующей транспортировкой их в другие ячейки социума. Часто характеризуется интенсивным влиянием на окружающую среду (например, зоны лесозаготовки, добычи полезных ископаемых карьерным способом, интенсивного ведения сельского хозяйства и другие);

- **потребительский** с незначительным захватом веществ и энергии из природы, с транспортированием их в основном из других ячеек социума. Характерно минимальное воздействие на окружающую среду при высокой интенсивности обменных процессов;

○ **перерабатывающий** с массивным захватом веществ и энергии из природы, непрерывным поступлением их значительных объемов из других ячеек, с последующей переработкой и транспортированием в другие ячейки. Характерно интенсивное негативное влияние на окружающую среду, наивысшая интенсивность обменных процессов. Перерабатывающий тип свойствен крупным промышленным городам [2, 8, 11, 15].

1.4. Влияние техногенных систем на окружающую среду

Основными векторами развития производительных сил общества являются: во-первых, *существенный рост численности населения*, обусловленный оптимизацией социально-экономических и экологических условий жизнедеятельности, включая совершенствование систем общественного здравоохранения (так называемый «демографический взрыв»); во-вторых, процессы *урбанизаций*, с репрезентацией в росте и развитии городов, увеличении удельного веса городского населения, преобразовании сельской местности и в возрастании значимости городов в формировании социума; в-третьих, *научно-техническая революция*, сопровождающаяся качественным изменением производительных сил на базе превращения науки в приоритетный фактор общественного развития и производительную силу.

Нежелательными результатами воздействия техногенных систем на окружающую среду являются сокращение видового разнообразия и численности популяций в экологических системах, нарушения естественных круговорота веществ и энергетического обмена. Изменения характера функционирования экологических систем при этом проявляются, во-первых, на уровне перестройки трофических цепей и экологических пирамид; во-вторых, в границах экологических ниш организмов с усилением конкуренции между близкими в экологическом отношении видами и внедрением в экологическую систему интродуцированных, несвойственных ей организмов; в-третьих, в изменении динамики экологических систем с нарушением конечных стабильных (климаксных) ее стадий; в-четвертых, в обеднении генофонда и разрушении

ем сложившихся межвидовых отношений (хищник – жертва, опылитель – опыляемое растение, симбиотические связи и других); и, в-пятых, в сокращении территорий, занимаемых естественными экологическими системами. Влияние людей на функции живого вещества в биосфере проявляется: во-первых, в изменении постоянства (константности) живого вещества в сторону ее уменьшения из-за истощения почвы, замены более продуктивных экологических систем на менее продуктивные, отчуждения земель под различные виды строительства и т.п.; во-вторых, в изменении транспортной и рассеивающей функций живого вещества; в-третьих, в изменении деструктивной и концентрационной функций (извлечение ресурсов из недр, воздействие на поверхность литосферы с разрушением гумуса).

К настоящему времени сформулирован ряд аксиом об экологических рисках в техносфере.

○ **Аксиома 1.** Техногенные опасности наличествуют, если реальные потоки вещества, энергии и информации в пределах техносферы превышают предельно допустимые (пороговые) величины.

○ **Аксиома 2.** Местом генезиса техногенных опасностей являются элементы техносферы (например, они формируются как следствие неисправностей и дефектов в технических системах или при их неправильной эксплуатации).

○ **Аксиома 3.** Техногенные опасности проявляют себя как в пространственном континууме, так и во времени.

○ **Аксиома 4.** Техногенные опасности способны негативно воздействовать одновременно и на человеческую популяцию, и на окружающую среду, и на элементы самой техносферы.

○ **Аксиома 5.** Техногенные опасности способны ухудшать состояние здоровья населения, приводить к увеличению показателей травматизма, финансовых и материальных потерь, к существенной деградации окружающей среды.

○ **Аксиома 6.** Защита от техногенных опасностей может быть обеспечена за счет совершенствования потенциальных источников опасности, увеличения дистанций между указанными источниками и объектами защиты, а также использованием специальных защитных мероприятий.

○ **Аксиома 7.** Достаточный уровень компетентности людей в техногенных опасностях и способах защиты от них является необходимым условием обеспечения безопасности жизнедеятельности.

Взаимодействие человеческой популяции с окружающей средой может быть как благоприятным, так и неблагоприятным. При этом характер указанного взаимодействия определяется потоками вещества, энергии и информации, причем в рамках техносферы неблагоприятные воздействия определяются сочетанием компонентов техносферы и деятельностью людей. Внося изменения в интенсивность любого из указанных потоков в диапазоне от минимально значимого до максимально возможного, возможно сформировать ряд последовательных состояний системы «человек – окружающая среда»:

● **комфортное (оптимальное)**, при котором интенсивность потоков веществ, энергии и информации соответствует оптимальным условиям взаимодействия (комфортные условия существования; обеспечение наибольшей работоспособности и продуктивности; гарантии сохранения и укрепления здоровья, обеспечение целостности окружающей среды);

● **допустимое**, при котором, воздействующие на людей и окружающую среду потоки веществ, энергии и информации не оказывают неблагоприятное воздействие на состояния здоровья людей, но обуславливают явления дискомфорта и уменьшают эффективность их деятельности. При стабилизации условий допустимого взаимодействия необратимые неблагоприятные эффекты в человеческой популяции и в среде обитания не возникают;

● **опасное** с превышением допустимых уровней интенсивности потоков веществ, энергии и информации, что обуславливает негативные явления в показателях здоровья населения, в том числе возникновение экологически зависимых заболеваний при длительной экспозиции, и/или деградацию окружающей среды;

● **чрезвычайно опасное**, когда отмечаются высокие уровни потоков веществ, энергии и информации, что за короткий промежуток времени способно привести к травме, вызвать летальный исход у человека и разрушение окружающей среды [8, 11].

1.5. Загрязнение окружающей среды

Термином «загрязнение окружающей среды» принято обозначать попадание в экологическую систему живых или неживых компонентов, ранее в ней отсутствовавших, а также физические или структурные трансформации, уменьшающие ее продуктивность или вызывающие ее деструкцию через нарушения сложившихся потоков вещества и энергии. Загрязнения окружающей среды могут быть как природными (например, из-за вулканической деятельности), так и антропогенными, обусловленными людьми.

В зависимости от природы антропогенного загрязнения различают такие его **виды**, как: *механическое*, *физическое* (например, тепловое, радиоактивное, акустическое, вибрационное и электромагнитное), *физико-химическое* (аэрозольное), *химическое*, *биологическое* (микробиологическое или изменения сложившихся биоценозов из-за появления новых видов фауны и флоры), *эстетический вред* (например, последствия урбанизации).

Основными **объектами загрязнения окружающей среды** являются как отдельные ее компоненты, такие как атмосфера, гидросфера, литосфера и биота, так и ландшафт в целом.

Возможные **варианты загрязнения биосферы**, обусловленного нарушением естественных процессов в ней из-за вмешательства человека:

- **ингредиентное загрязнение**, обусловленное попаданием в окружающую среду химических веществ и соединений не свойственных естественным биогеоценозам, включая ксенобиотики;
- **параметрическое (физическое) загрязнение**, обусловленное *модификацией только качественных характеристик окружающей среды*;
- **биоценогическое загрязнение**, проявляющееся в изменениях сложившегося *состава и структуры* населяющих биогеоценоз *популяций живых организмов*;
- **стационально-деструктивное загрязнение**, представляющее собой *видоизменение ландшафтов и экологических систем* при оптимизации окружающей среды в интересах человеческой популяции (рис. 3).

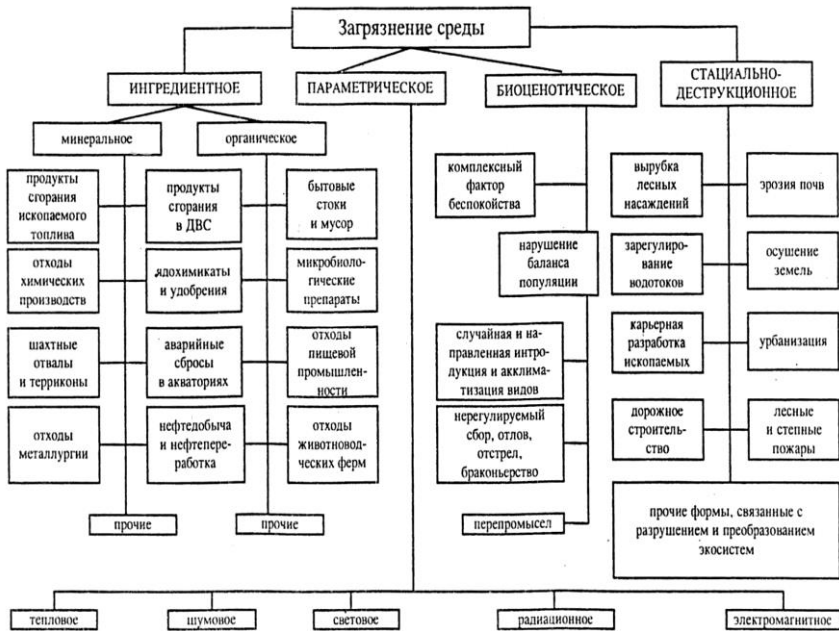


Рис. 3. Варианты антропогенного загрязнения биосферы

Источником антропогенного загрязнения являются все объекты деятельности людей, от которого в окружающую среду поступают разнообразные загрязнения – от отдельных точек выброса до крупных предприятий и индустриальных регионов.

К антропогенным **загрязнителям** окружающей среды относятся все антропогенные агенты (материальные, физические и энергетические), попадающие в окружающую среду или образующиеся в ней в объемах, превышающих уровни естественного фона. К материальным загрязнителям относятся *механические, химические и биологические*. По характеру воздействия на организм человека химические загрязнители подразделяются:

- на **общетоксические**, поражающие весь организм или отдельные его органы и системы (например, оксид углерода и диоксид азота);
- **раздражающие**, оказывающие раздражающее воздействие на слизистые оболочки дыхательной системы, глаз и кожи (например, хлор, аммиак и озон);

- **сенсibiliзирующие**, или аллергены (например, формальдегид);
- **тератогенные**, обуславливающие формирование врожденных пороков развития;
- **мутагенные**, нарушающие генетический аппарат клеток (например, пестициды, тяжелые металлы, некоторые лекарственные препараты);
- **ингибирующие**, тормозящие или прекращающие течение естественных биологических или биохимических процессов в организме;
- **некротические факторы**, вызывающие процесс омертвения тканей;
- **влияющие на репродуктивную функцию** (например, ртуть и свинец);
- **канцерогенные**, способные вызвать неопластический процесс, развитие злокачественных новообразований (например, ароматические углеводороды, шестивалентный хром, асбест);
- некоторые вещества способны проявлять **фиброгенное действие** с образованием в альвеолах легких микроскопических рубцов, что приводит к прогрессивному уменьшению площади газообмена (аэрозоли металлов, пластмасс, органическая и минеральная пыль).

Изолированное действие на организмы людей одного экополлютанта представляет собой довольно редкое явление. *Одновременное или последовательное действие на организм нескольких экополлютантов при одном и том же пути поступления* носит название **комбинированного действия**, разновидностями которого являются: во-первых, **аддитивное действие**, при котором суммарный эффект смеси экополлютантов равен сумме эффектов действующих компонентов (характерно для веществ однонаправленного действия, когда компоненты смеси действуют на одни и те же системы в организме); во-вторых, **потенцированное действие** или **синергизм**, когда компоненты смеси действуют так, что одно вещество усиливает, потенцирует действие другого; в-третьих, **антагонистическое действие**, при котором компоненты смеси действуют так, что одно вещество ослабляет действие другого; в-четвертых, **независимое действие** с комбинированным эффектом не отличающимся от изолированного действия каждого загрязнителя, причем преобладающим является эффект от наиболее токсичного вещества [2, 11, 15].

2. РИСКИ. ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА РИСКА

К ключевым принципам *ноксологии* – естественнонаучной дисциплины, в сферу интересов которой входят те потенциальные опасности, как для отдельного индивида, так и для социума в целом относятся:

- ✓ *принцип возможности* негативных влияний на людей и окружающую среду;
- ✓ *принцип антропоцентризма*, в соответствии с которым высшей ценностью является человек, а сохранение и продление продолжительности активной жизни – приоритетной целью его жизнедеятельности;
- ✓ *принцип природоцентризма*, постулирующий сохранение окружающей среды как обязательное условие сохранения биосферы Земли;
- ✓ *принцип возможности создания качественной техносферы* как реально достижимой цели;
- ✓ *принцип выбора путей реализации безопасного техносферного пространства* за счёт снижения значимости потенциальных опасностей и использования специальных протективных воздействий;
- ✓ *принцип отрицания абсолютной безопасности* для людей и окружающей природной среды;
- ✓ *принцип эволюционного развития* любой системы, ориентированного на уменьшение потенциальных опасностей в техносфере.

Под «риском» традиционно подразумевается потенциальная вероятность возникновения определенного события, неблагоприятного по содержанию и обуславливающего различные варианты негативных последствий.

Сфера «анализа риска» охватывает комплекс процедур, связанных с идентификацией факторов риска и оценкой вероятности того, что данные факторы приведут к определенным нежелательным событиям. Анализ риска включает, наряду с оценкой риска, второй этап – управление рисками в целях минимизации детерминированных ими неблагоприятных явлений. Управление как процесс, включает: во-первых, выработку и обоснование альтернативных управленческих решений, во-вторых, выбор из числа альтернативных управленческих решений оптимальных по критериям эффективности, и, в-третьих, реализацию управленческих решений на практике для достижения необходимых характеристик

функционирования управляемого объекта. Управление рисками рассматривается как важнейшая технология современной цивилизации. При этом сам риск не является объектом управления, он представляет собой лишь меру опасности конкретного объекта. Это обусловлено тем, что риск как таковой не способен к функционированию и продуцированию каких-либо результатов. Иными словами, какое-либо управление риском принципиально невыполнимо, следует управлять не характеристиками и параметрами управляемого объекта, а им самим. Иными словами, особенностью методологии анализа риска является функциональное разграничение этапов аналитических исследований при оценке риска и управлении риском. Оценку риска и управление риском связывает третий элемент – информирование о риске всех заинтересованных лиц.

Оценка рисков в техносфере сводится, во-первых, к количественному определению вероятности возникновения, во-вторых, к качественной характеристике негативных ситуаций, включая возможные аварии и катастрофы, а также, в-третьих, к прогнозированию возможного ущерба окружающей среде, компонентам самих технических систем, здоровью и жизни людей. Предполагается, что процедура оценки риска осуществляется на этапах проектирования технических систем, их создания, пуска в эксплуатацию, всего периода эксплуатации и вывода из нее. Базисом методологии оценки риска чаще всего служит моделирование технических систем, взаимодействия их компонентов и персонала с окружающей средой, применяемых технологических процессов – как на физическом уровне, так и математическое, как в штатных, так и в нештатных ситуациях. Основные сложности при оценке риска в техносфере:

- проблема определения допустимого уровня риска и стандартов безопасности для обслуживающего персонала и населения, проживающего в зоне воздействия изучаемого объекта техносферы;
- социальный характер проблемы оценки риска, обусловленный необходимостью определения и учета индивидуальных и общественных приоритетов;
- высокий уровень неопределенности при оценке риска, что определяется, во-первых, её вероятностным характером и, во-вторых, зачастую дефицитом ретроспективных статистических данных.

К необходимым элементам риска традиционно относят **опасность, неопределенность и случайность**. Подразумевается, что риск появляется там, где присутствует опасность, обладающая свойством неопределенности (если неопределенность не объединена с опасностью, либо опасность предсказуема, то риск отсутствует). Риск рассматривается также как мера наступления нежелательных последствий, как вероятность ущерба и т.д. Иными словами, понятие «риск» сопряжено с опасностью, ущербом и потерями в тех случаях, когда их величина и время наступления точно неизвестны. Риск – это *событие предполагаемое*, так как:

- нежелательное событие (явление) заранее не определено, оно может произойти (возникнуть), а может и не произойти (не возникнуть);
- отражает характеристику вероятности события (явления);
- предположение субъективно, является суждением о пока ещё не реализовавшемся событии (явлении), проецируемым в будущее;
- нежелательное событие (явление) может обусловить ущерб (убыток);
- ущерб (убыток) рассматриваются в контексте негативных последствий (ухудшение состояния окружающей среды, материальные потери, ухудшение здоровья населения и других);
- вероятность и объем (цена) риска разностепенны для различных субъектов [4, 7].

2.1. Классификации рисков

1. В соответствии с **классификацией рисков по Рао Коллору** (1996) существует пять их разновидностей, имеющих непосредственное отношение к экологическому риску как сочетанию рисков, угрожающих состоянию окружающей среды и общественному благосостоянию:

- *риски, угрожающие безопасности*, обычно проявляются быстро, характеризуются малыми вероятностями, но тяжелыми последствиями (например, несчастные случаи);
- *риски, угрожающие здоровью*, характеризуются относительно высокой вероятностью, но часто не имеют тяжелых последствий, часто проявляются после определенного латентного периода;

- *риски, угрожающие состоянию среды обитания*, обуславливающие нежелательные эффекты в экологических системах, отличаются существенными неопределенностями, как в самих эффектах, так и в их детерминантах;

- *риски, угрожающие общественному благосостоянию*, обусловленные тем, как социум воспринимает и оценивает деятельность определенного объекта (промышленного, сельскохозяйственного, военного или другого); в какой степени деятельность данного объекта соответствует представлениям населения о рациональном использовании ресурсов природы; как указанная деятельность влияет на состояние окружающей среды. Негативное восприятие деятельности объектов социумом проявляется достаточно быстро и обычно оказывается устойчивым;

- *финансовые риски*, связанные с возможными материальными и финансовыми потерями.

2. По степени влияния на жизнедеятельность человека различают:

- *пренебрежимый риск* (не требуются какие-либо меры защиты; устанавливается управляющим органом, как максимальный, выше которого необходимо принимать оптимизационные мероприятия по управлению им);

- *приемлемый риск* (находится в интервале между предельно допустимым и пренебрежимым уровнями риска; показаны специальные меры контроля и защиты в соответствии с принципами обоснования и оптимизации);

- *чрезмерный риск* (деятельность не допускается; предельно допустимый уровень риска не должен превышать вне зависимости от экономических и социальных предпочтений).

3. По объекту риски дифференцируются на следующие типы:

- *индивидуальный риск* (для жизни и здоровья людей; частота поражения отдельного человека из-за воздействия на него факторов риска);

- *коллективный риск* (прогнозируемая численность людей, пострадавших за определённый временной промежуток в случае возникновения аварийной ситуации или катастрофы);

- *социальный риск* (риск для общества; проявляется как связь частот возникновения нежелательных событий и явлений, когда при общей численности населения M пострадали не менее N людей);

- *технический риск* (характеризуется вероятностью аварийного отказа технических устройств с негативными последствиями);
- *предпринимательский* и *экономический риск* (для функционирования и развития различных как социально-экономических систем);
- *стратегический риск* (для государства);
- *ожидаемый риск* (денежное или в иной форме представление ущерба из-за потенциально вероятной аварии или катастрофы, охватывающей определенный период времени);
- *экологический риск* (для окружающей среды как условия развития человечества), обычно связан с продолжительными по времени изменениями среды обитания, приводящими к негативным последствиям для населения.

4. По **субъекту (причине или источнику)** различают:

- *природные риски* (природа, космос);
- *техногенные риски* (техносфера);
- *социальные риски* (общество);
- *предпринимательские* и *экономические риски* (экономика, бизнес).

5. По **причине возникновения** риски бывают связанными:

- *с опасными явлениями;*
- *сценариями негативных тенденций развития ситуации;*
- *нестабильностью условий деятельности,* приводящей к ошибочным решениям в рискованных ситуациях.

6. По **источникам (сфере) возникновения и поражающим факторам:**

- *техногенные риски* (свойственна относительно низкая вероятность актуализации при серьезных ее последствиях, высоким уровнем и острым характером воздействия; цель управления техногенными рисками – обеспечение безопасности населения);
- *риски для здоровья* (свойственна высокая вероятность воздействия относительно невысокого уровня, хронический его характер со значительным латентным периодом и отдаленными эффектами; цель управления рисками – обеспечение здоровья населения);
- *экологические риски* (риски для окружающей среды с трудно предсказуемыми последствиями, многочисленными взаимосвязями в экологических системах, включая трофические цепи, на микро- и макро-

уровнях; цель управления экологическими рисками – безопасность функционирования живых организмов и экологических систем);

- *природные риски* (риски от стихийных бедствий с низкой вероятностью актуализации, комплексным характером воздействия и серьезными последствиями; цель управления природными рисками – безопасность населения и предотвращение материальных потерь);

- *риски для общественного благополучия* с фокусировкой на общественное восприятие, культурные и материальные ценности;

- *финансовые риски* (цель управления рисками – стабильность).

Возможны классификации рисков и по другим основаниям: *по цели* (мотивированный и немотивированный); *по результату* (оправданный и неоправданный), *по соответствию реальности* (действительный и мнимый); *по времени возникновения* (ретроспективные, текущие и перспективные); *по характеру учета* (внешние, которые не имеют непосредственной связи с функционированием объекта и внутренние, связанные с деятельностью данного объекта); *по характеру последствий* (чистые, которые практически всегда обуславливают потери и спекулятивные, способные нести в себе как ущербы, так и определенные преференции) [1, 2, 8, 11, 15].

2.2. Принципиальная схема анализа риска

Универсальная схема **анализа риска** включает два уровня – **оценку риска** (пять последовательных этапов аналитических исследований, позволяющих дать обобщенную характеристику вероятности возникновения нежелательных последствий) и **управление риском** (три этапа мероприятий по устранению или минимизации риска).

Этап идентификации рисков представляет собой формирование максимально полного перечня потенциальных факторов риска, нежелательных явлений и событий (например, природных и техногенных катастроф, стихийных бедствий и других), которые способны привести к деградации компонентов окружающей природной среды, сопровождающейся ухудшением параметров ее качества и безопасности, прямым или косвенным экономическим ущербом для изучаемого объекта природо-

2.2. Принципиальная схема анализа риска

пользования. Успешное решение задач рассматриваемого этапа обязательно предусматривает комплексный учет как объективной, так и субъективной информации (рис. 4).

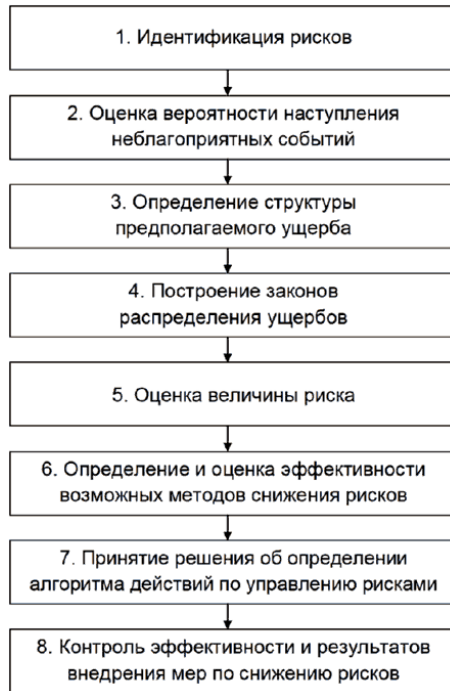


Рис. 4. Этапы универсального алгоритма анализа риска

Этап оценки вероятности наступления неблагоприятных событий базируется на алгоритме определения вероятности возникновения нежелательных явлений и событий, которые были идентифицированы на предыдущем этапе анализа риска. Подобный прогноз может иметь краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный характер. Для решения задач второго этапа анализа риска применяются три метода:

- *статистический* – ретроспективный анализ статистической информации о подобных событиях и явлениях, произошедших либо на объектах природопользования аналогичного типа, либо в том же пространственном континууме;

- *аналитический* – предусматривает выявление и анализ причинно-следственных связей с целью оценки вероятности актуализации риска;
- *экспертный* – заключается в оценке вероятности наступления неблагоприятных событий или явлений посредством обобщения и анализа мнений привлекаемых экспертов.

Оптимальным для получения максимально точной оценки вероятности наступления неблагоприятных событий является параллельное использование статистического, аналитического и экспертного методов и сопоставлением их результатов.

Определение структуры предполагаемого ущерба. Процедура анализа эколого-экономического риска подразумевает, что потенциальный ущерб может являться не только прямым последствием аварии, катастрофы или иной ситуации, но также репрезентироваться в форме разнообразных деструктивных процессов в окружающей природной среде. По указанной причине методологически правильно определять структуру потенциального ущерба с последующим представлением его как в натуральной, так и в стоимостной форме.

Построение законов распределения ущербов. Так как построить достаточно точный прогноз динамики событий в случае возникновения аварийной ситуации или катастрофы зачастую не представляется возможным, то и произвести достоверную перспективную оценку предполагаемого ущерба крайне сложно. В связи с этим обстоятельством рекомендуется построение закона распределения ущерба на однотипных объектах при вероятных нежелательных явлениях и событиях. В рамках процедуры анализа рисков обычно прибегают к использованию типовых законов распределения ущерба.

Оценка величины риска. Конечной целью пятого этапа анализа риска является определение количественных параметров (меры) риска, которые в последующем будут положены в основу при разработке оптимизационных управленческих решений. В практической деятельности по управлению риском, наряду с исчислением показателя величины ущерба, определяют и учитывают предельно приемлемую величину потенциального ущерба и максимально допустимую вероятность его причинения. Подобный подход является оправданным для объектов природопользования из-за сугубо ориентировочного характера прогнозов де-

градации окружающей природной среды и возможного сопутствующего ущерба, что может привести к ситуации, когда стоимость мероприятий по минимизации риска окажется существенно больше величины ущерба.

Определение и оценка эффективности возможных методов снижения рисков. Данный этап анализа риска является первым этапом управления риском и представляет собой формирование полного перечня подразделяемых на пять групп методов: предотвращающих воздействия потенциальных факторов риска; снижающих возможность неблагоприятных событий и явлений; уменьшающих вероятный материальный ущерб; передающих риск другим объектам (страхование ущерба или ответственности); компенсирующих полученный либо нанесенный ущерб.

Принятие решения об определении перечня действий по управлению рисками. Данный этап играет ключевую роль в процессе управления риском. Представляет собой определение, обоснование и внедрение в программу управления рисками комплекса оптимизационных мероприятий, которые должны привести к снижению суммарных издержек при ухудшении качества окружающей природной среды и достижению при этом максимально возможной выгоды.

Контроль эффективности и результатов внедрения мер по снижению рисков. Представляет собой конечный этап анализа риска, реализуемый в виде: динамического наблюдения за состоянием окружающей природной среды, факторами и источниками риска (экологический мониторинг); экологических экспертиз функционирующих объектов природопользования; экспертиз проектов строительства новых объектов природопользования или реконструкции существующих; лицензирования регламентируемых видов деятельности; контрольных проверок, осуществляемых соответствующими надзорными органами [3, 5, 11].

2.3. Экологические риски

Одной из разновидностей риска является **экологический риск** (*environmental risk*), величина и вероятность которого определяются в отношении событий (явлений), обладающих экологической значимостью (например, проявления стихийных бедствий, аварий на промышленных объектах, экологически обусловленные и экологически зависи-

мые заболевания человека). Сопряженная с риском обстановка включает в себя, во-первых, *нежелательное событие (явление)* с заранее точно неизвестными временем и местом наступления (возникновения) и, во-вторых, *субъект*, для которого событие (явление) является нежелательным (неблагоприятным). Иными словами, экологический риск обусловлен вероятным нарушением *естественного функционирования ландшафтов и экологических систем* (опустынивание, наводнения, сели, вторичное засоление почв, землетрясения и другие), *устойчивого развития и функционирования техносферы* (пожары, взрывы, аварии на энергосистемах, АЭС, предприятиях химической промышленности, транспортные аварии и другие), сопровождаемым негативными последствиями для людей. Иными словами, **экологический риск** – это *вероятность возникновения отрицательных изменений в окружающей природной среде или отдалённых неблагоприятных последствий этих изменений, возникающих вследствие воздействия на окружающую среду* (вероятность экологических бедствий, катастроф, нарушений нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного и техногенного вмешательства в окружающую среду или стихийного бедствия).

Понятие «*экологический риск*» раскрывается через понятия:

- **экологическая опасность** – обстоятельства, при которых возможны нежелательные события (явления), обуславливающие нарушения в здоровье населения и/или в состоянии окружающей природной среды;

- **неопределенность** – понятие «риск» приобретает смысл только при дифференциации действительности и возможности нежелательных событий (явлений); если они предсказуемы, то речь идет не о риске, а о *неизбежности*. Неопределенность связана с: отсутствием или дефицитом необходимой информации о событии (явлении), недостаточной точностью исходных данных, отсутствием или ошибочностью представлений об изучаемом событии (явлении), а также имеющем фундаментальный характер фактором случайности, органически присущей изучаемому событию (явлению). Так, источники возникновения неопределенности многообразны (например, спонтанность стихийных бедствий; человеческая деятельность неопределенного и неоднозначного характера). Одной из причин неопределенности является *случайность* – отражение внеш-

них, несущественных, неустойчивых, единичных связей действительности; результат перекрещивания независимых причинных процессов, событий. К числу количественных параметров риска относится *вероятность* наступления событий (возникновения явлений). Вероятность выступает как количественная мера неопределенности (неопределенность может быть описана и иными, не вероятностными моделями).

Экологическая опасность и экологический риск относятся исключительно к сфере взаимодействий и процессов, протекающих в *системе «общество – природа»*. Основой для возникновения таких отношений являются *экологические факторы (условия)* природного или социального генеза, подразделяемые на *события и действия*:

- **события** порождают экологические отношения, происходят как *с участием человека* (преднамеренные и случайные воздействия на окружающую среду), так и *помимо его воли* (например, природные стихийные бедствия с воздействием природы на человека);

- **действия** (различные виды *антропогенной деятельности*) являются приоритетными причинами возникновения экологического риска. Итогом природопользования может являться вред для окружающей среды, а через нее непосредственно (прямо) или опосредованно (косвенно) – людям, действия которых могут быть как *экологически позитивными*, так и *экологически негативными*. Экологически позитивная антропогенная деятельность (например, охрана и рациональное использование природных ресурсов, уменьшение нагрузки на окружающую среду) снижает экологический риск, а экологически негативные действия с нарушениями правил природопользования увеличивают.

Степень экологического риска является результатом взаимодействия, во-первых, *свойств объектов природы*, включая существующие условия и имеющиеся ресурсы; во-вторых, *вида природопользования* и, в-третьих, *достигнутого уровня научно-технического прогресса*.

Главенствующий *принцип антропоцентризма* постулирует приоритетное место человека в системе «общество – природа». Процесс природопользования сопровождается возникновением противоречий внутри данной системы, которые заключаются в том, что с одной стороны, социум проявляет *экономические интересы* в целях удовлетворения своих материальных потребностей за счет ресурсов окружающей среды, а, с

другой стороны, тот же социум имеет *экологические интересы*, заключающиеся в комфортной и безопасной среде обитания.

Представления об экологическом риске позволяют оптимизировать взаимосвязи людей с окружающей средой, как при эксплуатации природных ресурсов, так и в процессе проведения природоохранных мероприятий. Природопользование, не выходящее за нормативы допустимого экологического риска, позволяет обеспечить экономическое и экологическое качество жизни. В свою очередь, величина экологического риска зависит от *уровня научно-технического прогресса*, который может рассматриваться как *ресурс* и как *условие*. Грань между ними условна и проводится в зависимости от того, используется информация и технологии непосредственно в оценке экологического риска, или являются совокупностью факторов.

Основная причина возникновения экологического риска – это деятельность человека. По мнению экспертов в последнем десятилетии XX в. наиболее приоритетными экологическими рисками стали: планетарного масштаба изменения климата; разрушение озонового слоя стратосферы; деградация компонентов окружающей среды; вымирание популяций и снижение биологического разнообразия. При этом основной риск для здоровья населения обуславливают: химическое загрязнение атмосферы; радоновая опасность и другие виды загрязнения воздуха в помещениях; неудовлетворительные параметры качества и безопасности питьевой воды; наличие химических поллютантов на рабочих местах; высокая пестицидная нагрузка на почву и водоемы; обеднение озонового слоя стратосферы [8, 15].

2.4. Особенности восприятия экологического риска населением

Люди по-разному воспринимают и оценивают экологические риски. Так, восприятие риска не только от его уровня, но и от значительно числа других факторов:

- *фактор катастрофичности* – события, сопровождающиеся человеческими жертвами сгруппированные в пространственно-временном континууме (например, взрыв на промышленном объекте), характеризую-

ются усиленным восприятием риска по сравнению с событиями, жертвы при которых разнесены в пространстве и во времени;

- *фактор знакомства* – риски, вызванные малознакомыми или незнакомыми явлениями или процессами, трудно воспринимаются и необъективно оцениваются людьми (например, у значительной части населения отсутствует беспокойство из-за возможного загрязнения атмосферы фреоном);

- *фактор понимания* – чем меньше понимание сложившейся ситуации, тем выше уровень обеспокоенности и ниже доверие к доступной информации, что обуславливает склонность к существенному преувеличению риска;

- *фактор неопределенности* – отсутствие субъективной определенности в оценке последствий возможных событий или процессов приводит к обострению восприятия риска;

- *фактор контролируемости* – отсутствие личного контроля за складывающейся ситуацией усиливает беспокойство по поводу возможных последствий ее развития и интенсификацию восприятия экологического риска;

- *фактор добровольности* – люди меньше думают о риске, если идут на него добровольно;

- *фактор воздействия на детей* – люди обычно склонны драматизировать риски, последствия которых в первую очередь влияют на детей;

- *фактор воздействий на будущие поколения* – для людей свойственно беспокоится не только о детях, но и о будущих поколениях (например, страх ионизирующих излучений из-за возможного появления генетических дефектов);

- *фактор идентифицируемости жертв* – риск гибели конкретных людей воспринимается намного острее, чем статистические сведения об общей смертности населения в течение года;

- *фактор устрашения* – риск воспринимается особым специфическим образом, если одновременно с восприятием его возникает чувство тревоги, страха или ужаса;

- *фактор обратимости* – необратимые события (например, кислотный дождь) обычно характеризуются усилением восприятия риска, а события обратимые – ослабленным;

- *фактор доверия* – при достаточно высоком уровне субъективного доверия к лицу или организации информирующем о риске его восприятие ослабевает и наоборот;
- *фактор внимания средств массовой информации* – если информация в СМИ отсутствует, то восприятие риска затормаживается, в противном случае – усиливается;
- *фактор справедливости* – при относительно равномерном распределении риска субъективное влияние данного фактора существенно меньше, чем при явно неравномерном распределении риска;
- *фактор происхождения* – восприятие риска антропогенного происхождения обычно интенсивнее, чем обусловленного природными опасностями.

Результаты многочисленных социологических опросов свидетельствуют о том, что большинство людей не дифференцируют экологические риски и риски для здоровья, причем их мнение зачастую не совпадает с мнением экспертов при оценке значимости различных видов экологического риска. Так, наибольшую обеспокоенность у населения вызывают захоронения опасных отходов и маловероятные аварии на атомных станциях, а не реальные глобальные изменения климата, радоновая опасность, опасность табакокурения, сокращение биологического разнообразия в экологических системах и другие.

Кроме этих факторов существенное значение имеет *механизм восприятия опасности* – для психики людей свойственно более высокая чувствительность при восприятии негативной информации по сравнению с позитивной. Человек также склонен больше доверять источникам «плохих» новостей по сравнению с источниками положительной информации. Средства массовой информации также склонны исказить степень опасности события преимущественно в негативную сторону, зачастую неадекватно освещают произошедшие события.

Техногенные опасности во многом обусловлены недостаточным вниманием к проблемам обеспечения безопасности в техносфере, повышенной тягой к риску и игнорированием реальных опасностей, что зачастую обусловлено элементарным недостатком знаний о мире опасностей и негативных последствиях их актуализации. В настоящее время при-

знается возможность полного устранения влияния опасных и вредных техногенных факторов на человека, а также ограничения допустимым уровнем риска воздействия техногенных травмоопасных факторов при выполнении ряда условий, включая совершенствование потенциальных источников опасностей и использование защитных средств. Воздействие природных опасностей при этом может быть существенно ограничено за счет применения адекватных мер профилактики и защиты [1, 11].

2.5. Методологические подходы к оценке экологического риска

Целью оценки экологического риска является характеристика экологической ситуации. Существует мнение, что процедура оценки риска более эффективна и информативна по сравнению с традиционным сопоставлением реальных параметров экологической ситуации с регламентированными нормами (предельно допустимые концентрации, нормы содержания биоценозов и другими). Несомненно, подобный подход ошибочен, данные варианты характеристики экологической ситуации являются взаимодополняющими. Так, традиционный подход (сопоставление регистрируемых параметров экологической ситуации с регламентами) позволяет судить, насколько состояния объектов окружающей среды отклоняются от норм, что является критерием величины наносимого ущерба. Расчеты величины риска позволяют детализировать оценку ситуации до вероятности ущерба для конкретных субъектов. Исторически первой концепцией является *теория высшей надежности*, постулирующая возможность обеспечения полной безопасности при условиях: необходимых материальных затрат на средства защиты, подготовки персонала, строгого контроля за соблюдением всех норм и правил. *Концепцию абсолютной безопасности (нулевого риска)* сменили представления о *принципиальной невозможности обеспечения абсолютной безопасности* в условиях реальной действительности, о необходимости достижения такого уровня риска, который можно рассматривать как *приемлемый* исходя из экономических и социальных соображений. Иными словами, риск является *приемлемым*, если его величина (вероятность реализации

или возможный ущерб) настолько малы, что ради получаемой при этом выгоды в виде материальных и социальных благ, человек или общество в целом готово пойти на риск.

Экологический риск является *количественной мерой*, учитывающей как **вероятность актуализации (проявления)** соответствующей ему **экологической опасности**, так и **последствия** этого события. Соответственно, во-первых, *чем больше ожидаемый ущерб (Z), тем значительнее риск (R)*, и, во-вторых, *риск (R) будет тем выше, чем больше вероятность актуализации опасности (P)*. Иными словами, оценка экологического риска должна быть обязательно связана с оценкой ущерба. Отсюда риск можно выразить произведением вероятности опасности какого-либо события или процесса на магнитуду ожидаемого ущерба: $R = P \times Z$.

Термином «**экологический ущерб**» принято обозначать фактическое и возможное ухудшение состояния (качества) окружающей среды или ее отдельных компонентов, а также связанные с ним социальные и экономические потери социума, включая: во-первых, *социальный ущерб* от невозвратимых потерь в народонаселении, уменьшения средней продолжительности жизни, ухудшения состояния здоровья и других параметров благополучия популяции; во-вторых, *социально-экономический ущерб*, связанный с затратами на оказание медицинской помощи и социально-трудовую реабилитацию, экономическими потерями из-за преждевременной смертности и утраты трудоспособности; и, в-третьих, *экономический ущерб* (например, от повреждений производственных объектов). Экологический ущерб может оцениваться как качественно, так и количественно, как в натуральных, так и в денежных показателях.

Для расчета параметров риска применимы два типа данных: во-первых, *опытные данные*, позволяющие получить объективную вероятность опасности и ущерба; во-вторых, *экспертные оценки*, характеризующие субъективную вероятность. Количественно риск оценивается либо *вероятностной характеристикой* – безразмерной величиной от 0 до 1 (иногда в процентах), либо *частотой реализации риска* – числом случаев возможной актуализации опасности на протяжении определённого временного периода, например, за календарный год (тогда единицы измерения будут, например, 1/год или чел/год).

Существует несколько уровней оценки риска:

✓ *оценка вероятности неблагоприятного события (явления) без последующего анализа и оценки ущерба* (первичная оценка, подразумевающая потенциальный ущерб от опасного события в будущем без его конкретной оценки);

✓ *оценка вероятности ущерба с определением, как вероятности опасного события, так и вероятность ущерба* (учитывается вероятность события и его степень опасности). Важно, чтобы мера ожидаемого ущерба включала в себя все возможные последствия данного события или процесса. Полная мера последствий должна включать в себя различные виды ущерба – социального, экологического, экономического, морального и другие;

✓ *оценка вероятности ущерба по конечному результату, когда отдельно не рассчитываются ни вероятность события (событий), ни последствия каждого события*. Подобный характер имеет **индивидуальный риск**, обусловленный вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасного события:

$$R = P(t) / N(f) ,$$

где $P(t)$ – число пострадавших (погибших) в единицу времени t (чаще за год), $N(f)$ – общее число лиц, подверженных фактору риска f в единицу времени t . Например, число работающих на предприятии составляет 25 тысяч человек. Ежегодно в результате несчастных случаев погибает в среднем 31 чел. Значение индивидуального риска рассчитывается по среднему числу смертей, приходящихся на одного человека в год – она равна 0.0013 или округленно 10–3.

✓ в ряде случаев пространственную и временную зависимости вероятности проявления опасности рассматривают раздельно. Опасности различных событий или процессов сопоставляют путем усреднения вероятностей их проявления по пространственным и временным параметрам. Тогда в соответствии с *теоремой умножения вероятностей*, вероятность опасности P представляется в виде произведения:

$$P = P_s \times P_t ,$$

где P_s и P_t – вероятности опасности, зависящей соответственно от пространственных и временных характеристик.

✓ если необходимо рассчитать меру ожидаемого ущерба при учете всех возможных последствий определенного события или процесса и имеется несколько различных ущербов, то риски по различным величинам ущерба суммируются;

✓ еще одной распространенной мерой риска является стоимостная мера риска (Value at Risk). Для этой меры в теории вероятности и математической статистике используется термин квантиль, означающий, что с вероятностью a значение случайной величины (в нашем случае риска) будет меньше определенной величины.

Общепринятым методом оценки нежелательного воздействия явлений и процессов является вычисление средних многолетних значений величины ущерба или количества жертв, а также средних квадратических отклонений от этих величин.

Оценка рисков подразделяется на два дополняющих друг друга типа – качественный и количественный:

✓ задачей *качественного варианта оценки риска* является выявление (идентификация) факторов, областей и видов риска экспертным путём специалистами со значительным опытом деятельности в данной области;

✓ *количественная оценка риска* подразумевает установление потенциальной величины потерь по каждому из вариантов риска.

К основным относятся следующие методы оценки риска:

- **метод аналогий** базируется на применении профильной ретроспективной информации;

- **статистический метод**, основанный на учете и анализе имеющейся статистической информации;

- **экспертный метод** заключается в сборе и обобщении мнения авторитетных специалистов, обладающих высокой квалификацией в соответствующей сфере деятельности;

- **моделирование ситуации** является высоко информативным инструментом апробации проблемной ситуации в условиях внешних воздействий.

Методы оценки риска и соответствующие им методы моделирования можно классифицировать, во-первых, в зависимости от применения вероятностных распределений на методы, учитывающие и не учитывающие характер распределения вероятностей; во-вторых, в зависимости от применяемой процедуры аналитических исследований на вероятностные и выборочные методы; в-третьих, в зависимости от способов нахождения модельной информации на аналитические и имитационные методы.

К основным *направлениям аналитических исследований* в рамках процедуры оценки риска относятся:

- количественное определение (измерение) риска с формированием специализированных баз данных по выходу из строя компонентов техносферы и аварийным ситуациям;
- расчеты параметров надежности технологических систем;
- математическое моделирование аварийных ситуаций в техносфере;
- изучение особенностей восприятия риска людьми и другие [2, 4, 7].

2.6. Оценка экологических рисков в техносфере

Экологические риски в техносфере обусловлены бесконтрольным освобождением энергии или попаданием в окружающую среду химических поллютантов – ксенобиотиков и прочих экотоксикантов. Под процедурой *измерения риска в техносфере* подразумевается определение потенциальной опасности от определенной технологии как для индивидуума, так и для группы людей – соответственно индивидуального и коллективного риска. Выделяют *четыре основных направления в измерении риска*:

- **инженерное направление** при оценке риска, связанного с промышленными технологическими процессами (оценка вероятности возникновения аварийных ситуаций при данной технологии на основе имеющейся статистической информации по отдельным элементам технологии);
- **модельное направление с построением моделей процессов**, которые способны вызвать определенные неблагоприятные последствия

(например, выявление причинно-следственных связей между воздействием вредных веществ на организм человека и увеличением частоты определенных заболеваний или построение модели распространения поллютантов в водной среде при сбросе в поверхностный водоем промышленных стоков). К требованиям, предъявляемым к моделям относятся: 1) адекватность и объективное соответствие моделируемому процессу; 2) способность замещать моделируемый процесс; 3) наличие четких правил перехода от модельной информации к информации о моделируемом процессе;

- **изучение субъективного восприятия степени риска населением**, на которое влияет ряд качественных факторов, в том числе: личностная значимость возможных последствий, особенности распределения воздействия факторов риска во времени, возможности контроля за складывающейся ситуацией и свободы выбора, новизна применяемых технологий, а также особенности личности субъекта, производящего оценку степени риска;

- **установление границ приемлемости риска с применением различных методологических подходов** – *экспертного*, ориентирующегося на оценки как реально существующего, так и желательного риска; *применение аналогии со стандартами* при установленных уровнях риска (при возникновении аварийных ситуаций возможно повышение стандартов, при продолжительной безопасной работе – их снижение); *многокритериального анализа* с учетом всех приоритетных критериев (технических, экологических, социальных, экономических и других).

На первом этапе оценки риска в техносфере производится: выявление источников опасности; определение тех компонентов техносферы, элементов и событий, которые являются потенциальными причинами возникновения опасных ситуаций (предварительный анализ опасностей); введение ограничений на анализ. Критерии качественной оценки возможных последствий опасных состояний, связанных с критическими ошибками обслуживающего персонала, недостатками в конструкции объекта техносферы, его нештатным функционированием или наличием отклонений от проекта, позволяют дифференцировать их с выделением четырех классов:

- **I (безопасный)** – отсутствуют сколько-нибудь значительные нарушения в функционировании, не происходят повреждения технологического оборудования и несчастные случаи с обслуживающим персоналом объекта техносферы;
- **II (граничный)** – имеют место нарушения в функционировании объекта техносферы, которые могут компенсироваться и контролироваться при условии отсутствия повреждений технологического оборудования и несчастных случаев с обслуживающим персоналом;
- **III (критический)** – отмечаются значительные нарушения в функционировании объекта техносферы с повреждениями технологического оборудования; создается опасная ситуация, которая требует реализации срочных мероприятий по спасению персонала и ценного технологического оборудования;
- **IV** – происходит полное нарушение функционирования объекта техносферы, необратимая потеря технологического оборудования, гибель или массовое травмирование персонала.

На **втором этапе оценки риска в техносфере** применяется комплекс методов, к которым относятся: во-первых, построение и анализ «дерева событий» (ДС); во-вторых, построение и анализ «дерева отказов» (ДО); в-третьих, анализ видов отказов и их последствий; в-четвертых, анализ критичности.

Оценка риска начинается с установления порядка вероятных событий, происходящих с момента деструкции технологического оборудования объекта техносферы или другой ситуации, который принято именовать *иницирующим событием*. В целях выявления причинно-следственных связей применяются два типа аналитических исследований – с прямым и обратным порядком:

- при осуществлении аналитических исследований *с прямым порядком* вначале устанавливаются возможные отказы, а затем на основе логических построений определяются возможные последствия возникшей ситуации;
- при проведении аналитических исследований *с обратным порядком* на первом этапе определяются параметры опасного состояния

технической системы, а затем в хронологически обратном направлении прослеживаются вероятные причины и механизмы возникновения аварии или другой нештатной ситуации.

Построение и анализ «дерева событий» (ДС) производится в хронологическом порядке, началом его является инициирующее (исходное, ключевое, первое) событие. ДС представляет собой алгоритм изучения и анализа событий, возникающих последовательно, начиная от исходного (инициирующего) события – например, аварийной ситуации или катастрофы.

Метод построения ДС предназначен для выявления и анализа возможных вариантов развития аварийной ситуации с определением последовательности событий. При этом учитывается участие взаимодействующих между собой различных технических систем обеспечения безопасности. Построение различных вариантов сценариев протекания аварийной ситуации производится с использованием прямой логики, а вероятность каждого из них исчисляется как произведение вероятности ключевого события на вероятность конечного.

Метод анализа с построением ДС основывается на предположении о неисправности какого-либо элемента или части технической системы. С момента возникновения ключевого события (первой неисправности) анализ ДС предоставляет возможность осуществлять систематическое наблюдение и оценку происходящих в технической системе изменений (нарушений штатного функционирования и поломок) с использованием комплекса технических средств обнаружения, предупреждения, сигнализации и защиты.

В алгоритм анализа ДС входят: установление ключевого (исходного) события; определение функций обеспечения безопасности; построение «дерева событий»; характеристика и анализ возможных последствий последовательно развивающихся событий. Иными словами, метод построения ДС представляет собой процедуру исследования ряда последовательных событий, начиная с ключевого, способных в определенных условиях привести к аварийной ситуации и может применяться при ее апостериорном анализе (рис. 5).



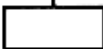
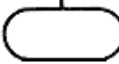


Символ события	Содержание события
 Круг	Исходное событие, обеспеченное достаточными данными
 Сегмент	Событие, информация о котором недостаточна
 Прямоугольник	Событие, вводимое логическим элементом
 Овал	Условное событие, используемое с логическим знаком "Запрет"
 Домик	Событие, которое может случиться или не случиться
 Треугольники	Символ перехода

Рис. 5. Символы, применяемые при построении «дерева событий»

Построение и анализ «дерева отказов» (ДО). Метод построения и анализа «дерева отказов» (аварий и иных происшествий, их последствий, других нежелательных событий) служит базисом логического вероятностного моделирования причинно-следственных связей между различными воздействиями, внешними и внутренними, на техническую систему и ее отказами. Про проведении анализа причин отказа технической системы ДО включает в себя последовательность и сочетания различных нарушений функционирования и поломок. Иными словами, ДО является многоуровневой графологической структурной схемой, которая отражает причинно-следственные связи, выявленные при прослежива-

нии ситуации в обратном порядке с целью нахождения вероятных причин ее возникновения (рис. 6).

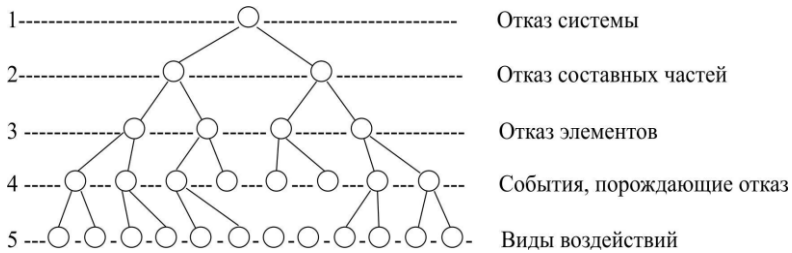


Рис. 6. Условная схема построения «дерева отказов»

Метод построения и анализа ДО базируется на дедукции, позволяет получить наглядную и достаточно детализированную схему взаимосвязей между элементами технической системы и воздействующими на их надежность событиями. Данный метод особенно информативен при решении задач выявления ключевых причин нежелательных событий, возникающих в статичных технических системах, так как он: ориентирован на поиск отказов; четко демонстрирует ненадежные части технических систем; за счет графического представления результатов обладает высокой степенью наглядности для персонала, обслуживающего технические системы; позволяет производить качественный и количественный анализ надежности технических систем; предоставляет специалистам возможность поочередно акцентировать внимание на конкретных отказах технических систем; углубляет представления о функционировании технических систем; за счет четкой наглядной формы служит средством общения между специалистами; оказывает помощь в обнаружении отказов на основе дедукции; упрощает оценку надежности систем высокой сложности и т.д. Основное преимущество метода построения и анализа ДО состоит в том, что он сводится к селективному (избирательному) выявлению только тех компонентов технических систем и событий, которые могут обусловить конкретный отказ или возникновение определенной нежелательной ситуации (рис. 7).

Первыми стадиями построения дерева отказов являются процедуры синтеза и анализа.







Символ логического знака	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
	Знак "И"	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
	Знак "или"	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий
	Знак "Запрет"	При наличии входного события выходное появляется лишь тогда, когда происходит условное событие (см: символы событий)
	Знак "Приоритетное И"	Выходное событие появляется, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо
	Знак "Исключающее ИЛИ"	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий
	Знак "m из n" (голосования или выборки)	Выходное событие происходит, если случается m из n входных событий

Рис. 7. Символы, применяемые при построении «дерева отказов»

Стадия **синтеза** включает три этапа:

- определяется наиболее общий уровень, на котором надлежит рассмотреть неблагоприятные для штатного функционирования технической системы события;
- неблагоприятные события подразделяются на ряд несовместных групп, формируемых на основе определенных общих признаков;
- с применением общих признаков устанавливается то *головное* событие, которое возникает в результате комплекса всех событий, относящихся к каждой группе. Головное событие подлежит дальнейшему рассмотрению с построением специального ДО.

Стадия **анализа**, осуществляемая *методом «сверху-вниз»* состоит из семи этапов:

- установление головного события, которое следует предотвратить;

- определение первичных и вторичных событий (вызывающих, причинных), способных в конечном итоге обусловить головное событие;
- изучение отношений между вызывающими (причинными) и головным событиями с применением терминологии логических операций – «И» и «ИЛИ»;
- выявление тех параметров, которые необходимы для последующих этапов анализа всех событий;
- предыдущие три этапа повторяются, пока или все причины не выразятся через основные события, или прекратится дальнейшее дробление анализа из-за малой значимости событий, дефицита информации и т.д.;
- события представляются в схематическом виде с использованием специальной символики;
- проводится качественный и количественный анализ.

Как вариант построения ДО рассматривается использование *таблиц решений*, которые способны наглядно демонстрировать: во-первых, ряд дополнительных промежуточных состояний изучаемого элемента технической системы, в то время как ДО имеет возможность отобразить только два пограничных его состояния – рабочее и полный отказ; во-вторых, время возникновения, состояние технической системы в конкретный момент времени и последовательность тех событий, которые происходят в сложных технических системах, обладающих несколькими контурами регулирования. Все это имеет принципиально важное значение при проведении анализа отказов.

Методология *логического анализа «дерева отказов»* заключается в проведении аналитических исследований логической структуры процессов, основана на элементах булевой алгебры или алгебры логики. Применяемые в алгебре логики переменные способны принимать только два значения – либо «истина», либо «ложь» – иными словами, соответственно либо «появление», либо «непоявление». Функции при этом также принимают одно из двух значений в зависимости от комбинации логических переменных; они формируются с помощью таких операций как «И», «ИЛИ» и «НЕ».

2.6. Оценка экологических рисков в техносфере

Итогом процедуры оценки экологического риска в техносфере являются ответы на три принципиальных вопроса: во-первых, какие неблагоприятные события могут произойти (*идентификация риска*), во-вторых, как часто данные события могут происходить (*оценка частоты возможной актуализации опасности*), и, в-третьих, каковы могут быть последствия (*оценка последствий при актуализации опасности*). После оценки последствий обязательно осуществляется характеристика неопределенностей [2, 4, 5, 7, 15].

3. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Теоретические основы современной методологии оценки и управления экологическими рисками были первоначально разработаны в США в 70-х гг. XX века и служат научным базисом деятельности Агентства по охране окружающей среды США (US EPA). На сегодняшний день методология US EPA официально признана Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), получила достаточно широкое распространение во многих государствах мира, в том числе успешно апробирована в Российской Федерации. Риск можно определить следующей формулой:

$$\text{Риск} = \text{Опасность} \times \text{Экспозиция}$$

Под **опасностью** подразумевается сумма параметров экологического фактора риска (например, экотоксиканта) или реальной ситуации, которые обуславливают потенциальную вероятность возникновения негативных эффектов в состоянии здоровья населения и в окружающей природной среде.

Принципиальная схема анализа риска в соответствии с методологией US EPA включает три последовательных элемента – *оценку риска, управление риском и информирование о риске*.

В качестве приоритетных **объектов при оценке экологического риска** обычно рассматриваются люди, представители фауны и флоры, экологические системы в целом и отдельные свойства окружающей природной среды. При этом **индикаторами неблагоприятного воздействия факторов экологического риска** выступают:

- параметры качества и безопасности компонентов окружающей природной среды (атмосферы, гидросферы, литосферы, экологических систем);
- показатели уровня благосостояния социума (вооруженные конфликты, снижение качества жизни и другие);
- состояние здоровья населения, других биологических объектов (демографические показатели, заболеваемость, мутации и другие);
- состояние сферы экономики (ущербы от деструкции окружающей природной среды, недостаточно эффективное природопользование, материальные ущербы и другие).

Критериями при оценке экологического риска также служат:

- численность контингентов населения, которые могут пострадать от воздействия экологических факторов риска;

- пространственные характеристики континуума предполагаемого неблагоприятного воздействия (географические границы и площадь «территории риска»; характер и интенсивность негативного воздействия, его вероятность с вариабельностью в диапазоне от практически «неизбежного» до «маловероятного»);

- косвенные последствия актуализации экологических опасностей и обратимость возможных эффектов;

- потенциальное число жертв и пострадавших (заболевания, травмы физические и психические) как непосредственно при катастрофе, так и в последующий период;

- снижение привычного уровня жизни населения, включая финансовые потери и утрату материальных ценностей;

- характер и степень ущерба для окружающей природной среды.

Риск здоровью населения на популяционном уровне принято оценивать на основе системы показателей **потенциала здоровья**, к основным из которых относятся:

- *демографические показатели* – рождаемость, смертность (общая и специальные показатели), естественный прирост населения, средняя продолжительность предстоящей жизни;

- *показатели заболеваемости населения* – общая, по отдельным нозологическим формам и классам заболеваний (например, заболеваемость злокачественными новообразованиями), по группам населения (возрастным, половым, социальным и профессиональным), профессиональная, с временной утратой трудоспособности, а также инвалидность;

- *показатели физического развития и распределение по группам здоровья*.

Таким образом, ключевое значение в деятельности по оптимизации здоровья населения на популяционном уровне, качества и безопасности окружающей природной среды имеет идентификация факторов экологического риска и изучение механизмов их формирования.

Под **факторами экологического риска** понимаются те факторы, воздействие которых способно обусловить повышение вероятности возникновения нежелательных последствий в виде нарушений состояния здоровья населения и окружающей природной среды. По своей природе факторы экологического риска подразделяются, в частности, на факторы окружающей природной и антропогенной (социальной) среды, биологические параметры популяции, включая генетические особенности, и факторы, обусловленные стилем жизни. Здоровье населения является результатом совместного влияния экзогенных и эндогенных факторов, а также индивидуальной специфики организма. При этом часть факторов противодействует влиянию потенциальных опасностей и таким образом они уменьшают степень экологического риска, а другие, напротив, потенцируют такое влияние и увеличивают степень риска.

При оценке экологического риска для здоровья населения на популяционном уровне также применяется ряд показателей эпидемиологического (реального) риска:

- **относительный риск** – исчисляется как отношение частоты неблагоприятных эффектов для здоровья населения (заболевания, случаи смерти и другие), подверженного воздействию фактора экологического риска, к частоте аналогичных эффектов среди лиц, не находящихся под воздействием данного фактора. Иными словами, относительный риск представляет собой кратность возрастания вероятности нежелательного эффекта в случае воздействия определенного фактора риска. В показателе относительного риска не отражается абсолютная величина нежелательного эффекта для здоровья, он отражает силу причинно-следственной связи между воздействием фактора риска и его нежелательными последствиями (т.е. является *мерой влияния фактора риска*);

- **атрибутивный риск** на популяционном уровне исчисляется как разница между частотой нежелательных эффектов в популяции, находящейся под воздействием фактора риска, и частотой данных эффектов в популяции при отсутствии его воздействия;

- **групповой риск** определяется как разница в частоте нежелательных эффектов между группами населения, подвергающихся и не подвергающихся воздействию определенного фактора риска;

• **добавочный риск** – количественная характеристика связи между воздействием фактора риска и его нежелательными последствиями. Иными словами, добавочный риск определяется дополнительными случаями нежелательных последствий, обусловленных исключительно воздействием изучаемого фактора риска.

Реализация процедур оценки риска дает возможность, на основе результатов динамического наблюдения за состоянием окружающей природной среды и здоровьем населения прогнозировать потенциальные последствия изолированного и сочетанного влияния неблагоприятных экологических факторов [1, 6, 9, 12, 14, 15].

3.1. Введение в анализ экологического риска для здоровья

Состояние здоровья населения формируется под влиянием сложного комплекса факторов, включая генетические и биологические факторы (с долей влияния 18-22 %); социально-экономический статус; качество и доступность системы здравоохранения (8-10 %); стиль жизни, в том числе наличие вредных привычек (49-53 %), а также *качество и безопасность среды обитания* (17-20 %). Так, по оценке Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ, 1997 год), 23 % в сумме заболеваний и 25 % всех случаев злокачественных новообразований определяются воздействием факторов среды обитания, а по данным Агентства по охране окружающей среды США (US EPA) они играют приоритетную роль в возникновении каждого второй злокачественной опухоли. Канцерогенный риск в значительной степени (до 40 %) обусловлен теми факторами, которые регулируются самими людьми (например, солнечная радиация и табакокурение), в то время как долевое участие в нем загрязнения окружающей среды варьирует в диапазоне от 0,1 до 10,0 %. Доказано, что устойчивость человека к воздействию неблагоприятных факторов среды обитания контролируется наследственностью. Так, по результатам исследований в рамках проекта изучения генома человека (Environmental Genome Project) выявлено более 200 соответствующих генов.

Факторы среды обитания способны в разной степени участвовать в возникновении заболевания, выступая как:

- *этиологические (причинные) факторы*, практически полностью обуславливающие развитие определенной патологии; к настоящему времени идентифицировано около двадцати таких экологически обусловленных заболеваний (болезнь Минамата, болезнь итай-итай и другие);

- *факторы риска среды обитания* важные для возникновения и дальнейшего прогрессирования заболевания, но не способные при отсутствии определенных условий (наследственная предрасположенность, нарушенный статус организма и другие) вызвать у человека экологически зависимое заболевание со сложной мультикаузальной природой (например, атеросклероз, гипертоническая болезнь, злокачественные новообразования и другие). Так, в соответствии с современными представлениями, механизм химического канцерогенеза объединяет в себе ряд последовательных стадий: во-первых, *инициацию* с первичным повреждением клетки, во-вторых, *промоцию* с преобразованием уже иницированных клеток в опухолевые и, в-третьих, *прогрессию* со злокачественной пролиферацией опухолевых клеток и метастазированием. В том случае, если изолированно воздействует одно химическое соединение, которое обладает только промоторными или только иницирующими свойствами, то злокачественное новообразование не возникнет. Еще одним типом причинно-следственных связей является ситуация, когда воздействие фактора риска может быть достаточным, но не обязательно необходимым для возникновения заболевания. Так, лейкоз может быть вызван из-за воздействия бензола, однако данное заболевание может возникнуть и под влиянием других факторов риска без участия данного вещества. Причинно-следственные связи между экологическими факторами и экологически зависимыми заболеваниями удастся выявить и количественно характеризовать только на основе правильно спланированных и проведенных специальных исследований эпидемиологического, экологического и гигиенического типа.

Каждый человек постоянно контактирует со значительным числом разнородных факторов риска, как добровольно, так и вынужденно.

В традиционном представлении **риск** рассматривается как *вероятность возникновения (величина, варьирующая в диапазоне от 0 до 1) какого-либо события с предсказуемыми последствиями за определенный промежуток времени*. **Риск для здоровья** определяется ВОЗ как

ожидаемая частота нежелательных эффектов, возникающих от заданного воздействия загрязняющего вещества. Иными словами, тремя аспектами при характеристике риска (**R**) являются: *вероятность* реализации риска, *последствия* реализации риска и *значимость* последствий реализации риска. Чем больше частота неблагоприятных событий и выраженность их последствий, тем больше величина риска, что находит отражение в формуле:

$$R = F \times C ,$$

где *F* – частота определенных событий, а *C* – их последствия данных событий (рис. 8).



Рис. 8. Соотношения между вероятностью и выраженностью неблагоприятных последствий воздействия факторов риска среды обитания

При наличии значительного числа воздействующих на человека факторов риска возникает необходимость их сравнительного анализа с ранжированием по приоритетности (с учетом величины и значимости последствий) при разработке эффективных оптимизационных мероприятий по устранению или минимизации рисков до допустимого уровня. Данное обстоятельство послужило причиной появления и совершенствования методологии анализа риска для здоровья, включающей два функционально разграниченных этапа исследований – во-первых, *оценку риска* и, во-вторых, *управление риском*, реализуемым такими путями как:

- *абсолютный контроль* с полной элиминацией риска (например, запрет производства и применения особо опасного химического соединения);

3. Оценка экологического риска для здоровья

- *снижение уровня риска* до максимального технически и экономически достижимого уровня на основе с оценки соотношения «затраты – выгода»;
- *минимизация риска* до уровня, который воспринимается абсолютно всеми людьми как практически нулевой;
- *установление риска на приемлемом для каждого индивидуума и общества в целом уровне* с «адекватным запасом безопасности» (рис. 9).



Рис. 9. Этапы оценки риска и управления риском для здоровья

Многие методологические аспекты современной концепции оценки риска разрабатывались отечественной наукой, включая проблему экстраполяции экспериментальных токсикологических данных с животных на человека, критерии вредного воздействия, оценку многосредовых воздействий и другие.

Опасность принято рассматривать как совокупность свойств воздействующего на организм человека химического вещества, других потенциально вредных факторов или ситуации, которые определяют их способность при определенных условиях обуславливать возникновение неблагоприятных эффектов. При этом *риск для здоровья* может появиться при сочетании опасности с соответствующими условиями экспозиции

(воздействия) фактора риска на определенную популяцию людей, что можно проиллюстрировать следующими формулами:

$$\text{Риск} = (\text{Опасность}) \times (\text{Экспозиция})$$

$$\text{Риск} = (\text{Опасность}) \times (\text{Доза}) \times (\text{Время})$$

Третьим этапом современной методологии анализа риска служит информирование о риске всех заинтересованных лиц (рис. 10).



Рис. 10. Взаимосвязи трех этапов анализа риска для здоровья

С учетом совместного воздействия на популяцию людей сложного комплекса многочисленных разнородных факторов риска признается недостаточным проведение только оценки рисков, обусловленных химическим загрязнением среды обитания, а также рисков радиационной природы. К перспективным направлениям совершенствования анализа риска для здоровья относится разработка методов и критериев оценки профессионального риска, а также концепции микробиологического риска.

Важнейшими базовыми принципами методологии анализа риска признаются: системность, научная обоснованность, прозрачность и открытость, концентрация внимания на приоритетах, динамичность и гиб-

кость, равноправие всех заинтересованных сторон. К общим принципам процедуры оценки риска для здоровья относятся следующие:

- оценка риска должна базироваться на новейших научных данных;
- оценка риска функционально отделена от этапа управления риском;
- оценка риска должна проводиться в соответствии с четырьмя последовательными этапами: выявления (идентификации) опасности, оценки зависимости «доза – эффект», оценки экспозиции и характеристики риска;
- результаты оценки риска должны быть представлены в доступной для понимания форме;
- результаты оценки риска должны быть прозрачными, полностью и систематично документированными, представленными в доказательной и рациональной форме;
- необходимо полностью идентифицировать и учесть факторы, способные исказить результаты оценки риска (например, дефицит времени и ресурсов для проведения исследований);
- необходимо выявить источники формирования и возможное влияние на результаты исследований факторов неопределенности, минимизировать их;
- оценки риска для здоровья должны пересматриваться при появлении новой достоверной научной информации.

Новым формирующимся направлением в методологии анализа риска является *оценка рисков для окружающей среды, связанных с человеческой деятельностью*. Данный тип анализа в зарубежных публикациях принято обозначать как *анализ экологических рисков*, под которыми подразумевается вероятность развития неблагоприятных для экологических ресурсов эффектов (в биосистемах, у растений и животных за исключением человека), являющихся следствиями любых (преднамеренных или случайных, постепенных или катастрофических) антропогенных изменений природных объектов и факторов. Оценка экологического риска реализуется в три этапа: во-первых, *формулировка проблемы*, во-вторых, *характеристика экспозиции* и, в-третьих, *характеристика экологических эффектов и экологического риска*. Наряду с термином «*экологический риск*» (*ecological risk*) в рекомендациях междуна-

родных организаций встречается термин «*риск, связанный с воздействием окружающей среды*» (*environmental risk*), который применяется в отношении разнообразных рисков для человека. Подобный подход ориентирован на дифференцировку «чисто экологических проблем» и проблем, связанных с неблагоприятным воздействием факторов риска среды обитания на здоровье населения.

Этапами оценки риска для здоровья являются:

• **идентификация опасности с оценкой имеющихся данных.**

К мероприятиям данного этапа оценки риска относятся: выявление потенциально вредных и опасных факторов риска; качественное и количественное определение зависимости различных нарушений здоровья человека от факторов риска; оценка достаточности и достоверности имеющихся сведений об уровнях загрязнения окружающей среды исследуемыми поллютантами; составление номенклатуры приоритетных химических соединений, подлежащих последующему изучению;

• **оценка зависимости «доза-ответ»** (характеристика опасности, оценка токсичности) с определением количественных связей между уровнями экспозиции и параметрами здоровья населения;

• **оценка воздействия (экспозиции) химических веществ на человека** с характеристикой источников поступления поллютантов в окружающую природную среду; выявление маршрутов перемещения загрязнителей от источников к человеку, путей и точек воздействия; ретроспективное, оперативное и проспективное определение доз и концентраций; расчет значений экспозиции для популяции в целом и отдельных ее субпопуляций, включая «сверхчувствительные группы»;

• **характеристика риска**, включая обобщающий анализ всех полученных на предыдущих этапах сведений; расчеты показателей индивидуального и популяционного риска; сопоставление полученных значений рисков с допустимыми (приемлемыми) уровнями; сравнительная характеристика и ранжирование рисков с определением приоритетных по статистической, медико-биологической и социальной значимости; установление рисков, в отношении которых требуется разработка и реализация первоочередных оптимизационных мероприятий в целях их элиминации или минимизации до приемлемых уровней.

Управление риском как второй этап анализа риска логически продолжает оценку риска и ориентировано на научное обоснование оптимальных решений по элиминации или минимизации риска с последующим динамическим контролем (мониторингом) экспозиций и рисков, оценкой эффективности реализованных и необходимой корректировкой проводимых оптимизационных мероприятий. Базисом для управления риском служат результаты, во-первых, проведенной оценки риска и, во-вторых, сопоставления потенциального ущерба с возможными затратами на проведение оптимизационных мероприятий по снижению риска и прогнозируемым эффектом от их реализации (например, снижение смертности и заболеваемости). К основным элементам управления риском относятся:

- *сравнительная оценка и ранжирование идентифицированных рисков по их приоритетности* – выделение рисков, требующих первоочередного внимания с определением уровней вероятности развития нарушений здоровья, анализом их причинной обусловленности, углубленной характеристикой неблагоприятных последствий и ущербов постоянно здоровья населения;
- *определение уровней приемлемости (допустимости) всего комплекса идентифицированных рисков* на основе использования метода анализа «затраты – выгода» с учетом политических и социальных факторов, включая восприятие риска различными группами населения;
- *выбор стратегии минимизации и последующего динамического наблюдения за рисками* (контроль поступления химических поллютантов в компоненты окружающей среды, мониторинг остаточных экспозиций и рисков, регламентирование уровней допустимого воздействия);
- *разработка и принятие управленческих (регулирующих, оптимизационных) решений*, включая: ограничение числа экспонируемых лиц; снижение числа и мощности источников опасности; уменьшение сферы использования источника риска или территорий с источниками риска (например, запрет использования загрязненных участков территории для рекреационных целей; ограничение или полный запрет прямого контакта человека с опасным химическим соединениям; полный запрет производства, применения и ввоза определенного химического вещества или использования данного технологического процесса или оборудования).

Информирование о риске предусматривает распространение результатов оценки риска для здоровья населения и разработанных управленческих решений оптимизационного характера среди заинтересованных групп населения (например, среди врачей, экологов, руководителей, населения и общества в целом). Полученные в процессе оценки риска данные должны быть понятны специалистам по регулированию риска, доступны для представителей прессы и заинтересованных групп населения. При этом необходимо учитывать особенности восприятия риска разными группами населения. Так, значимым для восприятия информации о риске фактором является характер риска (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики риска, влияющие на его восприятие

Характеристики, усиливающие восприятие риска	Характеристики, снижающие восприятие риска
Большой риск	Меньший риск
Недобровольный	Добровольный
Искусственный	Природный
Риски, контролируемые другими лицами	Риски, контролируемые самим индивидуумом
Риски без выгод	Риски с выгодой
Источники информации о риске, не заслуживающие доверия	Источники информации о риске, заслуживающие доверия

Население, как правило, больше волнует не добровольный, а риск вынужденный, например, связанный с химическим загрязнением атмосферы (искусственный риск); с аварийной утечкой радионуклидов из ядерного реактора (катастрофический риск); с появлением микроорганизмов, являющихся продуктами генной инженерии (экзотический риск); риск, связанный с отсутствием видимых преимуществ (например, строительство мусоросжигательного предприятия непосредственно рядом с местом жительства); риск, находящийся под контролем других лиц, учреждений и организаций (загрязнение окружающей среды промышленными и бытовыми отходами); неоправданный риск (максимальный в сложившейся ситуации или воспринимаемый без учета каких-либо альтернативных вариантов).

Общепризнано, что реакции отдельных людей или группы на риск формируются как личностно-индивидуальными факторами, так и факто-

рами, характеризующими сам риск или информацию о нем. К личностно-индивидуальным факторам, определяющим восприятие риска, относятся знания, жизненный опыт, личностные и характерологические особенности, психоэмоциональное состояние и другие. Факторами, связанными с самим риском, являются происхождение опасности и потенциальные последствия ее актуализации; степень риска для данного индивида или группы лиц; выраженность возможных последствий риска; вариабельность сведений о риске, получаемых из различных источников.

Основные правила распространения информации о риске:

- партнерское отношение к общественности, ее участие в принятии решений, касающихся ее жизни и системы ценностей;
- учёт интересов всех групп населения с тщательным планированием трансляции значимой для них информации;
- учёт тех аспектов, которые наиболее всего беспокоит население (социальная справедливость, наличие работы, ответственность должностных лиц для людей важнее, чем статистические данные о смертности или заболеваемости);
- необходимость добиваться доверия населения;
- координация деятельности и тесное сотрудничество с надежными партнерами;
- учёт запросов средств массовой информации;
- четкое и понятное выражение своих мыслей (не использовать специальные термины и профессиональный жаргон, не перегружать информацию статистическими данными), уважительное отношение к слушателям [6, 9, 10, 14].

3.2. Идентификация опасности

Под **опасностью** понимается способность факторов различной природы – химической, физической, биологической как изолированных, так и в совокупности в определенных условиях наносить вред живому организму и/или относительная токсичность вещества или смеси веществ.

Первый этап оценки риска, представляющий собой **идентификацию потенциальной опасности** химического соединения как общего

признака взаимодействия химического соединения с биологической системой, реализуется преимущественно на *качественном уровне* вне зависимости от того, отмечалось или нет влияние данного вещества на потенциально чувствительный к нему живой организм. Иными словами, идентификация опасности – это *процесс установления причинно-следственных связей*.

На последующих этапах **риск** как специфический признак реальной ситуации, напротив, определяется *количественно* и представляет собой результат фактического или потенциального воздействия химического вещества, коррелирующий с уровнем экспозиции (воздействующими дозами) и спецификой условий. Иными словами, *при отсутствии экспозиции риск отсутствует вне зависимости от степени опасности химического соединения*.

В научном плане содержание этапа идентификации опасности представляет собой процедуру выявления причинно-следственной зависимости неблагоприятных эффектов для состояния здоровья от воздействия химического соединения. Данный процесс включает в себя всесторонний анализ научных сведений о свойствах изучаемого вещества, включая его поведение при попадании в объекты окружающей среды; особенности его воздействия на живые организмы в зависимости от путей поступления, интенсивности и продолжительности воздействия; возможные механизмы формирования нарушений в состоянии здоровья.

Максимально информативными и достоверными свидетельствами опасности химического соединения являются результаты клинических наблюдений, эпидемиологических и экспериментальных исследований с добровольцами-людьми. Но в большинстве случаев доступными являются данные, полученные при токсикологических исследованиях на подопытных животных, результаты лабораторных опытов *in vitro* на различных тест-объектах (культуры клеток и тканей, изолированные органы и другие), а также доступные сведения о химических соединениях, сходных по строению и/или особенностям механизма токсических эффектов. Если объектом исследований при оценке риска не является малоизученное химическое вещество, как правило, используются доступные аналитические обзоры, отчеты, справочники и базы данных, содержащие итоговые заключения высококвалифицированных экспертов в данной области о данном агенте.

Этап идентификации опасности предусматривает максимально полное выявление всех присутствующих в окружающей среде и потенциально опасных для населения химических соединений в ходе анализа сведений об источниках поллютантов в настоящее время и ретроспективно, о качественных и количественных характеристиках эмиссий, а также о результатах выполненных лабораторных исследований объектов окружающей среды.

Скрининговый характер этапа идентификации опасности определяет необходимость:

- выявления источников загрязнений окружающей среды, обуславливающих неблагоприятное воздействие на здоровье человека;
- идентификации всех поллютантов, присутствующих на изучаемой территории;
- характеристики возможных вредных эффектов химических соединений и оценки научной доказанности вероятности возникновения данных эффектов у людей;
- выявления приоритетных для последующих исследований химических веществ, маршрутов их распространения в окружающей среде и путей поступления в организм человека;
- установления негативных последствий от воздействий приоритетных поллютантов при различных маршрутах воздействия, параметрах экспозиции (острые, подострые, хронические, пожизненные), а также путей поступления в организм человека (ингаляционное, пероральное, кожное);
- оценки репрезентативности и достоверности доступных сведений об уровнях загрязнения отдельных компонентов среды обитания;
- определения необходимости в дополнительном сборе информации о содержании поллютантов в различных средах;
- оценки наличия данных о количественных критериях, используемых при анализе риска для здоровья (референтные дозы и концентрации, факторы канцерогенного потенциала и другие).

Одним из итогов этапа идентификации опасности является окончательная коррекция плана процедуры оценки риска с характеристикой неопределенностей, способных повлиять на итоговые заключения и рекомендации, а также с определением области применимости полученных результатов.

Этап идентификация опасности тесно связан с характеристикой опасности на этапе оценки зависимости «доза – ответ». Однако, если при идентификации опасности внимание акцентируется на качественных характеристиках вредных воздействий, то при изучении зависимости «доза – ответ» приоритетной целью является определение количественных показателей опасности химического соединения, в том числе зависимости неблагоприятных эффектов от уровня и продолжительности воздействия. Этап идентификации опасности также теснейшим образом связан с этапом оценки экспозиции, так как предусматривает определение индикаторных (приоритетных) химических соединений для последующих этапов оценки экспозиции и характеристики риска.

Надежность итоговых оценок риска зависит, во-первых, от учета индивидуальных особенностей чувствительности к химическому соединению, стиля жизни, во-вторых, от величин систематических и случайных ошибок, а также, в-третьих, от степени истинности и допустимости гипотез, предположений или упрощений, применяемых в процедуре оценки риска для здоровья. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения на всех четырех этапах оценки риска и по завершении исследований оценки неопределенностей и анализа чувствительности с оценкой влияния отдельных параметров на итоговую величину риска.

При **формировании перечня приоритетных для последующих исследований** потенциально вредных химических веществ на первом этапе следует составить максимально полный список всех потенциально опасных для человека химических поллютантов, присутствующих на изучаемой территории. Далее необходимо *определить все основные существующие в настоящее время или существовавшие в прошлом источники загрязнения* объектов окружающей среды, которые потенциально способны воздействовать на людей, проживающих на исследуемой территории. Обязательным является учет возможных межсредовых переходов и накопления химических соединений во вторично загрязненных средах. Так, например, содержащиеся в первично загрязняемом атмосферном воздухе соединения ртути, мышьяка и диоксины способны вторично загрязнять почву и продукты питания. Если поставлена задача оценки риска для здоровья населения из-за воздействия какого-либо

объекта, то важным источником информации становятся сведения о качественном и количественном составе выбросов или сбросов от данного объекта, об их пространственных и временных параметрах.

В предварительный список поллютантов рекомендуется включать: компоненты выбросов от стационарных источников предприятий и автомобильного транспорта; опасные и вредные производные трансформации поллютантов в компонентах окружающей среды; поллютанты, содержащиеся в сточных водах, сбрасываемых в водоемы хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения; химические вещества и дериваты их трансформации, поступающие в питьевую воду из источника водоснабжения, в процессе водоподготовки, хранения или транспортировки; поллютанты, содержащиеся в почве, атмосферном воздухе, воде открытых водоемов, привозных и местных продуктах питания. К основным источникам данных о выбросах относятся годовые формы государственной статистической отчетности «2 ТП-воздух» и тома «Атмосфера. Предельно допустимые выбросы вредных веществ» (ПДВ) населенного пункта или промышленных предприятий. Информация о потенциальных загрязнителях гидросферы и почвы представлена в материалах организаций, контролирующих сброс сточных вод, захоронение и утилизацию бытовых и промышленных отходов. Изучение потенциального загрязнения почвы предусматривает учёт мест ее локального загрязнения, состав промышленных отходов, возможного вторичного загрязнения почвы стойкими поллютантами, присутствующими в атмосфере. Потенциально опасными для здоровья населения являются химические вещества, поступающие в пищевые продукты из загрязненных компонентов окружающей среды (воздух, вода, почва), включая пестициды и минеральные удобрения. На данном этапе, параллельно с анализом миграции поллютантов в окружающую природную среду от разнородных источников загрязнения, необходим учёт результатов лабораторных исследований объектов окружающей среды на изучаемой территории. Результатом выполненных аналитических исследований являются сводные таблицы, содержащие информацию об изучаемой территории, местах отбора проб, названиях поллютантов, их регистрационных номерах CAS, количестве исследованных проб, частоте обнаружения поллютантов, минималь-

3.2. Идентификация опасности

ных и максимальных величинах концентраций, периодах их усреднения, средних (медианных) концентрациях и их верхних доверительных границах ($p < 0,05$). При оценке риска, обусловленного кратковременными влияниями поллютантов, рекомендуется также исчислять 95-й процентиль, отражающий верхнюю границу для 95 % зарегистрированных концентраций при избранном периоде усреднения (разовые или среднесуточные). Таким образом, на данном этапе производится инвентаризация выбросов и сбросов поллютантов в объекты окружающей среды, учет и регистрация применяемых химических соединений. В случае обнаружения при инвентаризации выбросов и сбросов канцерогенов производится определение рангового индекса канцерогенной опасности ($HRI_{канц.}$) с применением формулы

$$HRI_{канц.} = (E \times Wc \times P) / 10000 ,$$

где Wc – весовой коэффициент канцерогенной активности (табл. 2); P – численность населения, находящегося под воздействием; E – значение условной экспозиции (объем годового выброса, т/год).

Таблица 2

Весовые коэффициенты для оценки канцерогенных эффектов (Wc)

Фактор канцерогенного потенциала (мг/кг)	Группа по классификации US EPA	
	A/B	C
< 0,005	10	1
0,005 – 0,05	100	10
0,05 – 0,5	1000	100
0,5 – 5,0	10000	1000
5,0 – 50,0	100000	10000
> 50,0	1000000	1000000

Для неканцерогенов производится вычисление рангового индекса неканцерогенной опасности ($HRI_{неканц.}$) с применением формулы

$$HRI_{неканц.} = (E \times TW \times P) / 10000 ,$$

где TW – весовой коэффициент неканцерогенной активности (табл. 3); P – численность населения, находящегося под воздействием; E – величина условной экспозиции (объем годового выброса, т/год).

Весовые коэффициенты для оценки неканцерогенных эффектов (TW)

Безопасная доза, мг/кг	Безопасная концентрация, мг/м ³	Весовой коэффициент
< 0,00005	< 0,000175	100000
0,00005 – 0,0005	0,000175 – 0,00175	10000
0,0005 – 0,005	0,00175 – 0,0175	1000
0,005 – 0,05	0,0175 – 0,175	100
0,05 – 0,5	0,175 – 1,75	10
> 0,5	> 1,75	1

Формирование предварительного сценария воздействия и составление перечня потенциально опасных химических веществ. Важным элементом этапа идентификации опасности является определение основных маршрутов и путей воздействия химических соединений, уточняемых в последующем на этапе оценки экспозиции.

- *Сценарий экспозиции* объединяет в себе факты, научные гипотезы, допущения и заключения об особенностях реализации воздействия факторов риска: присутствующие в окружающей среде загрязнители, маршруты их воздействия и пути поступления в организм человека, а также находящиеся под воздействием группы населения. Преимущественно при проведении процедуры оценки риска для здоровья применяются стандартные сценарии, например, для селитебной и промышленной зон, сельской местности.

- *Маршрут воздействия* как обязательная составная часть любого сценария экспозиции, объединяющий в себе источники загрязнения окружающей среды с реципиентами (людьми), включает: во-первых, источники поллютантов для первично загрязняемых компонентов среды обитания; во-вторых, механизмы межсредового транспорта, аккумуляции, трансформации и миграции поллютантов; в-третьих, пространственные локализации точек воздействия на людей; в-четвертых, воздействующие среды (питьевая вода, атмосферный воздух и другие); в-пятых, пути поступления поллютантов из воздействующих сред в организмы людей (пероральное, ингаляционное, накожное). Обычно в сценариях воздействия предусматриваются несколько маршрутов воздей-

ствия. При осуществлении этапа идентификации опасности не ставятся задачи детального уточнения параметров всех возможных сценариев и маршрутов воздействия. Прежде всего, необходимым является определение того из каких объектов среды обитания, какими путями, в каком режиме и с какой продолжительностью в реальных условиях поллютант способен влиять на организм человека. Получаемые результаты применяются при планировании исследований на этапе оценки экспозиции. При оценке многосредового риска необходимым является проведение анализа практически всех возможных маршрутов воздействия химического соединения (табл. 4).

Таблица 4

Сценарии многосредового воздействия

Среда	Путь поступления		
	ингаляция	перорально	накожно
Атмосферный воздух	+	-	-
Водопроводная вода	+	+	+
Почва	+	+	+
Вода открытого водоема (плавание)	+	+	+
Пищевые продукты	-	+	-

Обычно на этапе идентификации опасности применяется максимально консервативный сценарий, что гарантирует учет как всех поллютантов, так и наиболее опасных путей их поступления в организм человека – сценарий многосредового воздействия на детей в возрасте до 6 лет.

Характеристика уровня опасности потенциально вредных факторов. К числу возможных источников сведений о потенциальной опасности химических соединений относятся их физико-химические характеристики, результаты исследований эпидемиологического типа, сведения о нарушениях состояния здоровья экспонированных лиц, данные специальных клинических и экспериментальных (на лабораторных животных) исследований, экспериментов *in vitro*, а также результаты исследований зависимостей «химическая структура – биологическая активность».

Потенциальная опасность химического соединения во многом связана с его *физико-химическими свойствами*, химическим строением и спецификой распространения в окружающей среде и организме челове-

ка, а также механизмами взаимодействия с восприимчивыми биологическими системами. Так, одним их высоко информативных физико-химических параметров, позволяющим прогнозировать межсредовые переходы и процессы биоаккумуляции, является *коэффициент распределения вещества между октанолом и водой* (K_{ow}), коррелирующий со способностью химических соединений растворяться в липидах, факторами биоконцентрации, коэффициентами распределения масло/вода, липиды/вода и другими. На распространение химических соединений в окружающей среде влияет *показатель растворимости в воде*, отражающий возможность их концентрирования в живых системах, а также способность оставаться связанными с почвой или выщелачиваться из нее с загрязнением грунтовых или поверхностных вод. Еще одним важнейшим физико-химическим показателем является *давление насыщенных паров* – чем оно выше, тем легче химическое соединение способно испаряться или сублимироваться соответственно из жидкой или твердой фазы, или улетучиваться из раствора, что определяет максимально достижимую концентрацию поллютанта в атмосферном воздухе. *Фактор биоконцентрирования* или *биоаккумуляции* (BCF) как отношение концентрации поллютанта в организме к его концентрации в окружающей среде характеризует тенденцию к накоплению его в живых организмах. При прогнозировании поведения химических соединений в окружающей среде применяется *коэффициент распределения вещества в системе «вода – органический углерод почвы»* (K_{oc}), который является показателем того, будут ли органические вещества оставаться связанными с почвой или донными отложениями, или они могут выщелачиваться в грунтовые воды, или растворяться в водной фазе. *Коэффициенты диффузии в воздух* (D_a) или *воду* (D_w) описывают движения молекул в соответствии с градиентом концентрации, их высокие значения свидетельствуют о способности поллютанта перемещаться между средами. Прогноз судьбы химических веществ в окружающей среде (разрушение, накопление и трансформации) характеризуют *кинетические показатели*, в том числе константы гидролиза, испарения и фотолитического распада, период полусуществования вещества, константы биодegradации и другие. Интегральным показателем опасности загрязнения окружающей среды является *стойкость загрязнителя*, определяемая величиной периода полусуществования.

Стойкими (персистентными) признаются химические вещества с периодом полусуществования в воздухе, воде, почве или донных отложениях, превышающим 50 суток. В том случае, если при трансформации загрязнителя в окружающей среде или при метаболических превращениях в организме образуются токсичные дериваты, то процедура идентификации опасности производится как для исходного вещества, так и продуктов его превращений.

Исследования на людях. Источниками данных о неблагоприятных эффектах в здоровье населения при воздействии химических веществ, являются:

- сведения о заболеваниях у лиц, подвергшихся воздействию;
- контролируемые клинические исследования индивидов или групп лиц;
- исследования эпидемиологического типа.

Наибольшую ценность для идентификации опасности представляют данные специальных клинических наблюдений за состоянием здоровья однородных репрезентативных выборок людей, находящихся в похожих условиях экспозиции. Обычные же клинические наблюдения редко являются определяющей информацией при оценке риска. Тем не менее, данные сведения нередко применяются для обоснования референтных (безопасных) уровней воздействия при характеристике риска. Исследования эпидемиологического типа ориентированы на выявление нарушений здоровья населения на популяционном уровне с поиском и количественной характеристикой причинно-следственных связей между неблагоприятными факторами окружающей среды и состоянием здоровья населения. Вариантами эпидемиологических исследований являются *описательные* (экологические, корреляционные, географические), *аналитические* и *экспериментальные*. Экологические (или корреляционные) исследования охватывают популяции или большие группы населения, подвергающиеся воздействию негативных факторов окружающей среды, например, экологическое исследование по изучению связи между показателями смертности населения и уровнями загрязнения атмосферного воздуха в городах. Однако экологические исследования, во-первых, не предоставляют возможность оценки распределения экспозиций среди населения, так как экспозиция оценивается для всей популяции в целом

и, во-вторых, экологический тип исследований не позволяет учитывать множество характерных для больших и разнородных популяций смешивающих факторов, способных вызывать такой же эффект, что и изучаемый фактор. При выявлении количественных связей между факторами риска окружающей среды и состоянием здоровья населения наиболее ценными являются аналитические методы эпидемиологических исследований – поперечные, по типу «случай-контроль» и когортные (продольные, динамические). Поперечные исследования (одномоментные) отражают состояние изучаемых групп в определенный момент времени. При исследованиях по схеме «случай – контроль» сопоставляются группы лиц, у которых имеется изучаемое заболевание («случай») и лиц, у которых оно отсутствует («контроль»). Затем в каждой из этих групп устанавливается число лиц, подверженных или не подверженных воздействию изучаемого фактора риска. Чем больше в опытной группе («случай») удельный вес лиц с изучаемым фактором, тем вероятнее причинная обусловленность данного заболевания. При проведении когортных исследований изучается состояние здоровья людей, подвергающихся неблагоприятному воздействию, и производится поиск значимых различий в показателях здоровья или причинах смерти в данной группе по сравнению с контрольной популяцией. Когортные исследования осуществляются систематически, непрерывно или через относительно короткие промежутки времени, они могут быть ретроспективными и проспективными. Ретроспективные исследования ориентированы на поиск в прошлом причин заболеваний, возникших в настоящее время путем сравнения групп (когорт) с наличием заболеваний и лиц, у которых заболевание отсутствует с оценкой предшествующих экспозиций факторов риска. Целью же проспективных исследований является поиск эффекта, иными словами, от имеющегося воздействия фактора риска переходят к анализу возникающих заболеваний. При этом формируются группы лиц, подвергающихся и не подвергающихся анализируемому воздействию, за которыми устанавливается динамический контроль с учетом случаев возникновения изучаемого эффекта в данных группах. Убедительные результаты исследований эпидемиологического типа позволяют делать обоснованные выводы о наличии опасности, так как предоставляют информацию о состоянии здоровья людей в условиях реальной

экспозиции. Интерпретация результатов исследований эпидемиологического типа может быть достаточно сложной по причине того, что:

- идентификация подходящих контрольных групп часто затруднительна, так как изучаемые факторы риска нередко сочетаются с другими факторами, оказывающими влияние на состояние здоровья (социально-экономические условия, стиль жизни и другие);
- бывает трудно обеспечить контроль за взаимосвязанными факторами риска (например, табакокурением), способными существенно влиять на состояние здоровья;
- только некоторые нозологические формы подлежат систематическому учету и регистрации, данные медицинской статистики и даже информация о причинах смертей имеют ограниченную надежность;
- достоверные данные о степени влияния потенциально опасных химических веществ часто малодоступны, что затрудняет установление зависимости «доза – ответ»;
- при изучении заболеваний с продолжительным латентным периодом (например, злокачественных новообразований) необходимо многолетнее наблюдение для установления отсутствия нежелательного эффекта. При этом воздействие потенциальных факторов риска будет продолжаться, что обусловит дальнейшее возрастание риска;
- репрезентативность эпидемиологических исследований зачастую ограничена, если им не охвачены очень большие популяции.

Наиболее надежные результаты эпидемиологические исследования обеспечивают в случае изучения производственных воздействий. На результаты эпидемиологических исследований оказывают влияние случайные и систематические ошибки, а также смешивающие факторы:

- *случайные ошибки* обусловлены неоднородностью любой популяции по индивидуальным, половым, возрастным различиям в восприимчивости к воздействию факторов риска окружающей среды. Снижение величины случайной ошибки достигается путем увеличения численности выборок и уменьшения различий между ними по всем факторам, кроме исследуемых;
- *систематические ошибки* подразделяются на *ошибки отбора* (составляемые выборки не идентичны по ряду характеристик) и *ошибки наблюдений* (например, более углубленное изучение состояния

здоровья или экспозиций в какой-то выборке по сравнению с другими группами);

○ *смешивающие факторы (имитаторы)* вызывают эффект, аналогичный эффекту от изучаемого фактора риска (например, при изучении роли кофе в развитии приступов стенокардии смешивающим фактором является табакокурение, сопровождающее прием кофе).

Общепризнанными критериями при доказательстве существования причинно-следственной связи являются:

▪ *достоверность* (выводы базируются на правильной постановке исследований и обладают достаточной достоверностью, учитываются смешивающие факторы);

▪ *специфичность* (определенная причина приводит к возникновению специфического для нее эффекта);

▪ *биологическое правдоподобие* (должно существовать патофизиологическое обоснование связи между воздействием фактора риска и вызываемым им нежелательным эффектом);

▪ *аналогия* (параллелизм с другими достаточно изученными причинно-следственными взаимоотношениями, а также согласованность с результатами, полученными экспериментальным путем);

▪ *постоянство* (наблюдаемые эффекты должны подтверждаться другими исследованиями); зависимость «доза – ответ» (увеличение экспозиции приводит к росту вероятности развития исследуемого эффекта); временная зависимость (причина должна предшествовать следствию);

▪ *обратимость* (устранение фактора риска должно приводить к снижению риска заболевания).

Исследования на животных. Исследования токсичности базируются на представлениях о том, что негативные эффекты воздействия химических соединений на людей могут быть смоделированы в токсикологическом эксперименте на специально подобранных соответствующих видах лабораторных животных. Целями токсикологических исследований являются, во-первых, установление природы (причин, источников и происхождения) нарушений в состоянии здоровья, обусловленных химическим загрязнителем, и, во-вторых, определение диапазонов доз, при которых наблюдаются определенные патологические или функциональные изменения в организме. Как правило, отправной точкой при

этом служат результаты исследований острой, обусловленной однократной дозой, токсичности химического вещества для экспериментальных животных. Экспозиции подразделяются на острые (с продолжительностью вредного воздействия до 24 часов), непродолжительные, кратковременные (от 7 до 14 дней), подострые или субхронические (до 90 дней), хронические, включая пожизненные. Уровень выраженности реакций организма определяется величиной воздействующей дозы или концентрации. Для большинства химических соединений, кроме генотоксичных канцерогенных веществ, в зависимости «доза – ответ» наблюдается такой уровень воздействия, при котором эффект равен нулю. В методологии оценки риска при хроническом воздействии широко используются следующие понятия: *NOEL* – уровень отсутствия наблюдаемого эффекта; *NOAEL* – уровень не обнаружения вредных эффектов, наивысшая доза или концентрация, при которой современными методами исследований не удастся выявить вредных для здоровья эффектов (отечественный аналог – термин максимальная недействующая доза или концентрация); *LOAEL* – нижний уровень наблюдаемого вредного эффекта, т.е. наименьший уровень экспозиции, при которой наблюдается вредный эффект (пороговая доза/концентрация); *AEL* – уровень вредного эффекта; *FEL* – уровень выраженного (тяжелого) эффекта. Безопасные для здоровья человека уровни воздействия химических веществ – референтные дозы (*RfD*) и референтные концентрации (*RfC*) устанавливаются путем деления *NOAEL* на величину фактора неопределенности (*коэффициента запаса*). В отношении *генотоксических канцерогенов* подразумевается, что они не имеют порога вредного действия и любая, отличная от нуля, доза теоретически может вызвать развитие злокачественного новообразования у определенного числа людей в экспонируемой популяции. На этапе идентификации опасности анализируется широкий спектр эффектов, обусловленных изучаемым поллютантом, во всем диапазоне воздействующих доз, при разной продолжительности экспозиции, при различных путях поступления химического вещества в организм и при различных режимах воздействия – постоянном или прерывистом. Критическими органами или органами-мишенями при оценке риска принято называть те органы (системы), которые наиболее чувствительны к воздействию минимальных из эффективных доз или концен-

траций химического загрязнителя. Одновременное поражение нескольких органов и систем называется системным вредным эффектом. Весомость результатов токсикологических исследований увеличивается при обнаружении исследуемого эффекта одновременно у животных разного пола и биологического вида, при подтверждении результатов эксперимента данными, полученными в опытах *in vitro* и на основе анализа зависимостей «химическая структура – биологическая активность».

Краткосрочные тесты и экспресс-методы. Наибольшее развитие получили тесты на генотоксичность химических соединений из-за высокой стоимости и длительности экспериментов по обнаружению мутагенных и канцерогенных свойств новых химических соединений. Недостатком существующих тест-систем является относительно низкая надежность предсказаний канцерогенных свойств в опытах *in vitro* не превышающая 45–75 %. К настоящему времени разработаны тест-системы для определения пренатальной токсичности новых химических соединений, их раздражающего действия и токсичности для различных органов-мишеней (печень, легкие, почки и другие). Результаты исследований *in vitro* являются вспомогательными на этапе идентификации опасности. Количественные зависимости «химическая структура – биологическая активность» (*SAR* или *QSAR*) характеризуют зависимость физико-химических свойств загрязнителя (растворимость в воде, давление паров, температуры кипения и плавления и другие), его поведения в окружающей среде (биоцентрирование, фотодеградация, стабильность, биodeградация и другие) и вызываемых специфических эффектов у человека (канцерогенность, мутагенность, влияние на репродуктивную систему и развитие, раздражающее действие и другие), а также других биообъектов от молекулярной структуры нового химического соединения. Иными словами, при оценке риска зависимости «химическая структура – активность» обычно используются для прогнозирования экотоксикологических характеристик и возможного типа вредного действия новых химических веществ.

Характеристика опасности химических канцерогенов. В отличие от обладающих токсическим действием химических соединений, оценка канцерогенного риска не должна основываться только на значени-

ях пороговых доз и концентраций. Подразумевается, что даже незначительное субпороговое число молекул *генотоксического канцерогена* может привести к изменениям в отдельной клетке с последующей неконтролируемой ее пролиферацией и формированием в отдаленный период злокачественного новообразования. Подобный механизм обозначается как беспороговый, а его следствием является отсутствие пороговой дозы (концентрации), гарантирующей отсутствие канцерогенного эффекта. Иными словами, любой уровень воздействия генотоксического канцерогена связан с канцерогенным риском. *Негенотоксические вещества* также могут вызывать развитие злокачественных новообразований, однако, только после предварительного повреждения клеток и тканей или нарушения регуляторных систем организма, в частности эндокринной системы. Для подобных веществ существует порог как токсического, так и канцерогенного действия. При идентификации опасности потенциально канцерогенных химических веществ решается ряд задач, во-первых, установления степени доказанности канцерогенности исследуемого вещества для человека, во-вторых, выявления условий, способствующих проявлению канцерогенного эффекта, и, в-третьих, оценка соответствия данных условий специфике выбранного сценария воздействия.

Рекомендуется на этапе идентификации опасности произвести формирование компактных *токсикологических профилей химических загрязнителей*, попавших в уточненный список веществ, приоритетных для оценки риска. Данные профили в виде приложения будут включены в итоговый отчет по оценке риска и должны содержать: во-первых, аннотацию со значениями параметров зависимости «доза – ответ», а также перечнем критических органов и эффектов, применяемых в данной процедуре оценки риска для здоровья; во-вторых, введение, включающее сведения об источниках поступления и особенностях миграции в окружающей среде, характеристику метаболизма поллютанта (поступление, распределение, биологические трансформации, выведение); в-третьих, вредные неканцерогенные эффекты (при пероральном, ингаляционном и прочих путях поступления; критические системы и эффекты; основное критическое исследование и поддерживающие данные; значения референтных доз и концентраций); в-четвертых, канцерогенность (при пероральном, ингаляционном и прочих путях поступления, существующие

классификации канцерогенности, факторы канцерогенного потенциала); и, в-пятых, список использованной специальной научной литературы.

При аналитическом разделе перечня приоритетных загрязнителей следует определить группы одновременно поступающих в организм химических соединений, произвести для них сопоставление критических органов (систем) и эффектов и рассмотреть вероятность их совместного (комбинированного и комплексного) воздействия. Для всех химических канцерогенов их аддитивное взаимодействие предполагается по умолчанию, а в отношении неканцерогенов в рамках консервативного подхода при прогнозировании их возможного комбинированного воздействия его аддитивный характер рассматривается в отношении химических соединений с одинаковыми мишенями – органами или системами.

На этапе идентификации опасности также рекомендуется произвести группировку загрязнителей по вызываемым ими неблагоприятным эффектам и/или критическим органам и системам органов (канцерогены, гепатотропные, нефротоксические и т.д.).

Выбор приоритетных для оценки риска химических соединений. Первоначальный, максимально полный, перечень всех химических веществ, которые могут загрязнять окружающую среду на исследуемой территории (абсолютно все присутствующие в окружающей среде вещества вначале рассматриваются как потенциально опасные факторы) в последующем анализируется для определения химических веществ, представляющих наиболее высокую опасность при путях поступления в организм человека, выделенных в предварительном сценарии воздействия. Этапами формирования итогового перечня химических соединений являются следующие:

1. сбор сведений о химических соединениях, которые потенциально способны влиять на состояние здоровья населения;
2. аналитические исследования их опасности, иными словами, вредности для здоровья человека, а также обобщение доступной информации об их концентрациях в компонентах окружающей среды;
3. предварительное ранжирование химических соединений с учетом количественных параметров их выбросов и сбросов в окружающую среду, а также выраженности канцерогенных и токсических свойств;

4. построение типовых сценариев экспозиции для отобранных соединений;

5. исчисление рисков для избранных сценариев воздействия с применением стандартных методов и доступных сведений о параметрах опасности, содержании в окружающей среде и зависимостях «доза – ответ», в том числе референтных уровнях воздействия и факторах канцерогенного потенциала;

6. ранжирование химических загрязнителей на основе определенных ориентировочных величин канцерогенных и неканцерогенных рисков, формирование итогового списка приоритетных химических веществ, которые подлежат процедуре дальнейшей оценки риска.

Оценка риска для здоровья человека в отношении всех потенциально вредных веществ не возможна из-за огромного объема необходимых исследований и материальных ресурсов, а также по причине недоступности адекватных сведений об уровнях воздействия и потенциальной опасности многих поллютантов. Поэтому исследованиями обычно охватывается ограниченное число (от пяти до тридцати) приоритетных соединений, которые оптимально характеризуют существующий риск для здоровья населения. Так, как правило на территориях промышленных центров основная доля, до 90 %, суммарного канцерогенного и неканцерогенного риска приходится на 8–10 из сотен присутствующих в окружающей среде химических загрязнителей. Поэтому при обеспечении адекватного отбора приоритетных для изучаемой территории поллютантов получаемые оценки риска не будут существенно отличаться от оценки риска, обусловленного абсолютно всеми химическими соединениями, присутствующими в окружающей среде.

Критерии приоритетности химических веществ следующие:

- поступающее в объекты окружающей среды количество химического соединения;
- численность потенциально подверженного воздействию химического вещества населения;
- высокая персистентность (т.е. стойкость) химического соединения при периоде его полусуществования в объектах окружающей среды свыше пятидесяти суток;

- способность к биоаккумуляции химического соединения – возможность его перехода из загрязненных объектов окружающей среды в биологические объекты, например, в водные организмы. Биоаккумулирующими являются химические соединения при величине коэффициента биоаккумуляции для рыб свыше 500, а также загрязнители с логарифмом коэффициента распределения октанол/вода свыше 4.0;

- выраженная способность поллютанта к межсредовому распределению, транспорту и миграции из одного объекта окружающей среды в другие; одновременное загрязнение им нескольких объектов окружающей среды, пространственное распространение загрязнений;

- доказанная опасность поллютанта для здоровья населения, в том числе возникновения отдаленные и необратимые эффектов, обладающих высокой медико-социальной значимостью;

- токсичность для организмов в окружающей среде, включая животных и растений, как водных, так и наземных;

- наличие других эффектов, включая нарушения химических процессов в атмосферном воздухе, изменения реакции среды (рН), появление необычных свойств (например, хелатообразующая способность, нарушение прозрачности атмосферы, цветение водоемов и других).

При образовании в объектах окружающей среды опасных дериватов трансформаций исходного поллютанта данные дериваты также подлежат включению в перечень потенциально приоритетных химических соединений.

Соответствие действующим гигиеническим регламентам не служит основанием для изъятия вещества из списка химических веществ, изучаемых при оценке риска для здоровья.

К критериям исключения химических соединений из перечня приоритетных поллютантов для оценки риска относятся следующие:

- отсутствие сведений о результатах замеров концентраций поллютанта или недостаточная надежность доступных сведений при невозможности даже ориентировочно оценить параметры экспозиции;

- неорганические соединения в случае, если их концентрации не превышают естественных региональных фоновых уровней (железо, кальций и другие);

- находка поллютанта только в единичном или двух объектах окружающей среды, в незначительном количестве исследованных проб (менее чем в 5 %), в малых концентрациях относительно референтных уровней воздействия (гигиенических регламентов), значение коэффициента опасности (HQ) значительно ниже 0.1, канцерогенный риск меньше $1 \cdot 10^{-6}$. В случае воздействия в комбинации с другими химическими соединениями, обладающими однородным действием и/или воздействующими на одни и те же органы или системы органов, исключение данного поллютанта не должно приводить к значительному уменьшению значения суммарного индекса опасности (HI);

- не отмечается существенная токсичность и нет данных о канцерогенности для людей;

- недоступность адекватных данных о характеристиках биологического воздействия поллютанта при неисполнимости даже ориентировочного прогнозирования вероятных параметров его токсичности и потенциальной опасности (например, с применением анализа зависимостей «химическая структура – биологическая активность», экстраполяции с иных путей поступления в организм человека или другой продолжительности экспозиции);

- соответствие концентрации (дозы) эссенциального химического элемента его рекомендуемому суточному потреблению.

При предварительном ранжировании химических загрязнителей могут учитываться: во-первых, данные об объемах поступлении в объекты окружающей среды и численности экспонируемого населения; во-вторых, результаты, полученные при моделировании рассеивания загрязнений и при анализе особенностей их поведения в окружающей среде; в-третьих, доступные сведения динамического наблюдения за содержанием поллютантов в окружающей среде; в-четвертых, данные о вредных эффектах, обусловленных определенным химическим соединением; величины референтных уровней воздействия (в том числе гигиенические регламенты, референтные дозы, референтные концентрации, региональные уровни минимального риска и целевые концентрации); присутствие данного поллютанта в списках приоритетных опасных либо особо регулируемых химических веществ.

Процедура ранжирования химических соединений на этапе идентификации опасности проводится для обоснования оптимального списка подлежащих дальнейшему изучению загрязнителей окружающей среды. Повторное ранжирование проводится *на этапе характеристики риска* для выявления приоритетных источников риска, максимально поражаемых мишеней – органов и систем органов, формирования короткого перечня «индикаторных соединений» в целях динамического наблюдения за уровнем риска на исследуемой территории с оценкой эффективности реализованных оптимизационных управленческих решений. К наиболее опасным отнесены химические соединения с высокой стабильностью в окружающей среде, способные к межсредовым переходам и пространственным миграциям. При определении приоритетности поллютантов учитывается тип источника и состав загрязнений, их выбрасываемое (сбрасываемое) в окружающую среду количество, загрязняемые объекты окружающей среды, пространственное распространение загрязнений, биоаккумуляция, острая, подострая и хроническая токсичность для человека и животных, экотоксичность, канцерогенность и тератогенность.

При осуществлении предварительного ранжирования потенциальных канцерогенов по степени их опасности рекомендовано основываться на величине возможной экспозиции, численности находящегося под воздействием населения, а также уровня доказанности канцерогенного действия и его выраженности, которая оценивается по значению фактора канцерогенного потенциала и единичному риску.

Характеристика неопределенности идентификации опасности.

На этапе идентификации опасности обязательным является максимально полный учет ошибок, неточностей, недостаточно надежных гипотез и выводов, которые способны повлиять на итоговые характеристики риска. При невозможности проведения количественной характеристики неопределенностей на основе ориентировочных значений экспозиций и величин референтных уровней воздействия на данном этапе качественно по аналогии со сходными территориями с учетом доступных литературных данных анализируется влияние различных компонентов неопределенности с дифференциацией его на сильное, умеренное и слабое. К ос-

новным источниками неопределенности на этапе идентификации опасности относятся:

- недостаточно полная или неточная информация о потенциальных источниках загрязнения различных объектов окружающей среды, о качественных и количественных параметрах эмиссий химических соединений;
- ошибочные прогнозы судьбы и миграции поллютантов в окружающей среде;
- недостаточная степень полноты, достоверности и репрезентативности данных лабораторных исследований;
- слабая доказательность или отсутствие достоверной информации о вредных эффектах у человека.

Обычно характеристика опасности осуществляется для условий воздействия единичного, изолированно воздействующего химического вещества. Однако люди крайне редко подвергаются воздействию только одного агента: применяемые человеком химические соединения зачастую включают различные примеси или они применяются в комбинации с другими веществами. Экспозиция сложных смесей химических веществ модифицируется под влиянием условий и стиля жизни, вредных привычек (например, табакокурение).

Итогом этапа идентификации опасности должны быть: установленные для каждого вещества наиболее значимые вредные эффекты (критические органы и системы органов, варианты критических эффектов); оценки весомости имеющихся доказательств; характеристика процессов абсорбции, распределения, выведения и метаболизма химических загрязнителей; оценки релевантности (соответствия) имеющихся данных для человека, включая наиболее чувствительные подгруппы популяции; результаты критического анализа сделанных предположений и допущений.

Таким образом, основными задачами этапа идентификации опасности являются:

- ✓ выявление всех источников загрязнения объектов окружающей среды и возможного воздействия на состояние здоровья населения;
- ✓ идентификация всех поллютантов;

- ✓ характеристика потенциальных вредных эффектов химических соединений и оценка научной доказанности возможности развития этих эффектов у человека;
- ✓ определение возможных маршрутов экспозиции;
- ✓ выявление приоритетных для последующего изучения химических соединений, приоритетных маршрутов их воздействия, включая приоритетные загрязненные среды и пути поступления химических веществ в организм человека;
- ✓ установление тех вредных эффектов, которые могут быть вызваны приоритетными веществами при оцениваемых маршрутах воздействия, продолжительности экспозиции (острые, подострые, хронические, пожизненные) и путях их поступления в организм человека;
- ✓ оценка полноты и достоверности имеющихся данных об уровнях загрязнения различных объектов окружающей среды, определение задач по дополнительному сбору информации о фактических и/или моделируемых концентрациях химических веществ в различных средах;
- ✓ оценка наличия сведений о количественных критериях, необходимых для последующего анализа риска для здоровья (референтные дозы и концентрации, факторы канцерогенного потенциала);
- ✓ окончательная коррекция плана проведения исследований по оценке риска, а также установление тех неопределенностей, которые способны повлиять на полноту и достоверность окончательных заключений и рекомендаций. Тем самым определяются границы оценки риска, характеризующие ту область исследуемой проблемы, для которой с известной степенью достоверности применимы полученные результаты оценки риска [9, 10, 12, 13, 14].

3.3. Оценка зависимости «доза – ответ»

Этап оценки зависимости «доза – ответ» заключается в количественной характеристике токсикологических данных и в выявлении причинно-следственной связи между дозой воздействующего поллютанта и выраженностью проявлений негативных эффектов в человеческой популяции. Установленная зависимость «доза – ответ» является базисом

определения параметров токсичности, например, референтных доз и концентраций, факторов наклона, которые применяются при характеристике риска здоровью населения при разных степенях экспозиции изучаемого фактора риска.

Обычно процедура анализа зависимости «доза – ответ» рассматривается как выявление детерминант неблагоприятных проявлений воздействия изучаемого химического соединения, установление той минимальной дозы, которая вызывает наблюдаемый негативный эффект, а также оценка скорости возрастания изучаемого эффекта при увеличении дозы.

Ключевыми постулатами современной методологии оценки риска являются следующие:

- во-первых, химические канцерогены, обладающие *генотоксическим механизмом* воздействия, способны индуцировать процессы канцерогенеза при любой воздействующей дозе за счет инициирования повреждения наследственного материала;

- в случае с неканцерогенными веществами и химическими канцерогенами, не обладающими генотоксическими свойствами, признается существование пороговых уровней, без превышения которых неблагоприятные эффекты в здоровье не проявляются.

Оценка зависимости реакций человеческого организма от дозы поллютанта основана на следующих предположениях:

- интенсивность ответной реакции прямо коррелирует с дозой химического соединений;

- чем больше доза химического поллютанта, тем выше доля людей в популяции, реагирующих на его воздействие;

- чем больше доза химического поллютанта, тем более тяжело протекают реакции, развивающиеся среди людей, находящихся под его воздействием;

- неканцерогенные эффекты способны проявляются исключительно при условии достижения пороговых (предельных) доз поллютанта;

- в случае с эффектами канцерогенеза пороговые дозы теоретически не могут быть установлены.

Для химических веществ, не обладающих канцерогенной активностью, типична S-образная (сигмоидальная) форма зависимости «доза –

ответ», причем левая ветвь соответствующей кривой стремится к нулевому значению, либо соединяется с абсциссой в точке, которая соответствует полному отсутствию эффекта (рис. 11).

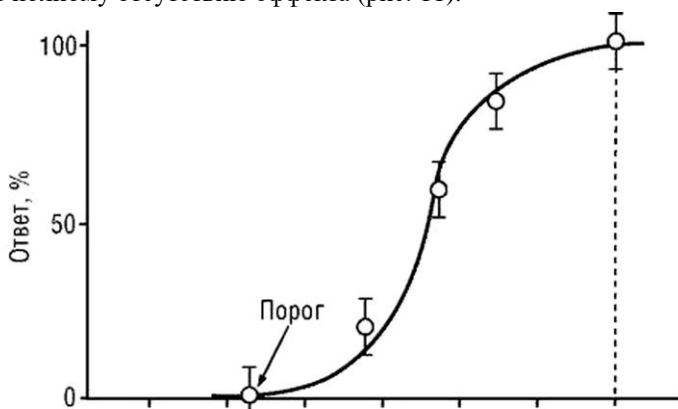


Рис. 11. Типичная кривая зависимости «доза – ответ» для химических загрязнителей, не обладающих канцерогенными свойствами

Основной целью рассматриваемого этапа процедуры оценки риска является аналитическое обобщение доступных сведений о соответствующих гигиенических регламентах, о пороговых уровнях безопасного воздействия – референтных дозах и референтных концентрациях, о критических органах и системах органов, о возможных неблагоприятных эффектах с последующим выходом на оценку практической значимости этих сведений в интересах успешной реализации программы исследований. При этом учитываются сведения, полученные на предыдущем этапе идентификации опасности о показателях опасности изучаемого поллютанта.

Этап оценки зависимости «доза – ответ» включает в себя последовательные процедуры:

- сбора достоверных сведений о токсических и канцерогенных свойствах изучаемого химического соединения;
- определение ключевого, критического исследования или наблюдения, которое наиболее адекватно характеризует зависимость «доза – ответ», а также регистрируемые нежелательные эффекты в состоянии здо-

ровья при параметрах воздействия максимально приближенных к избранному сценарию и маршрутам воздействия изучаемого поллютанта;

- анализ дополнительных, «поддерживающих» исследований, которые способны подтвердить адекватность выбора ключевого, критического исследования или наблюдения;
- установление требуемых характеристик зависимости «доза – ответ», оценка неопределенностей и экстраполяция выявленных параметров зависимости «доза – ответ» на население, находящееся под воздействием изучаемого химического соединения;
- аналитическое обобщение доступных токсикологических данных и определение критериев, используемых при последующей оценке риска;
- заключительная характеристика комплекса неопределенностей, которые относятся к этапу анализа зависимости «доза – ответ».

Характерной особенностью воздействия многих химических поллютантов является весьма широкий спектр возможных негативных эффектов для состояния здоровья, зависящих как от пути, так и от продолжительности экспозиции, а также от величины воздействующей дозы или концентрации. Так, при увеличении дозы наблюдается модификация и возрастание интенсивности проявления симптомов, распространением токсического процесса на другие органы и системы органов.

Принципиально важным в современной методологии оценки риска является принцип ориентации внимания на вредный эффект, который проявляется в условии воздействия минимальной из эффективных доз – так называемый критический эффект, затрагивающий критические органы или системы органов. Так, данный принцип положен в основу определения референтных (безопасных) уровней воздействия химических соединений. Однако при наличии доступных профильных данных о результатах исследований эпидемиологического и/или экспериментального типа рекомендуется детально рассматривать полный спектр воздействий исследуемого химического загрязнителя, что существенно увеличивает возможности для проспективного анализа потенциальных негативных эффектов в состоянии здоровья населения.

К числу наиболее часто применяемых параметров зависимостей «доза – ответ» или «доза – эффект» относятся: во-первых, количественное

значение наклона зависимости, характеризующее возрастание вероятности возникновения вредного эффекта при увеличении дозы или концентрации соответственно на 1 мг/кг или 1 мг/м³; во-вторых, величина уровня воздействия, связанная с определенной вероятностью возникновения вредного эффекта; в-третьих, максимальная недействующая доза и минимальная доза, способная вызвать пороговый эффект для химических соединений, не обладающих канцерогенными свойствами, или канцерогенных соединений без генотоксического механизма воздействия.

Параметры, относящиеся к указанным первой и второй группам, преимущественно применяются при оценке канцерогенных рисков и рисков для здоровья населения, обусловленных воздействием ряда наиболее часто встречающихся загрязнителей, которые были подробно изучены в ходе ранее проведенных исследований эпидемиологического типа. Помимо этого, показатели второй группы используются в случае определения опорных (реперных) доз и концентраций. В целях характеристики риска возникновения неканцерогенных эффектов обычно прибегают к применению третьей группы параметров, характеризующих степень правдоподобия отсутствия негативных реакций, в качестве базиса при определении уровней минимального риска – *референтных доз (RfD)* и *референтных концентраций (RfC)* для химических соединений. При этом подразумевается, что превышение референтной (безопасной) дозы не обязательно приводит к возникновению негативного эффекта. Иными словами, чем выше воздействующая доза химического поллютанта и чем значительно она превосходит дозу референтную, тем больше вероятность возникновения неблагоприятных реакций, однако рассматриваемый методический подход количественно определить указанную вероятность не позволяет. Рассмотренные обстоятельства послужили причиной того, что итоговые параметры при оценке экспозиции с применением референтных доз и референтных концентраций принято обозначать как *коэффициенты опасности* и *индексы опасности*, причем термин «опасность» в данном контексте указывает на отличия от традиционных представлений о риске как о *количественной мере вероятности* возникновения определенного негативного эффекта (рис. 12).



Рис. 12. Процессы разработки оптимизационных мероприятий на основе референтных уровней параметров зависимости «доза – ответ» (RfD)

Если нет превышения референтной дозы, то проведение оптимизационных мероприятий не показано. В противном случае формируется опасность с величиной, которую оценивают с применением зависимости «доза – ответ» и с учетом спектра вредных эффектов. Если процедура управления риском ориентирована на зависимости «доза – ответ», то возникает необходимость использования величины приемлемого риска с последующим определением такого уровня регулирования экспозиции, в условиях которого формирующийся риск не будет выше приемлемого уровня – *уровня минимального риска* или дозы/концентрации, базирующейся на риске.

Параметры зависимости «доза (концентрация) – ответ», полученные в исследованиях эпидемиологического типа. При осуществлении оценки зависимости «доза (концентрация) – ответ» максимально приоритетны данные, полученные при проведении специальных исследований эпидемиологического и клинического типов. Наиболее информативным при определении параметров риска эпидемиологическим методом являются когортные исследования, в рамках которых дифферен-

цируют четыре варианта оценки вредного эффекта – *добавочный* (или *атрибутивный*), *относительный* и *добавочный популяционный риск*, а также *добавочная доля популяционного риска*. При построении моделей «доза (концентрация) – ответ» наиболее часто используются показатели относительного риска или «отношения шансов».

Относительный риск (RR) соответствует отношению риска возникновения вредного эффекта (заболевания, смерти или другого) у людей, находившихся под воздействием исследуемого фактора риска, к риску такого же эффекта среди лиц, данному воздействию не подвергавшихся (рис. 13).

Экспозиция	Есть заболевание	Нет заболевания	Сумма
Есть экспозиция	a	b	a + b
Нет экспозиции	c	d	c + d
Сумма	a + c	b + d	n

Рис. 13. Четырехпольная таблица для определения показателей эпидемиологического риска

Относительный риск вычисляется по формуле

$$RR = [a / (a + b)] / [c / (c + d)] ,$$

где $a / (a + b)$ представляет собой частоту негативных эффектов в группе с экспозицией; $c / (c + d)$ – частоту негативных эффектов в группе без экспозиции. В исследованиях «случай – контроль» для характеристики относительного риска применяется показатель, именуемый «*отношением шансов*», для расчета которого применяется формула

$$OR = (a / b) / (c / d) .$$

Если значение относительного риска равно или близко к единице, то это свидетельствует об отсутствии влияния изучаемого фактора риска на возникновение патологии. Чем больше показатель относительного риска превышает единицу, тем более выраженное воздействие рассматриваемый фактор оказывает на риск появления нарушений в состоянии здоровья населения. Если величина относительного риска достоверно меньше единицы, то изучаемый фактор обеспечивает протективный (защитный) эффект.

Атрибутивный риск (AR) рассчитывается как частота негативных эффектов среди людей, подвергавшихся воздействию фактора риска, минус частота негативных эффектов у лиц, такому воздействию не подвергавшихся:

$$AR = \{ [a / (a + b)] - [c / (c + d)] \} \times 100 .$$

Атрибутивный риск выражается в процентах (%) и отражает долю риска, обусловленного воздействием изучаемых факторов окружающей среды. Иными словами, атрибутивный риск соответствует связанной с фактором риска вероятности развития негативного эффекта в состоянии здоровья населения, выраженной в проценте от общего числа аналогичных эффектов, регистрируемых на изучаемой территории. При принятии допущения, что фоновая (исходная) частота негативных эффектов детерминирована иными причинами, то добавочный риск представляет собой дополнительные случаи негативных эффектов, обусловленные воздействием изучаемого фактора риска.

К безусловным достоинствам показателей эпидемиологического риска относится допустимость оценок риска в значительном диапазоне (спектре) нарушений в состоянии здоровья населения.

Полученные в исследованиях эпидемиологического типа параметры, применяемые для исчисления риска, могут быть также представлены в виде показателя единичного эпидемиологического риска – дополнительного риска при возрастании концентрации поллютанта на 1 мкг/м³.

Параметры для оценки риска, основанные на величине порога вредного действия. Оценка риска возникновения неканцерогенных эффектов базируется на представлениях о существовании порогов вредного воздействия, без превышения которых нарушения в состоянии здоровья населения никогда не происходят. При отсутствии достоверных эпидемиологических критериев характеристика риска развития неканцерогенных эффектов предусматривает сопоставление воздействующих доз или концентраций со значениями пороговых (NOAEL) или безопасных уровней воздействия. Уровнем безопасного хронического воздействия является такое поступление химического поллютанта в организм, которое не приведет к возникновению негативных изменений в состоя-

нии здоровья, в том числе отдаленных последствий у самого индивидуума и нарушений здоровья у его потомства. К применяемым вариантам уровней безопасного хронического воздействия относятся:

- референтные дозы и концентрации (RfD, RfC);
- допустимое суточное поступление (ADI);
- переносимое суточное поступление (TDI);
- руководящий уровень (GV);
- рекомендуемые показатели допустимого воздействия на здоровье (HA);
- прогнозируемый неэффективный уровень для человека (PNEL);
- уровень минимального риска (MRL);
- рекомендуемый уровень воздействия (REL) и другие.

Все перечисленные варианты по содержанию эквиваленты, они отражают суточное поступление определенного химического соединения на протяжении всей жизни индивидуума, которое определяется на основе суммы современных научных данных и, с высокой степенью вероятности, не способно привести к формированию неприемлемого (ощутимого, значимого) риска для состояния здоровья чувствительных контингентов населения.

Безопасный для здоровья людей уровень хронического воздействия химических соединений рассчитывается путем деления *уровня воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект (NOAEL)*, на значение фактора неопределенности (*UF*), умноженного на величину модифицирующего фактора (*MF*). В случае отсутствия данных о значении *NOAEL* при определении безопасного уровня применяется наименьший уровень воздействия, при котором наблюдается вредный эффект (*LOAEL*) с расчетом по формуле (рис. 14):

$$RfC (RfD) = NOAEL (LOAEL) / (UF \times MF) .$$

Значение *коэффициента неопределенности (UF)* определяется на основе анализа вероятного воздействия на достоверность оценки безопасного уровня многочисленных факторов, он отражает уровень соответствия анализируемого исследования тем «идеальным» регламентам, которые предъявляются к безопасному уровню воздействия загрязните-

ля на людей. Чем меньше величина коэффициента неопределенности, тем ближе к «идеалу» обстоятельства определения безопасного уровня.

Зависимость "доза-ответ"

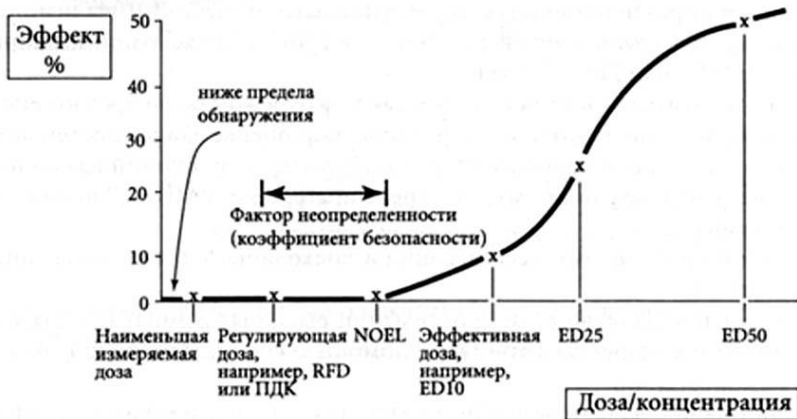


Рис. 14. Установление референтного уровня воздействия на основе пороговой или недействующей дозы

От величины *модифицирующего фактора (MF)*, зависящей от профессиональной оценки репрезентативности и статистической значимости доступных для анализа токсикологических сведений, проведенных поддерживающих и дополняющих исследований. Значение модифицирующего фактора может варьировать в пределах от 1 до 10, но в большинстве случаев оно приравнивается к 1.

Особенностью процедуры обоснования референтных (безопасных) уровней воздействия на основе максимальных недействующих и пороговых доз и концентраций является значительное количество неопределенностей. Так, величины *LOAEL* и *NOAEL* зависят от диапазона между испытываемыми дозами или концентрациями, от количества задействованных в экспериментах подопытных лабораторных животных, от критериев выявления неблагоприятных эффектов реакций и других параметров. Доказано, что на уровне, соответствующем установленному значению *NOAEL*, исследуемая реакция может выявляться у 5–10 % экспонированных особей, а на уровне *LOAEL* аналогичный эффект иногда

обнаруживается у 90–95 % подопытных животных. При этом фактически не учитывается сам характер зависимости «доза – ответ», а ее анализ ограничивается проверкой наличия или отсутствия статистически значимых различий между групповыми величинами учитываемого показателя для животных с различными уровнями экспозиции (например, *NOAEL* и *LOAEL* или *FEL* и *LOAEL*). Из числа методических подходов к вероятностной оценке зависимостей «доза – ответ» в настоящее время наиболее разработанным является *метод установления реперных (опорных) доз (BMD)*, который предусматривает:

- определение критического исследования и удобного для аналитических исследований типа изучаемого ответа;
- обеспечение наилучшей аппроксимации фактических сведений о дозах и соответствующих им ответах (эффектах) с применением специально подобранной адекватной математической модели;
- построение оптимальной модели, отражающей зависимость эффекта (ответа) от уровней воздействия;
- выбор реперного (опорного) ответа (ВМЕ), который характеризует степень отличий эффектов, регистрируемых в опытной и контрольной группах;
- исчисление 95 %-ной верхней доверительной границы для выбранного опорного уровня риска (ВМЕ) и дозы, соответствующей данной величине – собственно процедура расчета BMD или реперной концентрации (BC).

При определении величин референтных доз может применяться экстраполяция имеющихся сведений на область вне исследованного диапазона доз либо обладающую иными качественными и/или количественными параметрами. Используется пять вариантов экстраполяции:

- с высокой дозы на более низкую (например, с *LOAEL* на *NOAEL*) – **L**;
- сведений, полученных на подопытных животных, на условия воздействия на людей (межвидовая экстраполяция) – **A**;
- одного пути поступления вещества на другой;
- условий относительно кратковременного воздействия на длительную экспозицию – **S**;

▪ одной популяции людей на другую, отличающуюся по параметрам восприимчивости к воздействию изучаемого химического соединения (внутривидовая экстраполяция) – **Н**.

При этом итоговое значение фактора неопределенности определяется путем перемножения отобранных величин каждого из компонентов данного фактора:

$$UF = A \times H \times S \times L.$$

При отсутствии необходимости осуществления экстраполяций итоговое значение коэффициента неопределенности приравнивается к 1, что соответствует высокой надежности данных о значении NOAEL, доказанной на основе изучения состояния здоровья максимально чувствительного к данному загрязнителю контингента населения.

Межвидовая экстраполяция. Наблюдаемая существенная вариабельность чувствительности к воздействию химических веществ связана также с анатомическими, физиологическими и метаболическими различиями между представителями разных биологических видов, включая подопытных лабораторных животных и человека. Это обстоятельство обуславливает необходимость прибегать к межвидовой экстраполяции с учетом обязательности: во-первых, определения *эквивалентной дозы (концентрации) для человека* (соответственно *HED* или *HEC*) и, во-вторых, учета возможности более высокой чувствительности к изучаемому химическому соединению человека, чем подопытных лабораторных животных. Определение эквивалентной дозы (концентрации) для человека наиболее актуально в случае изучения воздействия химического вещества ингаляционным путем, так как если в данном случае фактическая его концентрация приведена к эквивалентной концентрации для человека (*HEC*), то автоматически отпадает необходимость применения **компонента А** фактора неопределенности, который связан с межвидовыми различиями. Современные схемы расчета *HEC* базируются на учете физико-химических свойств соединения, включая его химическую активность, растворимость в воде, агрегатное состояние в воздухе, а также места его воздействия (респираторные и системные эффекты).

Различия между непрерывным и прерывистым воздействием. При экстраполяции сведений об особенностях прерывистых воздей-

ствий химических соединений на условия их непрерывной экспозиции в методологии оценки риска обычно используется приведение реальных условий воздействия к *стандартной ежедневной экспозиции*.

Внутривидовая экстраполяция. Вариабельность чувствительности отдельных представителей человеческой популяции к воздействию химических соединений связана с многочисленными факторами, такими как: генетические различия, возраст, пол, состояние здоровья и другие. Результаты экспериментальных исследований на лабораторных животных и полученные на человеке клинико-эпидемиологические данные свидетельствуют о возможности и целесообразности в случае отсутствия соответствующих данных использовать при проведении внутривидовой экстраполяции стандартный максимальный коэффициент неопределенности (**H**) на уровне 10. При применении сведений производственных исследований, проведенных на относительно устойчивых контингентах людей, для перехода к наиболее чувствительным контингентам фактор неопределенности может быть увеличен (до 40 и более).

Экстраполяция с LOAEL на NOAEL. Более чем 90 % случаев коэффициент неопределенности, равный 10, позволяет с достаточной степенью надежности переходить от известной величины пороговой дозы (концентрации) к максимальному недействующему уровню. Именно поэтому максимальная величина компонента фактора неопределенности (**L**) приравнивается к 10 для экстраполяции с величины *LOAEL* на предполагаемое значение *NOAEL*.

Экстраполяция с условий относительно непродолжительного воздействия на продолжительную экспозицию. Значительное число отечественных регламентов и зарубежных референтных (безопасных) уровней воздействия установлены на основе сведений, полученных в условиях подострых экспериментов, тогда как обоснование уровней минимального риска должно базироваться преимущественно на результатах хронического круглосуточного эксперимента. При экстраполяции данных с условий подострого воздействия на условия хронической экспозиции рекомендуется применять корректирующий коэффициент со значением до 10 с учетом продолжительности эксперимента. Так, если период воздействия составляет более 12 % продолжительности жизни экспонируемого организма, рекомендуется использовать коэффициент,

равный 1, при продолжительности воздействия в диапазоне от 8 до 12 % он приравняется к 3, при продолжительности воздействия менее 8 % – к 10. Данный подход рекомендуется для определения компонента фактора неопределенности, связанного с временной экстраполяцией (S).

Экстраполяция с одного пути поступления на другой путь.

При проведении анализа зависимости «доза – ответ» часто бывают доступны токсикометрические данные либо только для перорального пути поступления поллютанта, либо только для ингаляционного воздействия. Это определяет необходимость экстраполяции имеющихся сведений для какого-то одного пути поступления на другой, что принципиально невозможно, если химическое соединение оказывает локальное вредное воздействие непосредственно в месте своего проникновения в организм. Для соединений с общерезорбтивным типом воздействия кратность различий в значениях коэффициентов абсорбции в пищеварительной (ABS_o) и дыхательной (ABS_i) системах обычно не превышает 10. Таким образом, экстраполяция данных с одного пути воздействия на другой показана только для химических соединений, обладающих общерезорбтивным действием при отсутствии выраженных различий в их токсикокинетике при разных путях воздействия. Так, эквивалентная концентрация в случае ингаляционного воздействия (RfC , мг/м³) рассчитывается исходя из известной величины RfD (в мг/кг) по формуле

$$RfC = RfD \times (70 / 20),$$

где 70 – стандартная масса тела человека, кг; 20 – стандартная величина легочной вентиляции, м³/сутки.

На основе результатов токсикокинетического моделирования величина фактора неопределенности (поправочного коэффициента) при экстраполяции данных с перорального пути поступления на ингаляционный должна составлять для летучих химических соединений около 3 раз, для малолетучих – 1–3 раза.

В случае с химическими канцерогенами экстраполяция данных с одного пути поступления на другой осуществляется по формуле

$$UR_i = (SF_o / 70) \times 20 ,$$

где UR_i – единичный риск при ингаляционном воздействии, (мг/м³)⁻¹; SF_o – фактор канцерогенного потенциала при пероральном введении,

$(\text{мг/кг})^{-1}$; 70 – стандартная масса тела человека, кг; 20 – стандартная величина легочной вентиляции, $\text{м}^3/\text{сутки}$.

Принципиально важным является то, что для химических канцерогенов дополнительные факторы неопределенности, связанные с экстраполяцией, не вводятся.

Для осуществления экстраполяции величин RfD или SF с перорального пути поступления на вариант кожного воздействия соответствующие значения могут быть пересчитаны с применением *коэффициентов всасывания в желудочно-кишечном тракте (GIABS)* на значения поглощенных доз. Затем оценка риска неблагоприятных эффектов в случае кожного пути поступления осуществляется путем сопоставления воздействующей и референтной поглощенных доз. Формулы для определения поглощенной референтной дозы и фактора канцерогенного потенциала следующие:

$$\begin{aligned} RfDd &= RfDo \times GIABS, \\ SFd &= SFo / GIABS, \end{aligned}$$

где $RfDd$ и SFd – соответственно референтная (безопасная) доза и фактор канцерогенного потенциала в случае кожного поступления; $GIABS$ – коэффициент всасывания в желудочно-кишечном тракте (в долях единицы); $RfDo$ и SFo – соответственно референтная (безопасная) доза и фактор канцерогенного потенциала при пероральном поступлении.

Характеристика степени полноты доступных сведений. Для характеристики исчерпывающей суммы вероятных неблагоприятных эффектов воздействия химического соединения на организм может применяться компонент фактора неопределенности, учитывающий полноту имеющихся данных и качество результатов экспериментальных исследований, со значением в диапазоне от 1 до 10. Критериями при оценке полноты информации служат: достаточная численность экспериментальных групп; наличие данных о воздействии соединения на разные биологические виды лабораторных животных; наличие сведений о влиянии соединения на развитие и его репродуктивной токсичности; пути и способы попадания в организм; точность данных о величине воздействующей концентрации.

Обоснование и применение референтных уровней воздействия. В настоящее время накоплен существенный объем сведений о токсических эффектах и безопасных уровнях воздействия для сотен химических веществ, в том числе базы данных о референтных дозах (RfD) и концентрациях (RfC), а также исходные сведения по их обоснованию для большого числа химических веществ. В приложениях к актуальным руководствам по оценке риска здоровью приводятся соответствующие перечни веществ с идентификационными номерами CAS, значениями российских гигиенических регламентов содержания поллютантов в объектах окружающей среды, а также рекомендуемые референтные дозы и концентрации и критические эффекты и / или органы, по которым данный уровень был обоснован.

Канцерогенные эффекты. Сегодня канцерогенез рассматривается как многостадийный процесс, объединяющий три последовательные стадии – *инициацию* (мутации в клетке), *промоцию* (реорганизация мутировавших клеток в опухолевые) и *прогрессию* (приобретение свойств злокачественности). Механизм канцерогенеза может быть обусловлен как прямым (*генотоксические канцерогены*), так и опосредованным (*эпигенетические канцерогены*) повреждением генома. При этом для воздействия генотоксических канцерогенов подразумевается отсутствие порога канцерогенного действия. Для негенотоксических канцерогенов, напротив, допускается существование порога вредного действия, без превышения которого риск канцерогенеза не возникает. Отсутствие или наличие порога для любой из стадий канцерогенеза не всегда определяет пороговость других его стадий. Оценка зависимости «доза – ответ» у генотоксических канцерогенов с беспороговым механизмом действия производится методом линейной экстраполяции наблюдаемых в реальных экспериментальных или эпидемиологических исследованиях зависимостей в область малых доз и нулевого канцерогенного риска (рис. 15).

Основным параметром для оценки канцерогенного риска воздействия соединения с беспороговым механизмом действия является *фактор канцерогенного потенциала (CPF)* или *фактор наклона (SF)*, который отражает степень нарастания риска канцерогенеза с увеличением воздействующей дозы на одну единицу. Фактор наклона имеет размер-

ность $(\text{мг/кг} \times \text{день})^{-1}$ и соответствует верхней, консервативной оценке канцерогенного риска за ожидаемую продолжительность жизни человека (70 лет). Значения фактора наклона устанавливаются отдельно для ингаляционного (SFi) и перорального (SFo) путей поступления химических канцерогенов.



Рис. 15. Зависимость «доза – ответ» для генотоксического канцерогена

Еще одним параметром для оценки риска канцерогенеза служит *единичный риск (UR)*, соответствующий верхней, консервативной оценке канцерогенного риска у человека, подвергающегося на протяжении всей своей жизни постоянному воздействию изучаемого канцерогенного соединения в концентрации 1 мкг/м^3 (атмосферный воздух) или 1 мкг/л (питьевая вода). В основу расчета единичного риска положены величины SF и стандартные значения массы тела человека (70 кг), суточного потребления воздуха (20 м^3) и питьевой воды (2 л):

$$URi [\text{м}^3/\text{мг}] = SFi [(\text{кг} \times \text{сут.})/(\text{мг})] \times 1 / 70 [\text{кг}] \times 20 [\text{м}^3/\text{сут.}] ,$$

$$URo [\text{мг/л}] = SFo [(\text{кг} \times \text{сут.})/(\text{мг})] \times 1 / 70 [\text{кг}] \times 2 [\text{л}/\text{сут.}] .$$

Доступны только единичные значения SF для кожного пути поступления химических соединений. Поэтому величина SF для кожного воздействия определяется на основе значений коэффициента абсорбции в желудочно-кишечном тракте (GIABS) и величины SFo при пероральном поступлении химического канцерогена. В основу такого подхода

положен расчет абсорбированной дозы и гипотеза о биологической эквивалентности абсорбированных доз при перкутанном и пероральном путях поступления канцерогена в организм. Исходя из этого определение значения фактора наклона при накожном воздействии (SFd) производится по формуле

$$SFd = SF_0 / GIABS .$$

Оценка риска воздействия химических канцерогенов, обладающих пороговым механизмом действия, производится аналогично оценке риска от неканцерогенных агентов. Рассчитанное значение референтного (безопасного) уровня воздействия по канцерогенному эффекту в последующем применяется при определении *коэффициента опасности*:

$$HQ = LADD / RfD ,$$

где HQ – искомый индекс опасности, $LADD$ – среднесуточная доза за период усреднения экспозиции (70 лет), RfD – референтная доза.

Анализ неопределенностей. Приоритетными источниками неопределенностей, способных проявить себя на этапе оценки зависимости «доза/концентрация – ответ», являются:

- неопределенности, связанные с определением референтного (безопасного) уровня воздействия;
- неопределенности, обусловленные переносом результатов исследований эпидемиологического типа на изучаемую экспонируемую популяцию;
- неопределенности, связанные с установлением степени доказанности канцерогенного эффекта у человека;
- неопределенности при определении фактора канцерогенного потенциала (SF);
- неопределенности в определении критических органов или систем органов, вредных эффектов;
- неопределенности, связанные с отсутствием сведений о механизмах взаимодействия компонентов смесей химических веществ или особенностей токсикокинетики и токсикодинамики при различных путях поступления вредного соединения в организм, а также при одновременном его поступлении разными путями (одно из наиболее слабых звеньев

как методологии оценки риска, так и отечественной системы гигиенического нормирования).

На современном этапе признается целесообразным при оценке рисков для здоровья, обусловленных воздействием химических веществ, загрязняющих окружающую среду, ориентироваться на систему критериев приемлемости, рекомендованную ВОЗ (табл. 5).

Таблица 5

Классификация уровней риска

Уровень риска	Индивидуальный пожизненный риск
<i>Высокий (De Manifestis)</i> – не приемлем для производственных условий и населения. Показано осуществление мероприятий по устранению или снижению риска.	более 10^{-3}
<i>Средний</i> – допустим для производственных условий; при воздействии на все население необходимы динамический контроль и углубленное изучение источников и возможных последствий неблагоприятных воздействий для решения вопроса о мерах по управлению риском	$10^{-3} - 10^{-4}$
<i>Низкий</i> – допустимый риск (уровень, на котором, как правило, устанавливаются гигиенические нормативы для населения)	$10^{-4} - 10^{-6}$
<i>Минимальный (De minimis)</i> – желательная (целевая) величина риска при проведении оздоровительных и природоохранных мероприятий	менее 10^{-6}

Аддитивный вариант совместного действия характерен для многих групп структурно близких соединений, влияющих на одни и те же органы и системы. Аддитивность отмечена также при воздействии доз и концентраций некоторых химических веществ (аспирин, кадмий, олово хлорид, формальдегид и дихлорметан) на уровне недействующих (NAEL) и даже их долей. При различных механизмах действия и воздействии компонентов смесей на разные органы и системы органов аддитивность крайне маловероятна и при оценке кумулятивного риска рекомендуется применять модель независимого действия. Вариант совместного действия часто зави-

сит от критических органов или систем органов. Так, совместное воздействие бензола и толуола проявляется, с одной стороны, в ослаблении лейкомогенного эффекта бензола, а с другой стороны – в аддитивном воздействии обоих соединений на центральную нервную систему. Основными критериями при оценке кумулятивного риска, обусловленного одновременным поступлением в организм нескольких химических веществ различными путями целесообразно применять индексы опасности, запас экспозиции и коэффициенты эквивалентной токсичности. При характеристике суммарного канцерогенного риска оптимальна модель независимого действия с суммацией канцерогенных эффектов всех канцерогенных компонентов смеси [9, 10, 12, 13, 14].

3.4. Оценка экспозиции

Под **экспозицией (воздействием)** в процедуре оценки риска подразумевается контакт организма, играющего роль рецептора, с каким-либо агентом химической, физической или биологической природы. Значение экспозиции представляет собой количество агента в определенном объекте окружающей среды, замеренное или рассчитанное, на протяжении точно установленного временного периода взаимодействия с пограничными органами и системами органов человека – дыхательной системой, желудочно-кишечным трактом, кожей, слизистыми. Экспозиция рассматривается:

- как суммарное количество химического соединения в окружающей среде в единицах массы (например, мг);
- как уровень воздействия, характеризуемый массой загрязнителя, соотнесенного с единицей времени (например, мг/день);
- как уровень воздействия, нормализованный по массе тела (например, мг/кг×день).

Оценка экспозиции как *третий этап процедуры оценки риска* предусматривает количественное определение поступления загрязнителя в организм экспонируемого человека в случае контакта с объектами окружающей среды – атмосферным воздухом, водой, почвой и продуктами питания. Методологический базис оценки экспозиции представ-

лен сочетанием непосредственных (прямых) и косвенных (непрямых) методов исследования, включая такие как: лабораторные исследования объектов окружающей среды, персональный мониторинг поллютантов с определением их концентраций в зоне дыхания людей, применение биологических маркеров, анкетирование, ведение суточных дневников и построение математических моделей. Основная цель этапа оценки экспозиции состоит в максимально точном определении реальных уровней воздействия факторов риска на организм человека. В рамках оценки экспозиции предусматривается применительно к спектру источников и последствий загрязнения окружающей среды (рис. 16):

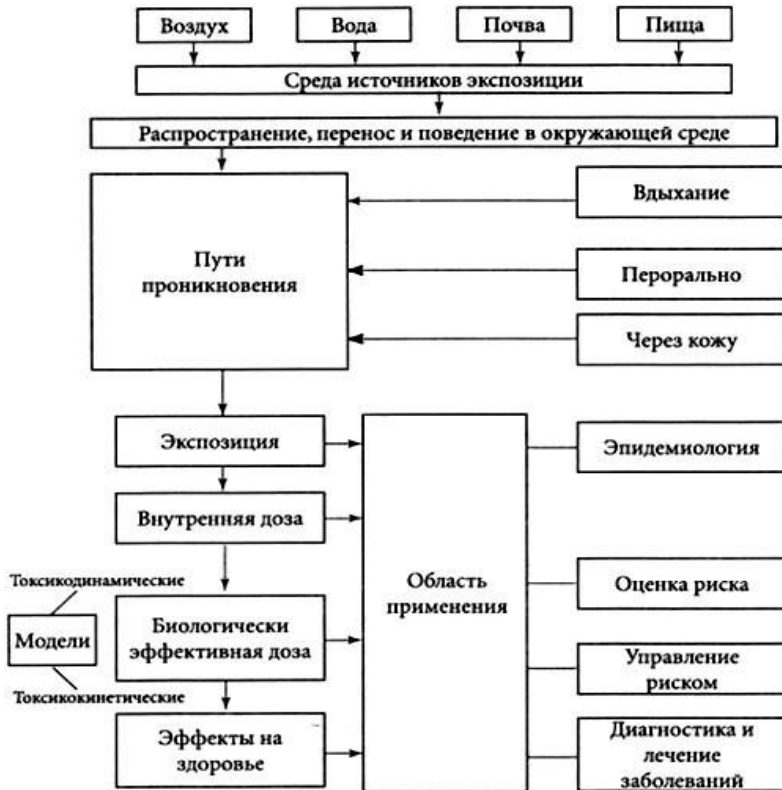


Рис. 16. Спектр источников и последствий загрязнения окружающей среды

- уточнение потенциальных источников загрязнения окружающей среды, анализ механизмов образования и трансформаций поллютантов;
- окончательное определение времени, частоты, продолжительности и сценария воздействия, включая маршруты миграции поллютанта от места его образования до точки воздействия на популяцию и пути поступления в организм человека;
- определение количественных характеристик экспозиции – концентраций и доз поллютантов;
- анализ доступных результатов лабораторных исследований, в том числе о концентрациях поллютантов во всех объектах окружающей среды в пределах изучаемой точки (континуума) воздействия;
- идентификация экспонируемых контингентов населения с учетом их численности, возраста, пола, образа жизни, профессионального и социального статуса;
- характеристика природы и механизмов воздействия, размеров и особенностей экспонируемых контингентов населения с выделением «групп риска».

Вариантами воздействия (экспозиции) являются:

- *острое воздействие* при его продолжительности менее 2 недель;
- *подострое воздействие* при его продолжительности до 7 лет;
- *хроническое воздействие* при его продолжительности более 7 лет.

Подразумевается, что влияние поллютантов, которые находятся в любых объектах окружающей среды, способно реализоваться посредством контакта с любым пограничным барьером организма человека в любое время и в любом месте, а его уровень может варьировать в значительном диапазоне. Тем не менее, например, при управлении качеством атмосферного воздуха до настоящего времени обычно ограничиваются лишь сценарием 24-часовой экспозиции, может также дополнительно учитываться 8-часовая экспозиция во время пребывания на рабочем месте. Для более полной оценки экспозиции при ингаляционном воздействии содержащихся в атмосферном воздухе поллютантов, предложена модель трехмерного объемного пространства – микроокружения (микросреды) в пределах которого концентрация загрязнителя относительно постоянна на протяжении определенного временного периода (например, помещение в жилом или общественном здании).

Количественное определение параметров экспозиции входит как составная часть и в оценку риска, и в управление риском, так как оно подразумевает:

- дифференциацию концентраций в пространственно-временном континууме, в различных объектах окружающей среды;
- выделение популяций и субпопуляций населения с разностепенным риском;
- определение приоритетных максимально эффективных и рентабельных оптимизационных мероприятий по минимизации риска;
- учет долевого участия отдельных источников загрязнителей в суммарном уровне вредного воздействия;
- выявление факторов риска, способствующих проникновению поллютантов в объекты окружающей среды, путей их миграции и поступления в организм человека;
- оценка соответствия реализованных оптимизационных мероприятий задачам обеспечения соблюдения гигиенических регламентов.

Типичный вариант оценки экспозиции включает в себя три этапа (рис. 17):

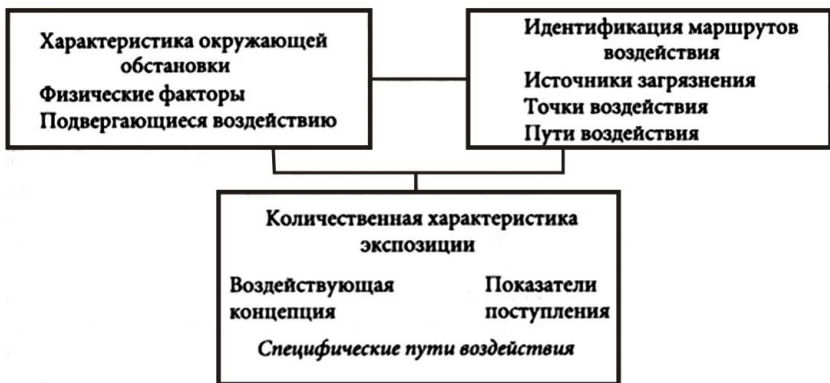


Рис. 17. Основные этапы оценки экспозиции

1. характеристика ситуации с аналитическими исследованиями основных параметров изучаемой территории и контингентов людей, потенциально подверженных воздействию загрязнителей;

2. *идентификация маршрутов воздействия*, источников загрязнения объектов окружающей среды, путей миграции химических соединений и точек их воздействия на население;

3. *количественная характеристика экспозиции* с определением величин, частот и продолжительности воздействий для каждого из идентифицированных на втором этапе маршрутов воздействия. Данный этап обычно объединяет две стадии – количественную оценку воздействующих концентраций поллютанта и расчет поступления.

Характеристика ситуации (окружающей обстановки) включает доскональное описание *физической среды* и детализированной в ретроспективе характеристики изучаемой территории. Учитываются и анализируются доступные сведения о топографии, гидрогеологии, флоре и фауне, используемых и резервных земельных ресурсах, селитебных зонах, специфике хозяйственной деятельности (промышленной, транспортной, сельскохозяйственной и другой). Характеристика физической среды предусматривает расширенный анализ параметров и особенностей климата, метеоусловий, геологического строения, растительности; типа почвы, подземных водных источников и поверхностных водоемов. Итогом выполненных аналитических исследований является предварительное заключение о потенциальных путях вредного воздействия, включая все взаимодействующие объекты окружающей среды – почву, подземные и поверхностные воды, осадки, воздушную среду, биоту, а также междоусредовые миграции поллютантов.

Население, потенциально подверженное воздействию. Должны быть проведены аналитические исследования в отношении контингентов населения изучаемой и сопредельных с ней территорий с учетом пространственной локализации и расстояний относительно источников загрязнений, вида выполняемой деятельности, наличия особо чувствительных подгрупп. Необходимо охватить все популяции населения, находящиеся под воздействием изучаемых факторов риска, включая людей, проживающих на расстоянии от источника поллютантов (например, при потреблении загрязненной водопроводной воды или продуктов питания, которые были выращены на загрязненной почве). Необходим также учет населения, которое потенциально может подвергаться воздействию в перспективе, например, при миграции поллютантов за пределы загрязненной

территории. Наиболее типичными территориями в зависимости от вида деятельности людей являются жилая (селитебная), производственная (коммерческая) и рекреационная, а также сельскохозяйственная зоны. Возможен также смешанный вариант землепользования.

Типовая схема оценки деятельности населения включает:

- измерение времени, которое потенциально экспонируемая популяция населения пребывает в пределах загрязненной зоны. Ежедневный период экспозиции в случае отнесения популяции к сценарию селитебной зоны составляет 24 часа, к производственному сценарию воздействия – 8 часов (продолжительность типичного рабочего дня);

- измерение времени, которое представители потенциально экспонируемой популяции населения проводят в пределах помещений, на открытой территории, в транспортных средствах и других локациях с учетом специфики их деятельности в течение суток. Так, для большинства служащих типичным является пребывание в офисе на протяжении всего рабочего дня, а для представителей строительных профессий – на открытой местности;

- уточнение сезонных особенностей деятельности изучаемых контингентов населения;

- оценка вероятности как постоянного, так и временного пребывания людей на загрязненной территории;

- выявление всех характерных для изучаемой территории параметров контингентов населения, способных повлиять на экспозицию.

В случае, если сведения о региональных особенностях исследуемых контингентов населения и избранных сценариев воздействия недоступны, то «по умолчанию» могут использоваться стандартные дескрипторы экспозиции. Обязательным на данном этапе является идентификация тех субпопуляций, для которых свойственен повышенный риск от воздействия химических соединений из-за недостаточной резистентности, специфики жизнедеятельности или негативных воздействий от иных источников в прошлом (например, новорожденные и дети, пожилые, беременные и кормящие женщины, лица, ранее контактировавшие с химическими соединениями на производстве).

Пути распространения химических веществ в окружающей среде и их воздействие на человека. Маршрут воздействия, представ-

ляющий собой траекторию миграции химического соединения от источника загрязнения до экспонируемого контингента населения, должен быть представлен в любом сценарии экспозиции. Целью анализа маршрута воздействия является идентификация взаимоотношений между особенностями источников загрязнений, их пространственной локализацией, специфическими путями и механизмами попадания химических веществ в объекты окружающей среды с одной стороны, и местонахождением экспонируемых контингентов людей, и их жизнедеятельностью – с другой. При расположении точки воздействия вдалеке от источника загрязнения в маршрут воздействия включаются транспортная для реализации межсредовых переходов и воздействующая среды (например, химическое соединение вначале проникает из почвы в грунтовые воды, затем загрязненная грунтовая вода попадает в источник водоснабжения, а население вынуждено потребляет загрязненную питьевую воду). В алгоритме анализа маршрута воздействия сочетается оценка: во-первых, источников загрязнения; во-вторых, выбросов и/или сбросов поллютантов, их местонахождения; в-третьих, судьбы химических веществ в объектах окружающей среды с учетом их персистентности (процессы деградации, распределения, транспорта и межсредовых переходов); в-четвертых, местожительства и вариантов деятельности экспонируемых контингентов населения. В пределах маршрута воздействия устанавливаются точки воздействия (локации вероятного контакта людей с поллютантом) и пути поступления (пероральный, ингаляционный, накожный). Таким образом, к основным элементам исчерпывающего маршрута воздействия относятся:

- потенциальный источник и механизм поступления химического соединения в объекты окружающей среды;
- первично загрязняемая (воспринимающая), транспортирующая и воздействующая среды;
- местоположение вероятного контакта населения с загрязненными объектами окружающей среды (точка воздействия);
- реализация воздействия на экспонируемый контингент населения химического соединения при употреблении питьевой воды, продуктов питания, с атмосферным воздухом и через кожные покровы (путь поступления).

Основные источники поступления химических веществ в окружающую среду – это процессы получения, очищения, обработки, вывоза, хранения, транспортировки, случайного образования вещества в результате побочных реакций, а также естественные источники. Объект окружающей среды, ранее подвергшийся химическому загрязнению (так называемая *первично загрязняемая среда*), может стать источником загрязнения для других объектов окружающей среды (например, загрязненная почва способна сыграть роль источника поллютантов для подземных или поверхностных водоисточников).

Межередовое распределение. Попавший в объекты окружающей среды загрязнитель может вовлекаться в процессы:

- транспорта (миграции) в форме переноса химического соединения без изменений, включая переходы между объектами окружающей среды;
- физической трансформации (например, процессы испарения, осаждения, абсорбции и десорбции);
- химической трансформации (например, процессы фотолиза, гидролиза, окисления и восстановления);
- биологической трансформации (например, в форме биodeградации);
- аккумуляции (накопления) в одном или нескольких объектах окружающей среды, включая воспринимающую поллютант среду.

К многочисленным *факторам, определяющим поведение химического соединения в объектах окружающей среды*, относятся:

- специфика его поведения в атмосфере, гидросфере, почве и биологических средах;
- возможность биологической трансформации;
- способность абсорбироваться или оставаться на поверхности;
- особенности механизмов обмена и миграции в различных объектах окружающей среды;
- реакции при взаимодействии с другими компонентами окружающей среды;
- наличие, механизмы и факторы, влияющие на интенсивность переноса с участием посредников (промежуточного транспорта);

- продолжительность нахождения вещества в объектах окружающей среды и характер вариабельности его концентраций в динамике;
- продукты трансформации или деструкции химического соединения, которые могут образовываться в объектах окружающей среды, степень экологической и биологической опасности, а также особенности поведения их в объектах окружающей среды;
- возможность возникновения динамического равновесия концентрации в окружающей среде и в отдельных ее объектах;
- характер миграции поллютанта в окружающей среде и отдельных ее объектах.

Сценарий и маршруты воздействия. Маршрут воздействия, представляющий собой путь миграции химического соединения от точки проникновения в определенный объект окружающей среды до экспонируемого организма, включает: во-первых, *эмиссию (выделение)* загрязнителя из источника; во-вторых, *первично загрязняемые компоненты окружающей среды*; в-третьих, *механизм транспорта* в другое местоположение или в транспортирующие, аккумулирующие и трансформирующие среды; в-четвертых, *локации точек потенциального контакта (точек воздействия)* загрязнителя, находящегося в воздействующей среде (атмосферном воздухе, питьевой воде или другой), с организмом человека; в-пятых, *пути поступления поллютанта* из воздействующей среды в организмы людей – пероральный, ингаляционный или накожный. Существуют два варианта воздействия на организм человека – во-первых, *прямое* (например, при употреблении питьевой воды или вдыхании воздуха, загрязненных вредными химическими соединениями) и, во-вторых, *косвенное* (например, вдыхание атмосферного воздуха, содержащего пары загрязнителя, испарившегося из почвы). Так как вероятность сочетанного влияния химического соединения на определенный контингент населения одновременно всеми возможными путями крайне мала, считается целесообразным выделять из полного сценария ряд подсценариев для различных путей воздействия с определением уровня их приоритетности в *сценарии многосредового воздействия*. Тот путь воздействия, для которого свойственна максимальная вероятность и степень контакта химического загрязнителя с объектами окружающей среды или организмами людей, что обуславливает его кумуляцию в них,

носит название *принципиального (главного) пути воздействия*. Возможность исключения пути воздействия из процедуры оценки риска может определяться следующими обстоятельствами: во-первых, если реальная экспозиция в случае реализации данного пути воздействия существенно меньше, чем при иных путях, включающих аналогичные объекты окружающей среды и точки воздействия; во-вторых, потенциальный уровень экспозиции при реализации данного пути воздействия чрезвычайно низкий; в-третьих, крайне незначительная вероятность экспозиции и не высокий потенциальный риск при реализации рассматриваемого пути воздействия. Иными словами, характеристика полного пути воздействия включает в себя совокупность параметров экспонируемого контингента населения, все задействованные пути распространения химического загрязнителя, точки его воздействия и пути поступления в организм человека.

Мониторинг окружающей среды. На первом этапе количественной характеристики экспозиции осуществляется оценка воздействующих концентраций раздельно для всех идентифицированных ранее путей воздействия. Оценка воздействующих концентраций поллютантов преимущественно базируется на применении, во-первых, данных динамического наблюдения (мониторинга) за объектами окружающей среды; во-вторых, результатов моделирования распространения, поведения и судьбы химических соединений в объектах окружающей среды; в-третьих, комбинации сведений из первых двух датчиковых сред. Применение результатов мониторинга с целью характеристики воздействующих концентраций наиболее перспективно, во-первых, если экспозиция связана с непосредственным контактом людей с загрязненным объектом окружающей среды и, во-вторых, в тех случаях, когда динамическое наблюдение проводится напрямую в точках воздействия. В то же время использование данных мониторинга не позволяет получить адекватную оценку воздействующих концентраций в случаях: пространственной обособленности точек воздействия от точек динамического наблюдения при реализации межсредовых переходов или миграции поллютанта; отсутствия сведений в динамике за достаточно продолжительный отрезок времени; ограниченности доступных данных динамического наблюдения только результатами количественного определения химического соединения. В подобных случаях пока-

зано дополнение сведений мониторинга результатами моделирования. Оценки концентраций поллютантов в точках воздействия производятся с применением прямого и косвенного подходов к количественной характеристике экспозиции (рис. 18).

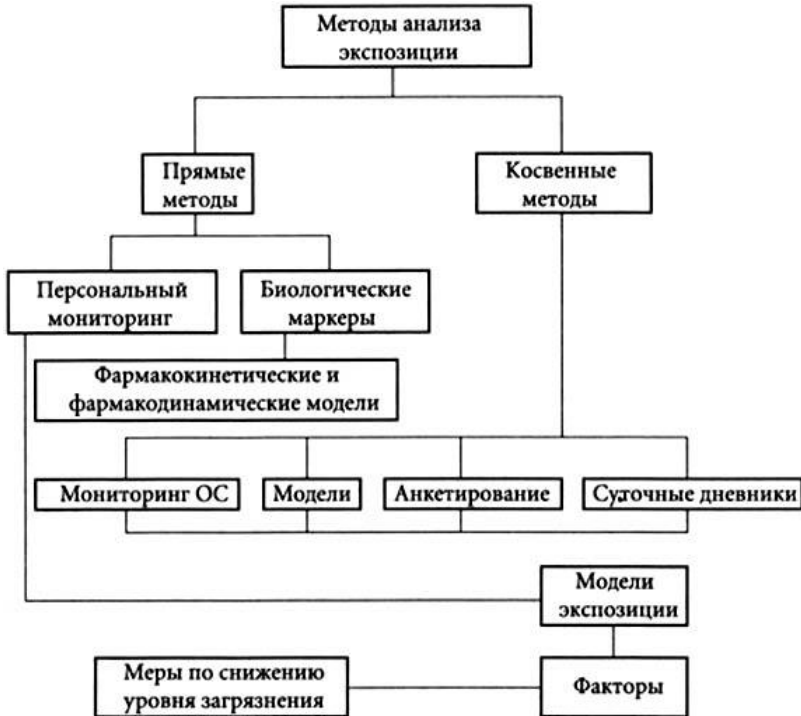


Рис. 18. Подходы к анализу воздействия атмосферных поллютантов

При характеристике концентраций загрязнителя в точках воздействия следует учитывать результаты исследования всех отобранных в исследуемой зоне проб, а в формируемом отчете о результатах оценки риска должны быть представлены расчеты концентраций во всех точках воздействия для всех вариантов сценариев и путей воздействия.

Моделирование распределения химических соединений в объектах окружающей среды. В связи с тем, что результаты лабораторных исследований обеспечивают получение объективных данных о

загрязнении объектов окружающей среды лишь в отношении части реально присутствующих поллютантов, причем эти данные «привязаны» к определенным постам наблюдения, количество которых обычно ограничено, возникают затруднения при проведении достоверной интерполяции доступной информации. В некоторой степени компенсировать это могут данные выборочного персонального мониторинга в сочетании с экспертными оценками, идентифицирующими вероятный источник загрязнения. Вынужденной мерой при оценке концентраций в точке воздействия в подобной ситуации является применение результатов моделирования (например, оценка концентрации поллютанта в пищевых продуктах или у домашних животных на основе моделей накопления и поглощения).

Существуют принципиальные различия между моделями уровней концентрации и экспозиции. В первом случае *модель уровней концентрации* представляет собой математическое выражение, построенное на базе физических и химических законов окружающей среды и позволяющее прогнозировать концентрацию изучаемого загрязнителя. Исходными данными при этом служат сведения о выбросах их различных источников, о рассеивании поллютанта в атмосфере, о процессах вентиляции, инфильтрации, переноса, осаждения и химии окружающей среды. Подобная модель оптимальна в случае наличия лимитированного объема сведений о концентрациях исследуемого химического соединения, типичными ее примерами являются модели рассеивания поллютантов или модели «источник загрязнения – рецептор». Хотя существующие расчетные методы обеспечивают построение моделей загрязнения объектов окружающей среды с количественными оценками для любых локаций в пределах исследуемого континуума точность расчетов ограничивается качеством исходных данных и адекватностью самой модели. К принципиально важным требованиям при выборе модели уровней концентрации относятся ее способность:

- рассчитывать не только максимальные показатели загрязнения, но и средние на требуемый период экспозиции;
- формировать и анализировать базы данных о метеорологической информации и результатах контроля концентраций загрязнителя в объектах окружающей среды;

- идентифицировать поля метеорологических параметров, в том числе трехмерных полей скорости ветра и характеристик турбулентности;
- рассчитывать миграцию химических загрязнителей от исследуемой совокупности источников (включая стационарные и подвижные);
- учитывать влияние особенностей жилой и промышленной застройки, специфики рельефа местности, пространственной локализации и масштабности источников загрязнений на процессы диффузии примесей;
- характеризовать доленое участие каждого из источников химического соединения в величинах концентрации для заданной точки пространства;
- решать задачи установления параметров выбросов и их источников по результатам наблюдений и в режиме реального времени определять репрезентативные точки наблюдения для организации оптимальных маршрутов передвижных лабораторий;
- оценивать интенсивность процесса седиментации поллютанта на подстилающую поверхность;
- производить климатические расчеты, формировать поля средних и фоновых концентраций загрязнителей для различных временных периодов, обеспечивать осуществление экологической экспертизы различных объектов;
- выделять зоны повышенного риска (контрастного загрязнения).

Модели экспозиции обеспечивают проспективный анализ характера экспозиции как для отдельного человека, так для контингента населения. Исходной информацией при этом служат сведения как о концентрации определенного загрязнителя в условиях вредного воздействия на отдельного человека или популяцию людей, так и о продолжительности такого воздействия. Иными словами, исходные сведения представлены особенностями жизнедеятельности человека с распределением ее проявлений во времени, а также концентрациями вредных химических соединений. Так, например, базовые уравнения для построения моделей экспозиции при воздействии загрязненного атмосферного воздуха с расчетом ее интегральной величины объединяют уровни концентраций загрязнителя в различных микросредах, умноженные на время, в течение которого человек находился в соответствующей микросреде. Оптимальными при расчете хронической экспозиции являются модели, позволя-

ющие оценивать среднегодовые концентрации загрязнителя и их доверительные границы; в случае острых воздействий рекомендуется моделирование максимальных концентраций и их 95-го перцентиля в пределах одного часа.

Индивидуальный (персональный) мониторинг обычно применяется при оценке экспозиции загрязнений атмосферы селитебных территорий и основывается на прямых измерениях концентрации загрязнителя в пределах зоны дыхания. При этом могут быть использованы переносные персональные пробоотборники (активные с подкачкой воздуха или пассивные без подкачки), обеспечивающие замеры повременных суммарных концентраций или сбор повременных суммарных проб для определения загрязнителей, воздействующих на человека в повседневной жизни. Если речь идет о питьевой воде или пищевых продуктах, прямые замеры будут представлять собой взятие соответствующих проб, если о перкутанной экспозиции – смывов с кожи.

Характеристика контактов контингентов населения с химическими веществами. Сочетание применения прямых и косвенных методов при расчетах параметров вредного воздействия загрязнителя атмосферы, как на отдельного человека, так и на контингент населения предусматривает формирование базы данных о его концентрации в микросредах, в том числе с применением персонального пробоотборника, а также сбор сведений об особенностях жизнедеятельности человека. Данные о жизнедеятельности людей получают на основе метода анкетирования или анализа суточных дневников добровольцев, специально отобранных для проведения исследования. С применением опросных методов собирается информация, характеризующая в частности:

- долю людей в популяции, применяющих газовые плиты на кухне, пестициды или проживающих вблизи от крупных автомагистралей;
- численность курящих и лиц, регулярно контактирующих с автомобильным топливом и пестицидами;
- продолжительность пребывания на открытом воздухе, в жилых и общественных помещениях, на транспорте, в присутствии курильщиков.

При изучении особенностей жизнедеятельности отдельного человека или контингентов населения производится:

- отбор респондентов с применением метода рандомизации из подобранного контингента;
- выбор варианта сбора информации (персональное интервьюирование, телефонный опрос, анкетирование или другой способ);
- формирование репрезентативной выборки, обеспечивающей проведение статистического анализа;
- обеспечение условий для высокой активности респондентов;
- выбор оптимальных методов исследования оценки воздействия – применение персональных мониторов и ведение дневников с фиксацией времени пребывания исследуемого в различных микросредах (прямой метод); только ведение дневников (непрямой метод) и анкетирование;
- разработка протоколов исследований (опросных листов) в доступном для респондентов виде;
- кодирование информации и формирование компьютерных баз данных;
- анализ собранной информации при проведении статистических исследований;
- обоснование статистически достоверных выводов и заключений на основе результатов аналитических исследований.

Применение опросных методов ориентировано на сбор максимально полных и объективных данных о пространственном и временном распространении изучаемых загрязнителей и о потенциально подверженной воздействию популяции населения.

Характеристика концентраций в точке воздействия.

○ В случае проведения *оценки риска по базовой (полной) схеме* применяются данные мониторинга концентраций химических соединений в изучаемых объектах окружающей среды и/или сведения, полученные с использованием моделирования рассеивания поллютантов за период не менее 3–5 лет. В качестве концентрации загрязнителя в точке воздействия обычно принимается *ее среднее арифметическое значение за весь период экспозиции.*

○ При осуществлении оценки риска, связанного с *хроническими воздействиями химических соединений*, используются *среднегодовые концентрации и их верхние 95 % доверительные границы*; в случае ост-

рых воздействий, в том числе аварийных ситуаций (с продолжительностью экспозиции, не превышающей одни сутки) – *максимальные концентрации и 95-й перцентиль*. Все указанные величины рассчитываются за период не менее 3 лет.

○ Для оценки канцерогенного риска, как правило, используются *среднегодовые концентрации*.

В зависимости от поставленной задачи исследования процедура оценки риска может быть ориентирована: 1) на *характеристику средней тенденции* (применяются средние концентрации поллютанта в изучаемых средах), 2) научно обоснованную (*разумную*) *максимальную экспозицию* (при этом ориентируются на верхние 95 % доверительные границы средних концентраций) или 3) *анализ максимального воздействия* (характеризуется на основе максимальных разовых концентраций за исследуемый период).

Экспозиция и доза. Экспозиция определяет параметры контакта организма человека с вредным химическим соединением. Общая экспозиция, соотнесенная с продолжительностью исследуемого временного периода, соответствует показателю *средней величины экспозиции на единицу времени*, обозначаемому как *поступление* (нормализованная величина экспозиции, введенная доза, приложенная доза, абсорбированная доза) после стандартизации по массе тела. Исчисление величины поступления подразумевает количественное определение экспозиции для каждого загрязнителя при возможных путях воздействия, выражаемое в единицах массы химического вещества, контактирующего с единицей массы тела человека (мг/кг·день). *Поступление химического соединения* рассчитывается с использованием формул, учитывающих: во-первых, воздействующие концентрации; во-вторых, величину контакта; в-третьих, частоту и продолжительность воздействий; в-четвертых, массу тела и, в-пятых, время осреднения экспозиции:

$$I = (C \times CR \times EF \times ED) / (BW \times AT) ,$$

где I – поступление (количество химического вещества на границе обмена, мг/кг×день); C – концентрация химического вещества (средняя концентрация, воздействующая в период экспозиции (мг/л, мг/м³ или мг/кг); CR – величина контакта (скорость поступления, количество загрязнен-

ной среды, контактирующее с телом в единицу времени или за один случай воздействия, например, л/день); EF – частота воздействий (число дней/год); ED – продолжительность воздействия (число лет); BW – масса тела (средняя масса тела в период экспозиции, кг); AT – время осреднения; период осреднения экспозиции (число дней).

Таким образом, в расчетах поступления применяются следующие варианты переменных: во-первых, переменные, сопряженные с химическим загрязнителем (воздействующие концентрации); во-вторых, переменные, характеризующие экспонируемую популяцию населения (степень контакта, частота и продолжительность воздействия, масса тела); в-третьих, переменные, назначаемые самим исследователем (время осреднения экспозиции).

Выбор времени осреднения экспозиции зависит от вида изучаемых токсических эффектов. Поступление исчисляется:

- *осреднением на единицу события* (на количество суток воздействия или на единичный случай экспозиции) – при изучении воздействия загрязнителей, влияющих на процессы развития;
- *осреднением на очень короткие промежутки времени, при которых возможны проявления негативного эффекта* (на одно воздействие или на сутки) – для химических соединений с острым действием;
- *осреднением в течение периода экспозиции* (субхроническое или хроническое ежедневное поступление) – при продолжительном воздействии неканцерогенных химических соединений;
- *делением общей накопленной дозы на продолжительность жизни* (хроническое ежедневное поступление, пожизненное среднесуточное поступление) – для генотоксических канцерогенов.

Уровень *поглощения* химического соединения соответствует его количеству, абсорбированному за единицу времени. При проведении оценки экспозиции в настоящее время основной частью исследователей применяется упрощенный подход без дифференциации *поступления* и *поглощения*, с рассмотрением количества поступающего в организм химического загрязнителя как поглощение.

✓ *Воздействующая (экспозиционная) доза*, соответствующая тому количеству химического соединения, которое достигло наружных гра-

ниц тела человека – кожных покровов, слизистой желудочно-кишечного тракта и органов дыхания, является самой распространенной характеристикой экспозиции. Величина дозы определяется концентрации вещества в окружающей среде, объемом данной среды, поступающей в организм человека в единицу времени или в течение какого-либо события (скорость поступления или скорость поглощения), а также массой тела человека. Значение дозы обязательно выступает как функция времени воздействия ($\text{мг/кг} \times \text{день}$), а обнаружение химического соединения в биологических образцах признается наиболее объективным доказательством факта воздействия.

✓ *Приложенная (примененная) доза* представляет собой то количество химического соединения, которое контактирует с первичными обменными барьерами организма – кожей, альвеолами легких, желудочно-кишечным трактом. Непосредственно определить приложенную дозу обычно невозможно, ее удается аппроксимировать с применением понятия *потенциальной дозы*.

✓ *Внутренняя доза* соответствует количеству поллютанта, поглощенного тканями организма человека при дыхании, приеме пищи или через кожу. Основными индикаторами внутренней дозы загрязнителей или их производных являются различные биологические маркеры (например, содержание ксенобиотиков в биосубстратах).

✓ *Биологически эффективная доза* – это то количество поглощенного и/или накопленного химического соединения, а также его метаболитов, которое достигло соответствующей ткани-мишени или органа-мишени, взаимодействовало с ним в течение определенного времени, что обусловило неблагоприятный эффект (например, нарушение физиологических процессов). В целях описания связи между концентрацией загрязнителя в ткани-мишени или органе-мишени с одной стороны и возникающими эффектами (на тканевом и органном уровнях, а также конечными в состоянии здоровья) применяется построение математических токсикокинетических моделей. Учет сведений о биологически эффективной дозе оптимален в случае оценки воздействия, при котором поллютант поступает в организм человека преимущественно из одного объекта окружающей среды (например, из атмосферного воздуха), а особенности его метаболизма детально изучены (например, оксид углерода).

✓ *Общая доза* определяется как сумма отдельных доз, полученных организмом при воздействии единичного химического соединения на протяжении определенного временного периода в условиях контакта со всеми средами (воздухом, водой, пищей и почвой), содержащими данный поллютант.

✓ Так как определение дозы обычно технически сложно осуществить, вынужденно используют такой параметр, как *экспозиция*, которая обычно рассматривается в отношении одновременного воздействия в условиях одного компонента окружающей среды, например, атмосферного воздуха. Однако при проведении любой процедуры оценки риска в целях разработки адекватных оптимизационных мероприятий для его устранения или минимизации следует учитывать риски, связанные со всеми компонентами среды обитания и путями проникновения химических соединений в организм человека. Количественной мерой экспозиции при этом выступает *потенциальная доза*, исчисляемая как произведение концентрации загрязнителя в определенном объекте окружающей среды (атмосферном воздухе, питьевой воде, продуктах питания) на объем вдыхаемого воздуха, потребляемой питьевой воды или степень абсорбции через кожу с учетом массы тела человека. Иными словами, потенциальная доза соответствует тому количеству загрязнителя, которое потребляется или вдыхается, или тому его количеству, которое контактирует с кожей (аналогична *введенной дозе* при токсикологических исследованиях по определению зависимости «доза – ответ» для ингаляционного и перорального путей поступления поллютанта). При наличии сведений о параметрах биологической доступности следует применять поправки к значению потенциальной дозы в случае пересчета ее в поглощенную и/или внутреннюю дозы.

✓ Определение *потенциальной дозы* включает обязательный учет: во-первых, индивидуальных характеристик людей (пол, возраст, масса тела, площадь поверхности тела); во-вторых, параметров активности их жизнедеятельности (времени пребывания в различных микросредах, скорости дыхания и других); в-третьих, параметров мест их проживания, особенностей жилищ (планировки, вентиляции, водоснабжения и других); в-четвертых, значимых параметров территории (особенности региона, городская или сельская местность и другие); в-пятых, временных

факторов (сезона года, выходных дней и других). При процедуре оценки риска величины потенциальных доз обычно усредняются, принимая в расчет массу тела и продолжительность воздействия. Подобная усредненная доза представляет собой *среднюю суточную потенциальную дозу* (ADD_{pot}) или *среднюю суточную дозу* (ADD).

✓ Также производится расчет *суммарной экспозиции*, принципиально важной при оценке риска и охватывающей всю сумму воздействий определенного химического соединения вне зависимости от задействованных объектов окружающей среды или путей поступления. Формулы для расчета средней суточной дозы (ADD) при различных путях поступления (пероральном, ингаляционном, кожном) представляют собой варианты основной формулы потенциальной дозы (рис. 19).



Рис. 19. Соотношения между различными видами доз

Общая потенциальная доза (TPD) рассчитывается по формуле

$$TPD = C \times IR \times ED,$$

где C – концентрация загрязнителя в объекте окружающей среды (атмосферном воздухе, почве и других), контактирующем с телом человека (в единицах масса/объем или масса/масса); IR – величина (скорость) поступления, зависящая от объема легочной вентиляции, объема потребляемой воды и т.д.; ED – продолжительность воздействия.

Средняя суточная доза (ADD) традиционно определяется делением потенциальной дозы на массу тела (*BW*) и время осреднения воздействия (*AT*):

$$ADD_{\text{pot}} = \text{TPD} / (\text{BW} \times \text{AT}) .$$

В случае оценки канцерогенных рисков рассчитывают средние суточные дозы, осредненные с учетом ожидаемой средней продолжительности жизни человека, составляющей 70 лет (*LADD*), по формуле

$$\text{LADD} = [\text{C} \times \text{CR} \times \text{ED} \times \text{EF}] / [\text{BW} \times \text{AT} \times 365] ,$$

где *LADD* – средняя суточная доза или поступление (I), мг/(кг·день); *C* – концентрация поллютанта в загрязненной среде, мг/л, мг/м³, мг/см², мг/кг; *CR* – скорость поступления воздействующей среды (питьевой воды, воздуха, продуктов питания и т.д.), л/день, м³/день, кг/день и др.; *ED* – продолжительность воздействия, лет; *EF* – частота воздействия, дней/год; *BW* – масса тела человека, кг; *AT* – период усреднения экспозиции (для канцерогенов 70 лет); 365 – число дней в году.

Например, для сценария селитебной территории при определении дозы химического соединения, поступающего с атмосферным воздухом, учитываются: во-первых, концентрация загрязнителя в атмосфере и в воздушной среде помещений; во-вторых, параметры массы тела у детей или взрослых; в-третьих, время пребывания людей внутри помещения и за его пределами; в-четвертых, скорость дыхания или суточный объем потребления воздуха в помещении и вне его; в-пятых, частота и продолжительность воздействия (табл. 6).

Формулы для определения средней суточной дозы (*ADD*) и стандартные величины ключевых факторов для основных путей поступления загрязнителей в организм представлены в «Руководстве по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» Р 2.1.10.1920-04.

Интегрированная оценка экспозиции. На основе определения общей потенциальной дозы производится расчет *суммарной экспозиции*, характеризующей риск воздействия загрязнителя с учетом всех его воздействий вне зависимости от объекта окружающей среды и путей поступления в организм человека. С указанной целью проводится анализ *многомаршрутной многосредовой экспозиции*, отражающей, во-первых,

3. Оценка экологического риска для здоровья

поступление химического соединения из всех изучаемых сред, а также суммарные дозы для отдельных объектов окружающей среды и путей поступления с выходом на общую величину суммарной дозы.

Таблица 6

Расчет суточных доз при ингаляционном воздействии веществ с атмосферным воздухом

I = [(Ca*Tout*Vout) + (Ch*Tin*Vin) * EF * ED/(BW*AT*365)]		
Параметр	Характеристика	Стандартное значение
I	Величина поступления, мг/кг-день	-
Ca	Концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м ³	-
Ch	Концентрация вещества в воздухе жилища, мг/м ³	1,0*Ca
Tout	Время, проводимое вне помещений, час/день	8 часов/день
Tin	Время, проводимое внутри помещений, час/день	16 часов/день
Vout	Скорость дыхания вне помещений, м ³ /час	1,4 м ³ /час
Vin	Скорость дыхания внутри помещения, м ³ /час	0,63 м ³ /час
EF	Частота воздействия, дней/год	350 дней/год
ED	Продолжительность воздействия, лет	30 лет; дети: 6 лет
BW	Масса тела, мг/кг	70 кг; дети: 15 кг
AT	Период осреднения экспозиции, лет	30 лет; дети: 6 лет; канцерогены: 70 лет

Средняя суточная доза на день воздействия (ADDd) представляет собой базис для определения доз хронического, пожизненного, острого и подострого воздействий. Хроническая средняя суточная доза (ADDch) рассчитывается по формуле

$$ADDch = ADDd \times (EF / DPY),$$

где ADDch – средняя суточная доза, усредненная на хроническую экспозицию, мг/кг-день; ADDd – средняя суточная доза на день экспозиции; EF – частота воздействия, дней/год; DPY – число дней в году (365 дней/год).

Частота воздействия отражает как продолжительное воздействие (365 дней в году), так и частичное или прерывистое (например, 90 дней в году в условиях теплого периода календарного года). При частоте воздействия, равной 365 дней в году, значение *ADDch* равно *ADDd*.

На итоговом этапе производится расчет *пожизненной суточной дозы (LADD)* на основе одной или нескольких хронических суточных доз (*ADDch*) по формуле

$$LADD = ([EDb \times ADDchb] + [EDc \times ADDchc] + [EDa \times ADDcha]) / AT,$$

где *LADD* – пожизненная средняя суточная доза, мг/кг×день; *EDb* – продолжительность экспозиции для детей младшего возраста (0–5 лет), равная 6 годам; *EDc* – продолжительность экспозиции для детей старшего возраста (6–17 лет), равная 12 годам; *EDa* – продолжительность экспозиции для взрослых (18 и старше), равная 52 годам; *ADDchb* – хроническая средняя суточная доза для детей младшего возраста, мг/кг×день; *ADDchc* – хроническая средняя суточная доза для детей старшего возраста, мг/кг×день; *ADDcha* – хроническая суточная доза для взрослого, мг/кг×день; *AT* – время осреднения, число лет.

Иными словами, пожизненная средняя суточная доза рассчитывается как средневзвешенная доза для трех периодов жизни. Длительность воздействия рассматривается как ряд лет, на протяжении которых продолжал реализовываться соответствующий вариант воздействия. Среднее время в знаменателе представляет собой период, на который производится усреднение общей дозы или она распределяется пропорционально по блокам лет. Для канцерогенных эффектов среднее время учитывает продолжительность жизни человека, невзирая на длительность воздействия. С момента, когда воздействие принимает ежедневный характер, *ADDch* становится меньше *ADDd*. Рассмотренная формула допускает, что способ воздействия остается постоянным на протяжении всего хронического воздействия. Если воздействие продолжается короткий период, то оно оценивается отдельно как острое либо подострое. При условиях экспозиции в селитебной зоне, продолжительность которой может превышать один возрастной период жизни, следует рассчитывать суточную и хроническую *ADD* раздельно для каждого периода

жизни, так как различным возрастным периодам свойственны специфические значения величин контакта и массы тела [9, 10, 12, 13, 14].

3.5. Характеристика риска

Характеристика риска как завершающий, четвертый, этап процедуры оценки риска обеспечивает интеграцию сведений об изучаемых загрязнителях объектов окружающей среды, о параметрах экспозиции и зависимости «доза – ответ», собранных на трех предшествующих этапах.

Целью этапа характеристики риска является его качественная и количественная оценка, сравнительный анализ выявленных проблем для здоровья экспонируемых контингентов населения, характеристика научных гипотез, а также неопределенностей, способных исказить результаты выполненных аналитических исследований и полученные итоговые выводы (табл. 7).

Таблица 7

Четыре этапа оценки риска

ЭТАП	СОДЕРЖАНИЕ
1. Идентификация опасности	Анализ соответствующей биологической и химической информации, указывающей на то, может или нет агент являться канцерогеном и могут ли токсические эффекты в одной ситуации проявляться также и в других ситуациях
2. Оценка зависимости «доза - ответ»	Процесс оценки дозы и оценки ее взаимосвязи с частотой побочных эффектов для здоровья
3. Оценка экспозиции	Определение или оценка (количественная или качественная) амплитуды, продолжительности и путей воздействия
4. Характеристика риска	Интегрирование и суммирование идентифицированных угроз, оценка взаимоотношений между дозой и результатом. Оценка воздействия вместе с допущениями и неопределенностями. Этот финальный этап предполагает оценку риска общественному здоровью и создает структуры для того, чтобы определить значимость риска

Принципиально важной является роль этапа характеристики риска как связующего звена между процедурами оценки риска и управления риском (рис. 20).



Рис. 20. Основные компоненты анализа риска здоровью

- *аналитическое обобщение* результатов оценок зависимости «доза/концентрация – ответ» и экспозиции, полученных на втором и третьем этапах оценки риска;

- *определение количественных параметров риска* в отношении различных маршрутов и путей поступления химических веществ в организм человека;

- *расчеты рисков* для вариантов *агрегированной* (при поступлении определенного химического загрязнителя в организм экспонируемого человека посредством всех возможных путей из различных объектов окружающей среды) и *кумулятивной* (сочетанное одновременное воздействие нескольких химических соединений) *экспозиции*;

- *идентификация и анализ неопределенностей* при процедуре оценки риска;

- *аналитическое обобщение данных*, полученных при реализации процедуры оценки риска с последующим представлением информации заинтересованным лицам, задействованным в управлении риском.

Типичный алгоритм этапа характеристики риска объединяет в себе:

К *ключевым принципам* этапа *характеристики риска* относятся:

- объединение (интеграция) всех сведений, собранных на предыдущих этапах процедуры оценки риска – идентификации опасности, оценок зависимости «доза – ответ» и экспозиции;
- обязательная детальная характеристика, всестороннее рассмотрение и обсуждение факторов неопределенности и вариабельности полученных на всех этапах оценки риска результатов;
- понятная и доказательная форма всех представляемых сведений о параметрах идентифицированного и оцененного риска с обоснованием их достоверности и указаниями на ограничения характеристик риска и дополнительных результатов исследования.

На этапе характеристики риска, как правило, применяется значение условно принимаемого **приемлемого риска**, под которым подразумевается возможность возникновения определенного явления, при котором неблагоприятные последствия настолько малы, что при условии получения предпочтений от актуализации данного фактора риска отдельный человек, популяция людей или общество в целом согласны пойти на данный риск. При определении значения приемлемого канцерогенного риска для населения принято опираться, во-первых, на подтвержденные сведения о канцерогенности изучаемого химического соединения для людей, во-вторых, на численность экспонируемого контингента населения и, в-третьих, на реальную достижимость реализации эффективных оптимизационных мероприятий. Кроме представлений о приемлемом риске при проведении оценки риска применяется также понятие о **минимальном риске** («de minimis»), непосредственно соотносимым с такой степенью риска, которая является привычной или воспринимается основной частью населения как несущественная. Если же диагностируется уровень «de manifestis», который соответствует риску настолько высокому, что последствия его абсолютно неприемлемы, то показано экстренное применение оптимизационных мероприятий с целью минимизации данного риска. Диапазону значений риска между уровнями «de minimis» и «de manifestis» соответствует промежуточная зона уровней рисков, когда ситуация не может расцениваться как безусловно допустимая.

Классификация уровней риска. Признается целесообразным на этапе характеристики риска, обусловленного химическими загрязнителями окружающей среды, применять следующие *критерии приемлемости риска*:

• **диапазон риска I** (уровень «de minimis») соответствует уровню риска, воспринимаемому всем населением как пренебрежимо низкий, идентичный обычным, повседневным рискам. Величина индивидуального риска на протяжении всей жизни при этом равна или меньше 1×10^{-6} , т.е. не превышает одного дополнительного случая серьезного заболевания или смертельного исхода на миллион экспонированных лиц. При таких уровнях риска не требуются дополнительные оптимизационные мероприятия по их понижению, сохраняется необходимость их *периодического контроля*;

• **диапазон риска II** (предельно допустимый риск, *верхний предел приемлемого риска*) охватывает величины индивидуального риска на протяжении всей жизни, превышающие 1×10^{-6} , но меньшие 1×10^{-4} . Данному диапазону соответствует большинство *гигиенических регламентов для населения в целом*. Так, например, Всемирная организация здравоохранения допустимый риск для питьевой воды приравнивает к 1×10^{-5} , а для атмосферного воздуха – к 1×10^{-4} . При таких уровнях риска требуется постоянный контроль (мониторинг). При наличии показаний могут осуществляться дополнительные оптимизационные мероприятия для уменьшения риска;

• **диапазон риска III** (риск приемлемый только для профессиональных групп, *но не допустимый для населения в целом*) включает в себя значения индивидуального риска на протяжении всей жизни, превышающие 1×10^{-4} , но меньшие 1×10^{-3} . Такой уровень риска подразумевает необходимость разработки и реализации плановых оптимизационных (оздоровительных) мероприятий по снижению рисков, при планировании которых необходим учет результатов дополнительных углубленных исследований и оценки различных аспектов выявленных проблем с определением степени их приоритетности по отношению к иным гигиеническим, экологическим, социальным и экономическим проблемам для данной территории;

• **диапазон риска IV** (уровень «de manifestis», неприемлемый не только для населения в целом, но и для профессиональных групп) при величине индивидуального риска на протяжении всей жизни равной или превышающей 1×10^{-3} . При достижении такого уровня риска необходима

разработка предложений и рекомендаций для лиц, принимающих управленческие решения о разработке и реализации экстренных оптимизационных (оздоровительных) мероприятий по уменьшению риска.

При разработке долгосрочных программ, установлении региональных регламентов признается целесообразной ориентация на значение **целевого риска**, под которым подразумевается такая степень риска, которая должна быть достигнута за счет реализации оптимизационных мероприятий по управлению риском (например, по результатам внедрения современной природоохранной технологии). Как правило, величина целевого риска приравнивается к 1×10^{-6} , что соответствует рекомендациям экспертов ВОЗ и представляет собой суммарный канцерогенный риск, обусловленный эффектом всех идентифицированных канцерогенов. Величина целевого риска для условий населенных мест в Российской Федерации варьируется в пределах от 1×10^{-5} до 1×10^{-6} . С учетом величин целевого риска как канцерогенных, так и общетоксических эффектов обосновываются *региональные нормативы минимального риска* или концентрации поллютантов, основанные на риске.

Оценка риска канцерогенных эффектов предусматривает учёт результатов оценки риска отдельно для каждого загрязнителя и всех изучаемых путей поступления (раздельно и суммарно) в организм человека; значений рисков для смеси химических соединений раздельно при каждом из путей поступления и суммарно; популяционных канцерогенных рисков. Характеристика канцерогенного риска реализуется поэтапно (рис. 21).

Индивидуальный канцерогенный риск рассчитывается на основе сведений об экспозиции и факторах канцерогенного потенциала (факторах наклона, единичных рисках). Для канцерогенов *добавочная вероятность заболевания раком у индивида на протяжении всей его жизни (CR)* оценивается по значению *среднесуточной дозы в течение жизни (LADD)*:

$$CR = LADD \times SF ,$$

где LADD – среднесуточная доза в течение жизни, мг/(кг·день); SF – фактор наклона, (мг/(кг×день))⁻¹.

3.5. Характеристика риска

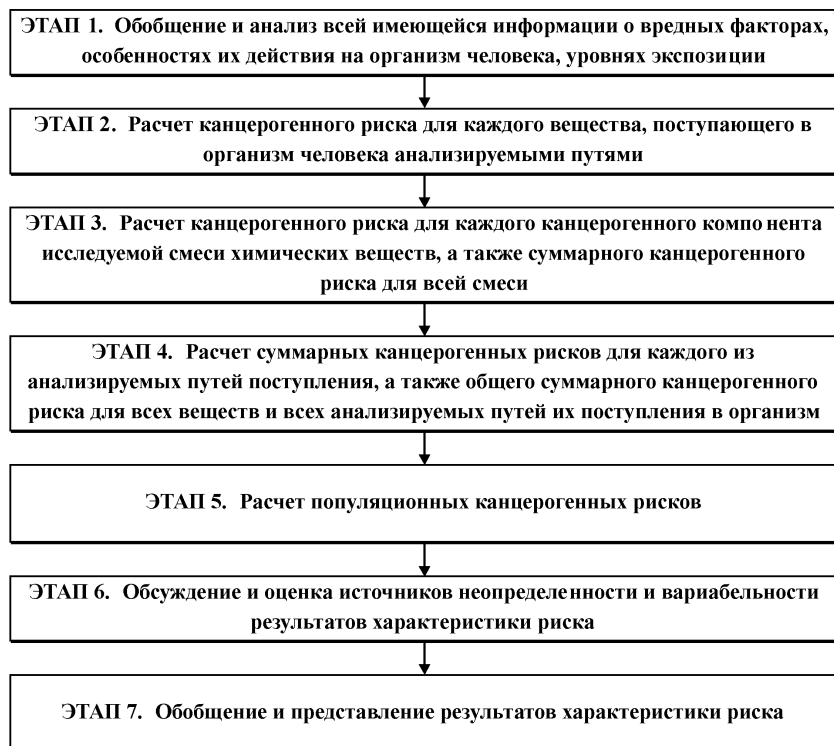


Рис. 21. Алгоритм характеристики канцерогенного риска

Если применяется значение *единичного риска* (UR), то формула расчета выглядит следующим образом:

$$CR = LADC \times UR ,$$

где $LADC$ – средняя концентрация поллютанта в изучаемом объекте окружающей среды на протяжении всего периода усреднения экспозиции (питьевая вода, мг/л; воздух, мг/м³); UR – единичный риск для питьевой воды (на 1 мг/л) или атмосферного воздуха (на 1 мг/м³).

Использование рассмотренных формул допустимо при относительно низких уровнях воздействия канцерогенных соединений, соответствующих линейному участку зависимости «доза – ответ». При высо-

ких уровнях канцерогенного риска (более 1×10^{-2}) результаты расчетов способны лишь качественно характеризовать уровень риска как «высокий риск», риск более 0,01. При наличии относительно высокой дозы канцерогенного химического соединения оптимально при расчете риска применять формулу

$$CR = 1 - \exp(-SF \times LADD),$$

При расчетах и характеристике риска предлагается непременно учитывать специфику изучаемого контингента людей, присущие ему дескрипторы (факторы) экспозиции и избранную меру экспозиции (среднюю экспозицию; максимально обоснованную, или разумную экспозицию; максимальную экспозицию). Наличие различных вариантов экспозиции и оцениваемых контингентов людей оценку риска надлежит проводить раздельно для каждого варианта. В подобных случаях требуется проводить анализ распределения канцерогенных рисков в популяции с обязательным учетом численности изучаемых групп населения и рассчитанных величин канцерогенного риска.

Одновременно с определением значений индивидуальных канцерогенных рисков производятся расчеты величин *популяционных рисков* (PCR), характеризующих добавочное к фоновому количество злокачественных новообразований, которые могут появиться на протяжении жизни из-за воздействия изучаемого фактора:

$$PCR = CR \times POP,$$

где CR – величина индивидуального канцерогенного риска; POP – численность изучаемой популяции, чел.

Канцерогенные риски, как индивидуальный, так и популяционный, отражают верхнюю границу вероятного канцерогенного риска на протяжении условной средней продолжительности жизни человека, равной 70 годам. Из-за стохастического характера процесса канцерогенеза, длительного латентного периода при злокачественных новообразованиях, отличий в возрастной чувствительности и других специфических особенностей данного вида патологии точно предсказать сроки возникновения заболеваний в человеческой популяции не представляется возможным.

В целях сравнительной характеристики канцерогенного риска рекомендуется использовать расчет *условного годового риска (PCRa)*, соответствующего вероятному числу добавочных случаев злокачественных новообразований на протяжении года. Так, например, при анализе канцерогенного риска из-за загрязнений атмосферного воздуха значение *PCRa* определяется по формуле

$$PCRa = \Sigma (C_i \times POP) \times (UR_i / 70) ,$$

где C_i – среднегодовая концентрация i -го вещества; POP – численность экспонируемой популяции (подвергающейся воздействию); UR_i – индивидуальный риск на протяжении всей жизни (70 лет).

Рассчитанные величины годового канцерогенного риска не рекомендуется применять в качестве оснований для каких-либо непосредственных аналогий между фактической заболеваемостью злокачественными новообразованиями или онкологической смертностью, с одной стороны, и значениями канцерогенных рисков, с другой. Количественные параметры канцерогенных рисков характеризуют преимущественно многолетние тенденции к трансформациям онкологического фона, формирующиеся при соблюдении всех исходных условий (продолжительность и выраженность воздействий, постоянство экспозиции во времени, определенные величины факторов экспозиции и другие). Максимальный интерес результаты характеристики канцерогенных рисков представляют при сравнительном анализе средовых факторов риска на различных территориях, в динамике, при оценке эффективности реализованных оптимизационных мероприятий (до и после их проведения) при сопоставлении вероятного воздействия на состояние здоровья населения технологических процессов и природоохранных мероприятий.

Оценка риска неканцерогенных эффектов при острых и хронических воздействиях. Возможный риск развития эффектов, не связанных с процессами канцерогенеза, может быть охарактеризован различными путями: во-первых, посредством сравнения реальных уровней экспозиции с безопасными уровнями воздействия (расчет индекса опасности); во-вторых, на основе результатов исследований эпидемиологического типа с определением параметров зависимости «концентрация/доза – эффект».

Индекс опасности позволяет получить характеристику развития неканцерогенных эффектов с его расчетом при применении формул:

$$HQ = AD / RfD \text{ или } HQ = AC / RfC ,$$

где HQ – коэффициент опасности; AD – средняя доза, мг/кг; AD – средняя концентрация, мг/м³; RfD – референтная (безопасная) доза, мг/кг; RfC – референтная (безопасная) концентрация, мг/м³.

Если величина индекса опасности (HQ) равна или меньше 1, то потенциальный риск вредных эффектов следует рассматривать как пренебрежимо малый. При увеличении значения индекса опасности (HQ) возможность появления неблагоприятных эффектов увеличивается, хотя точное определение величины соответствующей вероятности не представляется возможным.

Расчет коэффициентов опасности производится отдельно для вариантов острых (кратковременных), подострых и длительных воздействий химических соединений. Методологически важным является применение равнозначных периодов усреднения для экспозиций и соответствующих им уровней безопасного воздействия.

Отсутствие информации о значениях безопасных уровней воздействия для химических соединений определяет необходимость применения в качестве критерия вредного действия при сравнительном анализе их опасности и ранжировании показателей *запаса экспозиции* или *безопасности* (MOE или MOS), рассчитываемых как отношение величин $NOAEL$ (или $LOAEL$) к значениям воздействующей дозы (или концентрации):

$$MOE = NOAEL / ADD \text{ или } MOE = LOAEL / ADD .$$

При значении MOE , определенном с использованием $NOAEL$, более 100, изучаемое химическое соединение оценивается как *низко приоритетное*. Соответствующим пределом для MOE , определенном с использованием $LOAEL$, является значение, превышающее 1000. В значениях MOE и MOS не учитываются факторы неопределенности определения $NOAEL$ для людей.

Оценка риска при многосредовых, комбинированных и комплексных воздействиях. В случае комбинированного и комплексного

влияния химических веществ, с целью характеристики риска возникновения неблагоприятных неканцерогенных эффектов, производится исчисление *индекса опасности (HI)*. При условии одновременного поступления нескольких химических соединений в организм человека одним и тем же путем (пероральным, ингаляционным или кожным) индекс опасности определяется по формуле

$$HI = \sum HQ_i ,$$

где HQ_i – коэффициенты опасности для отдельных компонентов (i) смеси воздействующих химических соединений.

В случае комплексного поступления загрязнителя из окружающей среды в организмы людей одновременно различными путями, а также в случаях многосредового и многомаршрутного воздействия в качестве критерия риска служит *суммарный индекс опасности (THI)*, рассчитываемый по формуле

$$THI = \sum HI_j ,$$

где HI_j – индексы опасности для отдельных путей поступления или маршрутов воздействия. Так, если химическое соединение А поступает в организмы экспонируемых людей одновременно перорально и ингаляционно, то суммарный индекс опасности рассчитывается по формуле

$$THI = Ca / RfC + Do / RfD ,$$

где Ca – оцениваемая концентрация химического соединения в воздухе (mg/m^3), Do – доза, получаемая в случае реализации перорального пути поступления (mg/kg); RfC – референтная (безопасная) концентрация (mg/m^3); RfD – референтная (безопасная) доза (mg/kg).

При проведении оценки риска, обусловленного комплексным поступлением загрязнителей в организм, коэффициенты поглощения химических соединений в дыхательной и пищеварительной системах не учитываются, а соответствующие расчеты производятся на основе параметров воздействующих доз и концентраций. Такой подход объясняется тем, что значения безопасных (референтных) уровней воздействия химических веществ (RfD и RfC) всегда соответствуют экспозиционным (воздействующим), а не поглощенным дозам.

В случае кожного воздействия химических соединений обычно производится оценка значения поглощенной дозы. Из-за недоступности сведений о безопасных уровнях в случаях кожного воздействия для основной массы приоритетных химических соединений, в роли ориентировочной меры допустимого кожного воздействия ($RfDd$) выступает значение поглощенной дозы, вычисляемой на основе референтной дозы ($RfDo$) в случае перорального пути поступления:

$$RfDd = RfDo \times GIABS ,$$

где GIABS – коэффициент абсорбции в желудочно-кишечном тракте.

При расчете индексов опасности обычно учитываются критические органы и системы органов, поражаемые изучаемыми загрязнителями. В случаях воздействия компонентов смеси поллютантов на одни и те же органы или системы органов человеческого организма наиболее типичным вариантом их комбинированного воздействия является аддитивность (суммация).

Уровни безопасного воздействия (референтные) используются при расчетах коэффициентов опасности (HQ) для потенциальных путей поступления загрязнителей в организм человека.

Коэффициент опасности определяется при сопоставлении значений потенциальной суточной дозы загрязнителя, поступающего в организм посредством определенного пути и соответствующего данному пути поступления референтного (безопасного) уровня:

$$HQ_i = D_i / RfD ,$$

где HQ_i – коэффициент опасности воздействия вещества i ; D_i – потенциальная доза поступления вещества i , $\text{мк/кг} \times \text{день}$, RfD – безопасный уровень воздействия, $\text{мг/кг} \times \text{день}$.

В случае ингаляционного поступления поллютанта в организм, при отсутствии специальных задач исследования, доза воздействия не определяется, а расчет коэффициента опасности производится по формуле:

$$HQ_i = C_i / RfC ,$$

где HQ_i – коэффициент опасности воздействия вещества i ; C_i – уровень воздействия вещества i , мг/м^3 ; RfC – безопасный (референтный) уровень воздействия, мг/м^3 .

В случае, когда величина коэффициента опасности загрязнителя не превышает единицы ($HQ_i \leq 1,0$), возможность возникновения критических эффектов в состоянии здоровья при условии ежедневного поступления данного химического соединения на протяжении всей жизни оценивается как незначительная, а подобное воздействие характеризуется как допустимое. Если значение коэффициента опасности превышает единицу ($HQ_i > 1,0$), то вероятность проявления нежелательных эффектов в здоровье человека повышается пропорционально увеличению коэффициента опасности. Коэффициент опасности может служить основанием для ранжирования загрязнителей окружающей среды с определением среди них приоритетных химических соединений.

В случаях комплексного и/или многосредового поступления единичного вещества коэффициенты опасности, соответствующие каждому пути и каждой среде воздействия, суммируются с последующей оценкой величины получаемого при этом суммарного индекса опасности – ТНІ или HI_{total} (табл. 8).

Таблица 8

Расчет суммарного индекса опасности в случае комплексного многосредового воздействия

Среда/путь воздействия	Ингаляционно	Перорально	Накожно	Сумма
Атмосферный воздух	HQ_{ai}	-	-	HI_a
Питьевая вода	HQ_{wi}	HQ_{wo}	HQ_{wd}	HI_w
Почва	HQ_{si}	HQ_{so}	HQ_{sd}	HI_s
Сумма	HI_i	HI_o	HI_d	HI_{total}

Примечание: а – атмосферный воздух; w – питьевая вода; s – почва; i – ингаляционное поступление; o – пероральное поступление; d – кожное воздействие.

Суммарный индекс опасности (ТНІ) характеризует максимальное допустимое поступление поллютанта и также не должен превышать единицу ($ТНІ \leq 1,0$). На основе величины суммарного индекса опасности выявляются приоритетные среды воздействия и пути поступления вещества в организм человека. Суммарный индекс опасности является

базисом при проведении ранжирования загрязнителей, поступающих в организм человека различными путями из различных объектов окружающей среды.

В случае комбинированного поступления не одного, а нескольких химических соединений определенным путем, суммарный индекс опасности рассчитывается для загрязнителей, воздействующих на один орган или одну систему органов. В подобных ситуациях суммарный индекс опасности характеризует риск возникновения нежелательных эффектов в критическом органе или системе органов с выделением среди них приоритетных, в наибольшей степени «страдающих» при воздействии вредных и опасных факторов окружающей среды. Необходимо учитывать, что даже в случае, когда воздействие каждого отдельного загрязнителя не превышает допустимый уровень, комбинированное поступление химических соединений, влияющих на один и тот же орган или систему органов, способно обусловить возникновение нежелательных эффектов в данном органе или системе органов.

Канцерогенный риск при комплексном поступлении генотоксических канцерогенов различными путями (пероральным, кожным и ингаляционным) и при комбинированном влиянии нескольких химических веществ принято считать аддитивным. При углубленном анализе расчет суммарных канцерогенных рисков рекомендуется проводить раздельно для каждой группы локализаций и форм процесса. Гипотеза об аддитивности канцерогенных эффектов распространяется исключительно на области малых вероятностей вредных эффектов и относительно низкой интенсивности воздействия. Если данные условия не соблюдаются, то рекомендуется использовать формулу для расчета *суммарного канцерогенного риска (TCR)*:

$$TCR = 1 - (1 - CR_1) \times (1 - CR_2) \times \dots \times (1 - CR_i),$$

где $CR_1 \dots CR_i$ – канцерогенные риски, обусловленные изолированным воздействием i -го канцерогена.

При сочетанном воздействии нескольких генотоксических канцерогенов суммарный канцерогенный риск для определенного пути поступления (перорального, ингаляционного или кожного) определяется с применением формулы

3.5. Характеристика риска

$$CRT = \sum CRJ ,$$

где CRT – суммарный канцерогенный риск для пути поступления T; CRJ – канцерогенный риск для j-го канцерогенного вещества.

При одновременном воздействии нескольких канцерогенов, поступающих в организмы людей различными путями, определение суммарного канцерогенного риска (TCR) проводится по формуле

$$TCR = \sum CRT .$$

При определении суммарных канцерогенных рисков следует учитывать отличия в уровне выраженности воздействия химических канцерогенов при различных путях поступления. Когда величины факторов канцерогенного потенциала при различных путях воздействия отличаются, исчисление рисков с применением суммарных доз допустим только для аналогичных путей поступления (например, ингаляция химического соединения, содержащегося в атмосфере, водопроводной воде, почве, воде плавательного бассейна или реки).

Базисом для определения суммарных канцерогенных рисков в случае комплексного поступления генотоксического канцерогена служат специальные сводные таблицы, формируемые для каждого j-го химического соединения (табл. 9).

Таблица 9

Анализ канцерогенного риска при многомаршрутной, многосредовой экспозиции j-го химического соединения

Путь поступления	Объекты окружающей среды					
	Воздух	Почва	Питьевая вода	Открытый водоем	Продукты	Сумма
Ингаляция	CR _{ai}	CR _{si}	CR _{wi}	CR _{ri}	-	CR _i
Перорально	-	CR _{so}	CR _{wo}	CR _{ro}	CR _{fo}	CR _o
Накожно	-	CR _{sd}	CR _{wd}	CR _{rd}	-	CR _d
Сумма	CR _a	CR _s	CR _w	CR _r	CR _f	CR _{sum}

Примечание: CR – индивидуальный дополнительный канцерогенный риск. Индексы относятся к различным путям поступления вещества (i – ингаляционно, o – перорально, d – накожно) и задействованным объектам окружающей среды (a – воздух, s – почва, w – питьевая вода,

г – вода открытого водоема при рекреационном использовании, f – продукты питания). Величина CR_{sum} отражает величину суммарного канцерогенного риска при поступлении j-го вещества разными путями из разных сред.

В случае одновременного присутствия в объектах окружающей среды нескольких канцерогенных веществ соответствующие расчеты выполняются вначале отдельно для каждого химического соединения, а затем в отношении смеси канцерогенов в целом. Если на определенной территории имеются несколько рецепторных точек, то расчеты риска необходимо проводить как отдельно для каждой из этих точек воздействия, так и в сумме по ним. Одновременно рекомендуется проводить анализ риска, связанного с определенными источниками канцерогенов, результаты которого применяются при сравнительной оценке степени канцерогенного риска на различных участках изучаемой территории, а также при определении долевого участия каждого из рассматриваемых участков в суммарном значении риска для всей изучаемой территории.

Обобщение информации о риске. Заключительное обсуждение информации о риске, основными положениями которого является интерпретация результатов оценки риска, должно включать:

- неоспоримые подтверждения того, что при осуществлении процедуры оценки риска действительно были выявлены и проанализированы наиболее значимые и типичные для изучаемой территории химические загрязнители окружающей среды;
- детальную характеристику нежелательных эффектов, которые могут проявиться в условиях воздействия идентифицированных химических веществ, загрязняющих окружающую среду;
- оценку статистической достоверности количественных данных о параметрах токсичности выявленных химических соединений и об обусловленных ими нежелательных эффектах;
- оценку статистической достоверности сведений, примененных при проведении оценки экспозиции;
- определенные параметры канцерогенного риска и значения индексов опасности неканцерогенных эффектов, при превышении которых показано осуществление оптимизационных мероприятий по элиминации или минимизации степени воздействия источников риска;

3.5. Характеристика риска

- выявленные основные факторы, которые необходимо учитывать при реализации процедуры управления риском, включая приоритетные химические соединения, пути их поступления, загрязняемые объекты окружающей среды, источники поступления химических соединений в окружающую среду и наиболее вероятные вредные эффекты у населения;

- описание особенностей приоритетных факторов, понижающих аргументированность и надежность результатов, в том числе все неопределенности оценки риска;

- специфические особенности популяции, находящейся под воздействием, а также входящих в нее наиболее чувствительных групп людей;

- результаты сравнительного анализа полученных данных по оценке риска, доступных сведений о состоянии здоровья населения на популяционном уровне, а также материалов аналогичных исследований на сходных по параметрам экспозиции территориях.

Итоговое заключение, включающее сведения о количественных и качественных параметрах риска, представляет собой основной документ, предоставляемый специалистам, разрабатывающим комплекс оптимизационных мероприятий по управлению риском [9, 10, 12, 13, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка экологического риска рассматривается как естественная поведенческая реакция каждого человека на протяжении всей его жизни, на ней базируется весь спектр информационной связи с окружающей средой. Такое привычное понятие, как «опасность», связано, преимущественно, с информацией о потенциальном риске. Человек непрерывно совершенствует способы оценки экологического риска, формирует собственные критерии риска и пути сознательного управления риском. Было бы неразумным не использовать столь эффективный естественный механизм в решении задач, связанных с минимизацией неблагоприятного воздействия факторов окружающей среды.

Фактически методология оценки экологического риска, включая риск для здоровья населения, представляет собой разновидность экспертных работ, предназначенных для выявления того контингента населения, который может проявить нежелательные реакции в ответ на воздействие какого-либо неблагоприятного (опасного или вредного) фактора риска. Экологический риск при этом рассматривается как количественная характеристика, которую можно применять как в целях оценки здоровья популяции, так и в интересах экономического обоснования оптимизационных мероприятий по его сохранению и улучшению. Принципиально важно то, что процедура оценки риска ориентирована на конкретный (известный и измеряемый) фактор окружающей среды, которым возможно управлять, а не на заболеваемость населения в целом. Это обстоятельство придает деятельности соответствующих управленческих структур целенаправленный и научно обоснованный характер. Помимо этого, процедура оценки экологического риска здоровью не выполнима без наличия достоверной и полной базы данных как о количественных, так и о качественных параметрах исследуемого фактора риска, а также о состоянии здоровья населения на популяционном уровне, что обуславливает необходимость четкого функционирования и взаимодействия систем экологического и социально-гигиенического мониторинга.

Процедура оценки экологического риска, несомненно, обладает рядом преимуществ. Во-первых, система оценки риска позволяет на ос-

нове сведений динамического наблюдения за факторами окружающей среды и параметрами здоровья населения получать количественную и качественную характеристики влияния изучаемого фактора задолго до того, как проявятся последствия данного влияния. Во-вторых, система оценки экологического риска делает возможным проводить оценку здоровья или нездоровья популяции людей на основе финансовых категорий (цена, стоимость, рентабельность и других). В-третьих, система оценки экологического риска органично вписывается в общую систему управления и подготовки оптимизационных управленческих решений, так как экологический риск может измеряться, иметь стоимостное выражение, понятен по смыслу, позволяет осуществлять сравнения и нормирование. В-четвертых, система оценки экологического риска позволяет характеризовать комплексный риск от суммы факторов риска, так как во всех случаях общим знаменателем является здоровье населения.

Таким образом, методология оценки экологического риска может успешно применяться в следующих областях:

- при комплексной эколого-гигиенической экспертизе проектных решений в сфере размещения и строительства новых объектов и реконструкции существующих;
- обосновании приоритетных объектов, направлений и схем мониторинга окружающей среды;
- обосновании экологического, медицинского и социального страхования, определении экономического ущерба от неблагоприятных факторов окружающей среды;
- эколого-гигиеническом ранжировании и картографировании территорий;
- комплексной оценке эколого-гигиенического благополучия;
- разработке и научном обосновании комплексных и целевых оптимизационных программ оздоровительной и профилактической направленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авалиани, С. Л.* Окружающая среда. Оценка риска для здоровья (мировой опыт) [Текст] / С. Л. Авалиани, М. М. Андрианова, Е. В. Печенникова, О. В. Пономарева. – Москва : Консультационный центр по оценке риска, 1996. – 246 с.
2. *Башкин, В. Н.* Экологические риски: расчет, управление, страхование [Текст] : учебное пособие / В. Н. Башкин. – Москва: Высшая школа, 2007. – 360 с.
3. *Биненко, В. И.* Риски и экологическая безопасность природно-хозяйственных систем [Текст] / В. И. Биненко, В. К. Донченко, В. В. Растоскуев. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2012. – 353 с.
4. *Боков, В. А.* Оценка экологических опасностей и рисков [Текст] : учебное пособие / В. А. Боков, Л. А. Багрова, А. С. Тихонов, В. О. Смирнов. – Симферополь: Доля, 2012. – 143 с.
5. *Касьяненко, А. А.* Современные методы оценки рисков в экологии [Текст] : учебное пособие / А. А. Касьяненко. – Москва : Изд-во РУДН, 2008. – 271 с.
6. *Киселев, А. В.* Оценка риска здоровью [Текст] / А. В. Киселев, К. Б. Фридман. – Санкт-Петербург: Дейта, 1996. – 100 с.
7. *Матвеевко, И. А.* Введение в оценку экологических рисков [Текст] / И. А. Матвеевко, Н. А. Осипова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 108 с.
8. *Музалевский, А. А.* Экологические риски: теория и практика [Текст] / А. А. Музалевский, Л. Н. Карлин. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2011. – 448 с.
9. *Онищенко, Г. Г.* Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития [Текст] : монография / Г. Г. Онищенко, Н. В. Зайцева, И. В. Май [и др.] ; под общ. ред. Г. Г. Онищенко, Н. В. Зайцевой. – Москва ; Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 738 с.
10. *Онищенко, Г. Г.* Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду [Текст] / Г. Г. Онищенко, С. М. Новиков, Ю. А. Рахманин,

- С. Л. Авалиани, К. А. Буштуева ; под ред. Ю. А. Рахманина, Г. Г. Онищенко. – Москва : НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
11. *Рахимова, Н. Н.* Техногенные системы и экологический риск [Текст] / Н. Н. Рахимова, И. В. Ефремов. – Оренбург : ОГУ, 2015. – 174 с.
 12. *Ревич, Б. А.* Методика оценки экономического ущерба здоровью населения от загрязнения атмосферного воздуха. Пособие по региональной экологической политике [Текст] / Б. А. Ревич, В. Н. Сидоренко. – Москва : Акрополь, Центр экологической политики России, 2006. – 42 с.
 13. *Ревич, Б. А.* Основы оценки воздействия загрязненной окружающей среды на здоровье человека. Пособие по региональной экологической политике [Текст] / Б. А. Ревич, С. Л. Авалиани, Г. И. Тихонова. – Москва : Акрополь, Центр экологической политики России, 2004. – 268 с.
 14. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04, утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 05.03.2004. – Москва : Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.
 15. *Шмаль, А. Г.* Факторы экологической опасности & экологические риски [Текст] / А. Г. Шмаль. – Бронницы: ИКЦ БНТВ, 2010. – 192 с.

Учебное издание

МАРЧЕНКО Борис Игоревич

**АНАЛИЗ РИСКА: ОСНОВЫ ОЦЕНКИ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА**

Редакторы: *З. И. Надточий, Т. Ф. Кочергина*

Корректоры: *З. И. Надточий, Т. Ф. Кочергина*

Компьютерная верстка: *И. А Ключко*

Подписано в печать 08.02.2019 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. печ. лист. 8,6.

Уч. изд. л. 7,76. Заказ № 6944. Тираж 30 экз.

Издательство Южного федерального университета.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.

