УРАЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
УГЛТУ

Е.В. Купчинская

ТЕХНОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК

Екатеринбург
2015

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра физико-химической технологии защиты биосферы

Е.В. Купчинская

ТЕХНОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК

Учебно-методическое пособие
и сборник задач
для практических занятий
для студентов очной и заочной форм обучения
направления 022000.62 «Экология и природопользование»

Екатеринбург
2015

Печатается по рекомендации методической комиссии ИХПРСи ПЭ. Протокол № 2 от 6 октября 2014 г.

Рецензент – д-р биол. наук зав. кафедрой экологии, природопользования и защиты леса Михайлов Ю.Е.

Редактор Е.Л. Михайлова
Оператор компьютерной верстки Т.В. Упорова

Подписано в печать 03.06.15		Поз. 95
Плоская печать	Формат 60×84 1/16	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 1,86	Цена руб. коп.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ

1.1. Построение и анализ дерева решений с количественными оценками последствий

Пример 1.1. Рассмотрим пример построения дерева для решения так называемой задачи инвестиций, заключающейся в следующем. Некий бизнесмен имеет в своем распоряжении 5000 дол. и стоит перед дилеммой: оставить эти деньги в банке или закупить на них товар, который затем выгодно продать. Однако эта операция связана с риском, так как цена данного товара на рынке может или повыситься, или, наоборот, понизиться. Бизнесмен готов пойти на риск потери, оцениваемой в 1000 дол., и в то же время он предполагает получить в результате операции прибыль, которая составит, по его оценке, также 1000 дол. Пусть вероятность повышения цены товара на рынке в полтора раза больше вероятности понижения этой цены, тогда первому событию (повышение цены) надо приписать вероятность 0,6, а второму событию (понижение цены) – вероятность, равную 0,4.

Решение

Сформулированные условия можно представить в виде простой таблицы (табл. 1) со следующими обозначениями: a_1 и a_2 – рассматриваемые события (повышение и понижение цены товара соответственно); d_1 и d_2 – возможные решения, т.е. соответственно инвестировать и оставить деньги в банке; $p(a_i)$ – вероятность события a_1 (i=1) или a_2 (i=2).

Таблица 1

Возможные последствия решений, выраженные в долларах, и вероятности событий a_1 и a_2

События	a_1: цена повысится	a_2: цена понизится
d_1: инвестировать	6000	4000
d_2: оставить в банке	5000	5000
$p(a_i)$	0,6	0,4

Предположим теперь, что бизнесмен прибегает к услугам брокера, который за плату в t дол. консультирует его по инвестированию средств в рассматриваемую операцию с товаром. Очевидно, что возможны два совета брокера: покупать товар (обозначим этот вариант x_1) или не покупать (вариант x_2). Пусть надежность советов брокера оценивается вероятностями:

$p(x_1/a_1)$ = 0,70 – вероятность правильного совета (покупать) в случае повышения цены товара;

$p(x_2/a_2)$ = 0,65 – вероятность правильного совета (не покупать) в случае понижения цены товара.

Видно, что эти вероятности являются по своей структуре условными. Ими могут выступать субъективные оценки данного бизнесмена или же сведения, полученные им от третьих лиц. Приведенные конкретные значения этих вероятностей говорят о том, что бизнесмен считает брокера более способным к выигрышу (прибыли), нежели к потере (к потерям надо относить и неполученную прибыль). Действительно, шансы брокера на выигрыш составляют 70 %, а на проигрыш – 65 %.

Таким образом, инвестор должен решить, во-первых, покупать ли ему консультацию (совет) брокера и, во-вторых, покупать ли товар (как с консультацией брокера, так и без нее). Дерево решений для этой проблемы изображено на рис. 1. Представляемое дерево «растет» не вертикально, а горизонтально, при этом будем считать, что ствол расположен слева, а все ветви направлены вправо.

Рассмотрение начнем с левого края рисунка, т.е. от ствола дерева. Начальная стадия состоит в том, что бизнесмен должен выполнить одно из трех действий, изображенных тремя ветвями. Первая ветвь имеет обозначение «брокер» и соответствует обращению к брокеру и оплату его консультации. Вторая ветвь (d_1) означает решение инвестировать без совета брокера, а третья (d_2) – решение оставить деньги в банке.

На рис. 1 имеются четырехзначные суммы в долларах, которые будут объяснены ниже, а пока будем следовать по ветви с маркировкой «брокер». Поскольку обращение за консультацией состоялось, то возможны два варианта совета: покупать или не покупать товар. В соответствии с этим ветвь расщепляется на две, одна их них имеет маркировку x_1 («покупать»), другая x_2 («не покупать»). Какой бы из этих двух ветвей ни следовать, каждый раз нужно будет выбирать между действиями d_1 («инвестировать») и d_2 («оставить деньги в банке»).

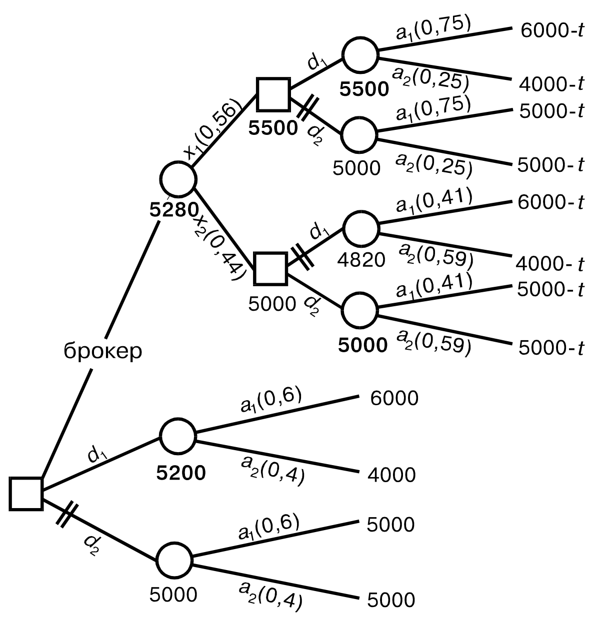

Рис. 1. Дерево решений в задаче об инвестициях

Отсюда дальнейшее разветвление, причем каждая из новых ветвей, в свою очередь, дает еще по два отвода в соответствии с повышением (a_1) или понижением (a_2) цены товара. Аналогичным образом прослеживается часть дерева с ветвями d_1 и d_2, «растущими» из начальной точки: каждая из них расщепляется на две, что означает учет как повышения, так и понижения цены товара.

Следовательно, мы получили дерево, составленное из нескольких ветвей, и каждая ветвь отображает собой или принятое решение, или полученный результат. Подчеркнем, что при построении дерева (слева направо) соблюдался нормальный порядок следования рассматриваемых событий – от прошлого к будущему.

Рассмотрим теперь подробнее те точки, в которых происходит расщепление ветвей, они называются узлами. Существуют узлы двух принципиально различных типов, будем называть их узлами решений и узлами случаев. Обратимся снова к узлу в левой части рис. 1, здесь находится первый узел, дающий три ветви («брокер», d_1 и d_2). Выбор одной из этих ветвей зависит от лица, которое принимает решение после рассмотрения всех трех возможностей. По этой причине данный узел и называют узлом решения, обозначая квадратиком. Если следовать по любой из трех отходящих от этого узла ветвей, например по ветви «брокер», то на пути встретится узел с ветвями x_1 и x_2. Лицо, принимающее решение, не держит под контролем ситуацию, отображаемую этим узлом (здесь решение принимает брокер), следовательно, оно не может выбрать ту или иную ветвь. Правда, это лицо способно приписать разветвлениям от данного узла некоторые вероятности. Именно поэтому рассматриваемый узел логично назвать узлом случаев, такие узлы будем обозначать кружками.

Ветви x_1 и x_2 приводят к узлам решений, поскольку при подходе к ним бизнесмену надлежит решить инвестировать деньги или же оставить их в банке. А каждая из ветвей, обозначенная на рассматриваемом дереве как d_1 или d_2, должна заканчиваться узлом случаев, так как бизнесмен не может знать заранее, как поведет себя цена товара на рынке.

Для анализа дерева решений привлекаются два вида величин: вероятности событий и оценки последствий принятых решений. В качестве последних во многих случаях выступают оценки той выгоды, которая может быть получена в результате принятых решений. Так, в рассматриваемом примере роль оценок последствий играют денежные суммы, выраженные в долларах.

Начнем с подсчета вероятностей. В нашем примере (см. рис. 1) надо вычислить вероятности, которые связаны с ветвями, исходящими из узлов случаев. Развитие дерева во времени идет слева направо, и, следовательно, находясь в любом узле, мы имеем всю информацию о происшедшем ранее, но ничего не знаем о том, что произойдет впоследствии. Как и прежде, следуем от ствола дерева и выберем направление по одной из ветвей, например по ветви d_1. Она ведет к узлу случаев, от него отходят ветви, соответствующие событиям a_1 и a_2, и поскольку обращение к брокеру здесь отвергнуто, то вероятности, характеризующие ветви, просто равны начальным (априорным) значениям, приведенным в табл. 1: $p(a_1) = 0,6$; $p(a_2) = 0,4$. То же можно сказать и о ветви d_2, в узле случая она расщепляется на две, одной из них приписана вероятность 0,6, а другой – вероятность 0,4 (см. рис. 1).

Рассмотрим теперь третью ветвь, отходящую от узла решения, – ту, на которой написано «брокер». После узла случая она разделяется на две в соответствии с двумя возможностями: x_1 (совет «покупать») и x_2 (совет «не покупать»). Какие вероятности характеризуют эти ветви? Находясь в этом узле случая, мы еще не знаем, какое из двух событий (a_1 или a_2) произойдет, поэтому нельзя использовать условные вероятности типа $p(x_1/a_1)$ или $p(x_1/a_2)$.

Обозначим вероятности ветвей, отходящих из узла случая, через $p(x_1)$ и $p(x_2)$. События x_1 и x_2 образуют полную группу, поэтому $p(x_2) = 1–p(x_1)$. Чтобы определить $p(x_1)$, можно использовать формулу полной вероятности, которая примет вид:

$$p(x_1) = p(x_1/a_1)p(a_1)+p(x_1/a_2)p(a_2) = 0,7\cdot 0,6+0,3\cdot 0,4 = 0,56.$$

Получив значение $p(x_1)$, найдем $p(x_2)$: $p(x_2) = 1 - p(x_1) = 0,44$.

Таким образом, шансы получить от брокера совет «покупать» составляют 56 %, а шансы на то, что тот же самый брокер посоветует не покупать товар, равны 44 %. Эти значения, как показывает рис. 1, характеризуют ветви x_1 и x_2, отходящие от узла случая.

Продвигаясь по ветвям x_1 и x_2, мы подходим к узлам решений, после каждого из них имеем разветвление, соответствующее альтернативе «покупать (решение d_1) или не покупать (решение d_2)». Если совет брокера x_1 (покупать) принят, то нужно двигаться по ветви d_1, она приводит к узлу случая, после которого происходит расщепление, отвечающее событиям a_1 и a_2. Ветви этого расщепления характеризуются условными вероятностями $p(a_1/x_1)$ и $p(a_2/x_1)$. Последние показывают вероятности соответственно повышения и понижения цены товара на рынке с учетом того, что брокер посоветовал купить товар и этот совет был принят. Это апостериорные вероятности, так как они представляют собой переоценки первичных (априорных) вероятностей событий a_1 и a_2 после того, как произошло событие x_1 (получен и принят к действию совет «покупать»).

Вероятности $p(a_1/x_1)$ и $p(a_2/x_1)$ подсчитываются по формуле Бейеса:

$$p(a_i/x_1) = p(x_1/a_i)p(a_i)/p(x_1),$$

где i принимает значения 1 и 2.

Условные вероятности $p(x_1/a_i)$ и $p(x_2/a_i)$ обладают следующими свойствами:

$$p(x_1/a_1) + p(x_2/a_1) = 1, \quad p(x_1/a_2) + p(x_2/a_2) = 1.$$

Таким образом:

$p(a_1/x_1) = p(x_1/a_1)p(a_1)/p(x_1) = 0{,}7{\cdot}0{,}6/0{,}56 = 0{,}75;$

$p(a_2/x_1) = p(x_1/a_2)p(a_2)/p(x_1) = [1 – p(x_2/a_2)]{\cdot}p(a_2)/p(x_1) = 0{,}35{\cdot}0{,}4/0{,}56 = 0{,}25.$

Теперь мы знаем апостериорные вероятности, которыми характеризуются ветви, отходящие от узла случая и соответствующие событиям a_1 и a_2 (правый верхний угол рис. 1). Пока мы рассмотрели только один узел случая, к которому подходит ветвь d_1. Ко второму узлу случая подходит ветвь d_2, однако после разветвления в узле мы имеем те же два события a_1 и a_2, апостериорные вероятности которых будут равны уже вычисленным величинам – 0,75 и 0,25.

Полученные данные показывают, что оценка вероятности повышения цены товара возросла с 60 до 75 %, что является результатом обращения к брокеру и получения от него совета «покупать». Существенно возросло отношение вероятностей повышения и понижения цены, теперь оно составляет 0,75/0,25=3, в то время как прежде оно было равно 0,6/0,4=1,5. Значительно снизился риск потери 1000 дол. – с 40 до 25 %.

Проследим ветвь x_2 (совет «не покупать»), которая после узла решения дает ветви d_1 и d_2. Последние подходят к узлам случаев и разветвляются на ветви a_1 и a_2, для которых надо оценить апостериорные вероятности $p(a_1/x_2)$ и $p(a_2/x_2)$. Как и ранее, эти вероятности вычисляются по формуле Бейеса:

$p(a_1/x_2)=p(x_2/a_1)p(a_1)/(x_2)=[1–p(x_1/a_1)]p(a_1)/p(x_2)=0{,}3{\cdot}0{,}6/0{,}44=0{,}41;$

$p(a_2/x_2)=p(x_2/a_2)p(a_2)/p(x_2)=0{,}65{\cdot}0{,}4/0{,}44=0{,}59.$

Итак, всем ветвям дерева приписаны соответствующие вероятности. Подчеркнем, что при вычислениях мы использовали основные свойства вероятностей (формулу полной вероятности, формулу Бейеса), поэтому полученные величины сходятся (являются когерентными). Сходимость величин выражается прежде всего в том, что сумма вероятностей событий, составляющих полную группу, равна единице.

Следующий этап анализа дерева решений заключается в расчете оценок последствий решений, т.е. выгоды, получаемой при следовании по ветвям. В нашем случае эти оценки даются в виде денежных сумм, выражаемых в долларах. Они приведены на рис. 1 и характеризуют, во-первых, терминалы (конечные точки) рассматриваемого дерева и, во-вторых, все имеющиеся узлы. На рис. 1 даны четырехзначные оценки полезности последствий решений в долларах, причем на ветвях и на узлах дерева, образовавшихся после обращения к брокеру, к каждой оценке добавлена стоимость услуги брокера в виде отметки «минус t».

Как рассчитываются показатели полезности последствий? Расчет начинается с терминалов дерева и направлен к его стволу, т.е. идет справа налево. При этом необходимо придерживаться следующего правила: для каждого узла случаев надо вычислять математическое ожидание показателя, а при подходе к узлу решений нужно проводить максимизацию приписанных к соответствующим ветвям значений показателя (т.е. просто брать наибольшее из них).

Начнем анализ с правого верхнего угла рис. 1. Здесь имеется узел случаев с двумя ветвями, у первой – вероятность 0,75 и показатель последствий 6000, у второй – вероятность 0,25 и показатель 4000 (пока не будем учитывать стоимость консультации брокера, т.е. величину t). Математическое ожидание показателя для этого узла составит 0,75·6000 + 0,25·4000 = = 5500 дол. Аналогичный подсчет для второго узла случаев (он находится под первым) даст 0,75·5000 + 0,25·5000 = 5000 дол. Для третьего узла случаев получим 0,41·6000+0,59·4000=4800 дол. Четвертый узел случаев (он замыкает вертикальный ряд узлов в правой части рис. 1) будет характеризоваться математическим ожиданием показателя, равным 5000 дол.

Вернемся теперь к паре верхних узлов случаев, имеющих показатели 5500 и 5000. Ветвями d_1 и d_2 они соединяются с узлом решений, следовательно, здесь нужно провести максимизацию. Для этого из двух величин 5500 и 5000 выбираем наибольшую и присваиваем это значение данному узлу решений. Ветвь d_2 оказывается, таким образом, непригодной, на рисунке это отмечено ее перечеркиванием. Подход ко второму узлу решений (он находится под только что рассмотренным) должен также сопровождаться максимизацией. Из двух значений – 4800 и 5000 – выбираем последнее и считаем его показателем этого узла. Следование по ветви d_1 полагаем нецелесообразным, на рис. 1 она перечеркнута.

По аналогии, проводя максимизацию, отбрасываем из двух нижних ветвь d_2 (она перечеркнута на рис. 1). Остается рассмотреть две величины – 5280 и 5200, выбор одной из них зависит от стоимости услуги брокера. Именно теперь мы должны обратиться к величине t, о которой прежде умалчивали. В самом деле, теперь мы имеем оценки полезности последствий решений, одно из которых связано с обращением к брокеру (5280 – t дол.), а другое означает инвестировать без консультаций с брокером (5200 дол.). Сейчас можно с уверенностью сказать, что обращаться к брокеру стоит только в том случае, если за свой совет он возьмет меньше 80 дол. Мы получили эту величину как разницу между показателями ценности решений, представленными ветвями «брокер» и d_1, которые отходят от начального узла решений. Стало быть, если брокер запросит 50 дол., то стоит консультироваться с ним, а если он потребует 100, то не стоит.

Итак, мы не только нашли путь снижения риска потери (в данной задаче потери 1000 дол.), но также количественно оценили, во-первых, на сколько именно он снизится (в нашем случае с 40 до 25 %), и, во-вторых, разумный предел дополнительных вложений (не более 80 дол. за совет брокера), которые обеспечат указанное уменьшение риска.

Тот факт, что анализ дерева рискованных решений ведется от его терминалов к стволу, означает, что первыми рассматриваются те события, которые произошли последними. А то, что совершилось первым, проанализировано последним. Оказывается, что это приводит к фундаментальному выводу. В случае задачи об инвестициях он состоит в следующем: мы не можем решить, обращаться ли к брокеру, до тех пор, пока мы не определили, насколько выгоден его совет. В общем виде это можно сформулировать так: мы не можем решить, что сделать сегодня, пока не знаем всех последствий возможных решений. Интуитивно люди (конечно, не все) так и поступают, но далеко не всегда.

Пример 1.2. Главному инженеру компании надо решить, монтировать или нет новую производственную линию, использующую новейшую технологию. Если новая линия будет работать безотказно, компания получит прибыль 200 млн руб. Если же она откажет, компания может потерять 150 млн руб. По оценкам главного инженера, существует 60 % шансов, что новая производственная линия откажет. Можно создать экспериментальную установку, а затем уже решать, монтировать или нет производственную линию.

Эксперимент обойдется в 10 млн руб. Главный инженер считает, что существует 50 % шансов, что экспериментальная установка будет работать. Если экспериментальная установка будет работать, то 90 % шансов зато, что смонтированная производственная линия также будет работать. Если же экспериментальная установка не будет работать, то только 20 % шансов за то, что производственная линия заработает. Следует ли строить экспериментальную установку? Следует ли монтировать производственную линию? Какова ожидаемая стоимостная оценка наилучшего решения?

Решение

Строим дерево решений. Будем обозначать цифрами узлы решений, буквами – узлы случаев (рис. 2).

Сначала идет узел решений (1): возможны два варианта:

1) строить экспериментальную установку (расходы 10 млн);

2) не строить экспериментальную установку (расходы – 0).

Если мы решаем строить экспериментальную установку (узел случаев А), то вероятность того, что она будет работать, составляет 0,5, и что она не будет работать – тоже 0,5 (см. рис. 2).

Если экспериментальная установка будет работать, то снова принимаем решение (узел 2) монтировать или не монтировать производственную линию. Если мы монтируем производственную линию (узел B), то вероятность того, что производственная линия будет работать, составляет 0,9 (прибыль 200 млн), и что она не будет работать – 0,1 (убытки 150 млн). Если мы не монтируем производственную линию (узел C), то прибыль равна 0.

Если экспериментальная установка не будет работать, то принимаем решение (узел 3) монтироватьили не монтировать производственную линию. Если мы монтируем производственную линию (узел D), то вероятность того, что производственная линия будет работать, составляет 0,2 (прибыль 200 млн), и что она не будет работать – 0,8 (убытки 150 млн). Если мы не монтируем производственную линию (узел E), то прибыль равна 0.

Возвращаемся к узлу 1. Если мы не будем строить экспериментальную установку, то идет узел решений 4: монтировать или нет производственную линию. Если мы монтируем производственную линию (узел F), то вероятность того, что линия будет работать, составляет 0,4 (прибыль 200 млн), и что она не будет работать – 0,6 (убытки 150 млн). Если мы не монтируем линию (узел G), то прибыль равна 0.

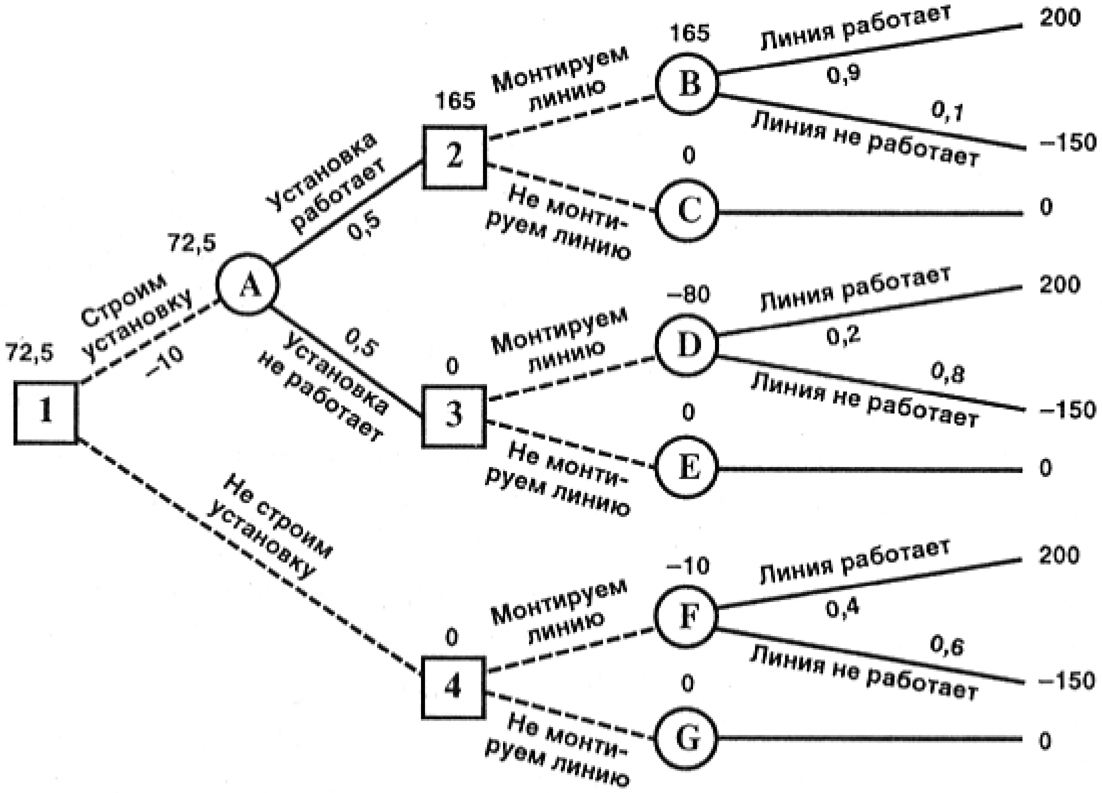

Рис. 2. Дерево решений в задаче о производственной линии

Теперь проведем анализ дерева решений.

В узле F возможны исходы «линия работает» с вероятностью 0,4 (что приносит прибыль 200) и «линия не работает» с вероятностью 0,6 (что приносит убыток -150) => оценка узла F: (F) = 0,4 · 200 + 0,6 · (-150) = -10. Это число мы пишем над узлом F.

Оценка узла (G) = 0.

В узле 4 мы выбираем между решением «монтируем линию» (оценка этого решения F = -10) и решением «не монтируем линию» (оценка этого решения G = 0). Наибольшим значением является 0. Эту оценку мы пишем над узлом 4, а решение «монтируем линию» отбрасываем и зачеркиваем.

Аналогично:

(B) = 0,9 · 200 + 0,1 · (-150) = 180 - 15 = 165.

(C) = 0.

Здесь наибольшее значение 165. Поэтому в узле 2 отбрасываем возможное решение «не монтируем линию». Над узлом 2 пишем 165.

(D) = 0,2 · 200 + 0,8 · (-150) = 40 – 120 = -80.

(E) = 0.

Здесь наибольшее значение 0. Поэтому в узле 3 отбрасываем возможное решение «монтируем линию». Над узлом 3 пишем 0.

(A) = 0,5 · 165 + 0,5 · 0 – 10 = 72,5.

Узел (l): выбираем между значениями узлов 4 (0) и А (72,5). Наибольшим здесь является значение 72,5. Поэтому в узле 1 отбрасываем возможное решение «не строим установку».

Ожидаемая стоимостная оценка наилучшего решения равна 72,5 млн руб. Строим установку. Если установка работает, то монтируем линию. Если установка не работает, то линию монтировать не надо.

Пример 1.3. Компания рассматривает вопрос о строительстве завода. Возможны три варианта действий.

А. Построить большой завод стоимостью M1 = 700 тыс. дол. При этом варианте возможны большой спрос (годовой доход в размере R1 = 280 тыс. дол. в течение следующих 5 лет) с вероятностью p1 = 0,8 и низкий спрос (ежегодные убытки R2 = 80 тыс. дол.) с вероятностью p2 = 0,2.

Б. Построить маленький завод стоимостью M2 = 300 тыс. дол. При этом варианте возможны большой спрос (годовой доход в размере T1 = 180 тыс. дол. в течение следующих 5 лет) с вероятностью p1 = 0,8 и низкий спрос (ежегодные убытки T2 = 55 тыс. дол.) с вероятностью p2 = 0,2.

В. Отложить строительство завода на один год для сбора дополнительной информации, которая может быть позитивной или негативной с вероятностью p3 = 0,7 и p4 = 0,3 соответственно. В случае позитивной информации можно построить заводы по указанным выше расценкам, а вероятности большого и низкого спроса меняются на p 5 = 0,9 и p6 = 0,1 соответственно. Доходы на последующие четыре года остаются прежними. В случае негативной информации компания заводы строить не будет.

1.2. Построение и анализ дерева решений с качественными оценками последствий

Пример 1.4. В предыдущем разделе рассмотрена ситуация, в которой оценками последствий решений служили денежные суммы, поэтому было целесообразно говорить об оценках выгоды этих решений. На практике приходится иметь дело не только с количественными, но и с качественными оценками, характеризующими последствия принятых решений. При этом термин «выгода» может оказаться неуместным, лучше использовать термин «оценка последствий» или «показатель ценности последствий». В качестве примера, требующего построения и анализа дерева решений с качественными оценками последствий, разберем задачу о медицинской операции.

Предположим, что лечащий врач должен решить, следует ли делать сложную и достаточно опасную операцию пациенту, у которого подозревается серьезное заболевание, например раковая опухоль. Если у данного пациента действительно есть опухоль и если ему сделать операцию, то шанс на выздоровление считается равным 50 %. Без операции этот шанс снижается в 10 раз и составляет всего 5 %, т.е. надеяться на выздоровление можно лишь в одном случае из 20. В то же время, если у пациента нет опухоли и он подвергнется операции, то вероятность вызванного ее последствиями смертельного исхода отнюдь не мала: один шанс из 5, т.е. 20 %. Если же опухоли нет и при этом не будет операции, то вероятность смерти можно считать нулевой (разумеется, в пределах сравнительно небольшого промежутка времени после принятия того или иного решения). Спрашивается, какое решение должен принять врач? Делать или не делать операцию при данных условиях? Добавим, что при построении дерева любые последствия будут приводить к одной и той же альтернативе: выздоровление или смерть (в реальной жизни бывают более сложные разветвления последствий, но мы ограничимся простым случаем).

Решение

Так как врач поставлен перед необходимостью принять одно из двух сформулированных выше решений, то дерево будет начинаться с узла решений с двумя отходящими ветвями «делать операцию» и «не делать» (рис. 3). Эти ветви подходят к узлам случаев, каждый из которых дает новую пару ветвей, связанных с наличием или отсутствием опухоли. Какие вероятности надо приписать ветвям «есть опухоль» и «нет опухоли»? В условии задачи ничего не сказано о надежности диагноза, поэтому можно сделать несколько оценок этой надежности. Пусть вероятность правильного диагноза составляет 0,75, тогда это значение нужно проставить на ветви «есть опухоль», в то время как ветви «нет опухоли» будет соответствовать вероятность неправильно поставленного диагноза, т.е. 0,25.

Как показывает рис. 3, ветви «есть опухоль» и «нет опухоли» идут от узлов случаев и заканчиваются новыми узлами случаев, после которых каждый раз имеем разветвление «выздоровление – смерть». Однако вероятности этих исходов будут каждый раз существенно разными. Направление, задаваемое ветвями «делать операцию» и «есть опухоль», приведет к узлу случаев, после которого шансы на выздоровление и летальный исход по условию задачи одинаковы (вероятность 0,5). Следуя направлению «делать операцию» – «нет опухоли», подойдем к узлу, за которым вероятность выздоровления составит 0,8, а вероятность смерти – 0,2. Направление «не делать» – «есть опухоль» дает узел с разветвлением, при котором вероятность выздоровления 0,05 (один шанс из 20), а вероятность смерти 0,95 (19 шансов из 20). Наконец, направление «не делать» – «нет опухоли» приводит к последнему узлу случаев, новые ветви которого характеризуются стопроцентным выздоровлением (вероятность смерти равна нулю).

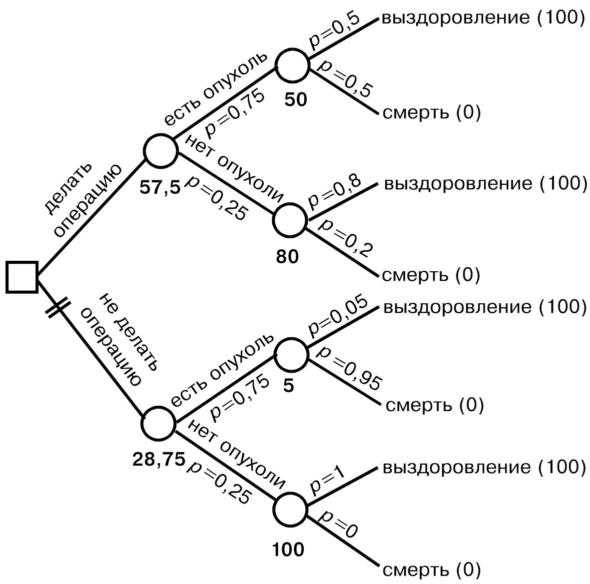

Рис. 3. Дерево решений в задаче о медицинской операции

В рассматриваемой ситуации отсутствуют количественные оценки последствий искомого решения, поэтому придется ввести условный показатель ценности этих последствий. Так как все терминалы полученного дерева представляют одну и ту же пару конечных результатов, то достаточно ввести всего две условных оценки последствий требуемого решения. Смертельный исход условимся оценивать нулем, а выздоровление – показателем, равным 100 (далее увидим, что абсолютная величина этой оценки не имеет значения, вместо 100 можно взять 1 или 10, или 1000 и т.д.).

Вспомним теперь, что анализ дерева решений ведется от его терминалов к стволу, т.е. справа налево. Напомним также, что все узлы случаев характеризуются математическими ожиданиями показателей ценности последствий и по ним выбирается ветвь на основе максимизации.

Начнем анализ с правого верхнего угла рис. 3. Находящемуся здесь узлу следует приписать математическое ожидание показателя последствий, равное сумме произведений вероятностей на соответствующие им возможные значения этого показателя: $0{,}5 \cdot 100 + 0{,}5 \cdot 0 = 50$. Второй узел случаев, который расположен под только что рассмотренным, будет иметь математическое ожидание показателя последствий, равное $0{,}8 \cdot 100 + 0{,}2 \cdot 0 = 80$. Для следующего узла (он находится под вторым узлом) получим значение показателя, которое составит $0{,}05 \cdot 100 + 0{,}95 \cdot 0 = 5$. Последний узел (в нижнем правом углу рисунка) получит значение показателя ценности последствий, равное $1 \cdot 100 + 0 \cdot 0 = 100$.

Далее необходимо рассмотреть два других узла случаев, каждый из которых связан с ветвями «есть опухоль» и «нет опухоли». Верхний из них характеризуется следующей величиной показателя последствий: 0,75·50+0,25·80=57,5. Нижний узел получит значение показателя, равное 0,75·5+0,25·100=28,75.

Теперь осталось провести максимизацию значений, полученных для только что рассмотренных узлов, поскольку в левой части дерева расположен узел решений. Наибольшей из двух величин является 57,5, ее и надо оставить. Эта величина характеризует узел с ветвью «делать операцию», следовательно, ответ на заданный вопрос получен. Ветвь, идущую к узлу с меньшим значением показателя последствий, т.е. ветвь «не делать», зачеркнем (что уже сделано на рис. 3).

Проведенный анализ позволяет дать количественную оценку снижения риска для решения «делать операцию». Она представляет собой отношение чисел 57,5 и 28,75. Поделив первое на второе, получим 2, т.е. в данном случае операция снижает риск летального исхода в два раза. Теперь должно быть понятно, почему не имела значения абсолютная величина показателя ценности последствий решения – она сокращается при делении первой величины на вторую. Так, если условное значение 100 заменить, например, на 10, то вместо величин 57,5 и 28,75 получатся соответственно 5,75 и 2,875, но их отношение, очевидно, не изменится.

Из-за отсутствия в условии задачи данных о надежности диагноза можно провести анализ при разных уровнях этой надежности. Легко показать, что если вместо рассмотренной выше надежности 75 % (p = 0,75) взять 100 % (абсолютно надежный диагноз: p = 1), то решение «делать операцию» станет предпочтительней не в 2, а в 10 раз. Иными словами, в новых (предельных) условиях диагностики операция снижает риск смерти в 10 раз.

2. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

2.1. Частость дополнительного риска

Пример 2.1.С целью оценки вредных воздействий некоторого токсического вещества проводились наблюдения за двумя группами, каждая из которых насчитывала по 100 чел. В контрольной группе выявлено 5 патологических случаев, а в группе лиц, подвергавшихся действию токсиканта, наблюдались 10 случаев такой же патологии. Найти частость дополнительного риска, вызванного данным веществом.

Решение

В данном примере $N_t = N_c$ =100, E_c= 5, E_t= 10. Сначала надо определить частостиq_t и q_c: $q_t = E_t/N_t$ = 10/100 = 0,1; $q_c = E_c/N_c$ = 5/100 = 0,05. Искомаячастостьq_eвычисляется по формуле

$q_e=(q_t-q_c)/(1-q_c)$=(0,1-0,05)/(1-0,05)=0,053.

Пример 2.2. Предварительная оценка дополнительного риска, возникающего при планируемом использовании некоторого канцерогена в химическом производстве, показала, что он может вызвать у рабочих (мужчин) заболевание раком легких с частостью, равной 0,25. Во сколько раз эта величина больше вероятности развития рака легких, никак не связанного с применением этого вещества?

Решение

Если работающие являются белыми мужчинами, то вероятность развития у них рака легких составляет 0,087. Эту величину можно принять за значение q_c, а по условию задачи $q_e = 0{,}25$.

Прежде всего надо получить значение q_t · $q_t{=}q_c{+}\ q_e(1{-}q_c)$. В данном случае $q_t{=}0{,}087{+}0{,}25{\cdot}(1{-}0{,}087){=}0{,}32$. Отношение $q_t/q_c = 0{,}32/0{,}087 \approx 3{,}7$. Таким образом, уровень риска заболеть раком легких превосходит базовое значение приблизительно в 4 раза.

2.2. Соотношение между дозой загрязнителя и откликом на нее

Пример 2.3. Вычислить частость дополнительного риска в следующих условиях. Группу риска составляют работающие в помещениях, воздух которых содержит токсикант с концентрацией 0,2 мг/м^3. Предполагается, что группа риска будет работать в этих помещениях ежедневно в течение 8 ч на протяжении 10 лет (считать, что в году 250 рабочих дней). Использовать соотношение между дополнительным риском и дозой, описываемое уравнением $q_e = 0{,}03\ \ln D{+}\ 0{,}05$. Последнее было получено в результате опытов над животными, в которых исследуемый интервал доз составлял 2000–20 000 мг, а отношение длительности времени экспериментов к средней продолжительности жизни животных равнялось 0,15.

Решение

В течение рабочего дня человек вдыхает 10 м^{3}воздуха. По условиям задачи c = 0,2 мг/м^3, а время накопления дозы t равно 250·10 = 2500 дней. Накопленная доза равна:

$$D = cvt = (0{,}2\ \text{мг/м}^3) \cdot (10\ \text{м}^3/\text{день}) \cdot (2500\ \text{дней}) = 5000\ \text{мг}.$$

Это количество находится в пределах вышеуказанного интервала исследованных доз. Время, равное 10 годам, соответствует доле 10/70 = 0,14 от средней продолжительности жизни человека (если полагать, что последняя составляет 70 лет) – это также практически совпадает с величиной, характеризующей условия экспериментов над животными. Таким образом, полученную в результате наблюдений формулу можно использовать и для оценки дополнительного риска, обусловленного действием рассматриваемого токсического вещества на людей. Искомая частость риска будет равна:

$$q_e = 0{,}03\ \ln 5000{+}\ 0{,}05 = 0{,}31.$$

2.2.1. Линейно-квадратичная модель оценки риска

Пример 2.4. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 100 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,1 мг. В этой группе было отмечено 11 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 9. Во второй группе риска было 80 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,5 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 18 против 10 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости **a, b** и найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,1.

Решение

В данной задаче $N_{t,1}$ = 100, D_1 = 0,1 мг, $N_{t,2}$ = 80, D_2 = 0,5 мг, $E_{t,1}$ = 11, $E_{c,1}$ = 9, $E_{t,2}$ = 18, $E_{c,2}$ = 10. Условия задачи позволяют вычислить частости дополнительного риска для каждой из исследованных групп:

$q_{e,1} =(q_{t,1} - q_{c,1})/(1 - q_{c,1})=[(E_{t,1}/N_{t,1})-(E_{c,1}/N_{t,1})]/(1- E_{c,1}/N_{t,1}) =$
$= [(11/100)-(9/100)]/(1-9/100) = 0{,}022,$

$q_{e,2}=(q_{t,2} - q_{c,2})/(1 - q_{c,2})=[(E_{t,2}/N_{t,2})-(E_{c,2}/N_{t,2})]/(1- E_{c,2}/N_{t,2}) =$
$= [(18/80)-(10/80)]/(1-10/80) = 0{,}114.$

Коэффициенты b и a определяются по уравнениям

$b = (q_{e,1}/ D_1 - q_{e,2}/ D_2)/(D_1 - D_2),$

$a = (q_{e,1} - b D_1^2)/ D_1$или $a = (q_{e,2} - b D_2^2)/ D_2$.

$b = [0{,}022/0{,}1 - 0{,}114)/0{,}5]/(0{,}1 - 0{,}5) = 0{,}02,$

$a = (0{,}022 - 0{,}02 \cdot 0{,}01)/0{,}1 = 0{,}22.$

Следовательно, линейно-квадратичная модель зависимости частости риска от дозы в данном случае имеет вид

$q_e = 0{,}22D + 0{,}02D^2.$

Значение дозы, соответствующее заданной частости риска q_e = 0,1, вычисляется по уравнению

$D = (- a \pm \sqrt{a^2 + 4bq_e})/2b,$

$D = [- 0{,}22 \pm \sqrt{(0{,}22)^2 + 4 \cdot 0{,}02 \cdot 0{,}1}\,] / (2 \cdot 0{,}02),$

D_1= 0,42 мг, D_2 = –11,5 мг.

Квадратное уравнение дает два решения, второе из них надлежит отбросить, поскольку доза не может быть отрицательной. Таким образом, искомое значение дозы D = 0,42 мг.

2.2.2. Линейный характер связи между дозой и откликом

Пример 2.5. В питьевой воде по месту проживания некоторой семьи определена концентрация загрязнителя, равная 3 мкг/л. В процессе экспериментальных наблюдений над его действием установлено, что наименьшей из изученных доз $D_{мин}$ = 200 мг соответствует частость риска $q_{e,\ мин}$, равная 0,1. Эксперименты проводились с животными в течение периода времени, составившего 0,3 их средней продолжительности жизни. Как оценить дополнительный риск, которому будет подвергаться данная семья после 10 лет проживания в этом месте, если считать, что рассматриваемое вещество относится кбеспороговым?

Решение

При расчетах риска, связанного с вредными веществами в питьевой воде, принято считать, что каждый человек потребляет в среднем 2,2 л в день. Следовательно, за 10 лет (3650 дней) суммарная доза составит: $D = cvt$ = (3 мкг/л)(2,2 л/день)(3650 дней) = 24,1 мг. Эта величина значительно меньше минимально исследованной дозы, поэтому надо провести экстраполяцию в область малых доз, предполагая линейную зависимость частости риска от дозы. Очевидно, что такая экстраполяция внесет свою погрешность в оценку риска. Время 10 лет составляет следующую долю от средней продолжительности жизни человека: 10/70 = 0,14. Это существенно меньше доли 0,3, характеризующей условия опытов. Таким образом, добавляется еще один источник погрешности в оценке риска. Фактор риска определяется по формуле

$$F_r = q_{e,мин}/D_{мин} = 0{,}1/200 = 5\cdot10^{-4}\ мг^{-1}.$$

Дополнительный риск, которому подвергаются члены рассматриваемой семьи, характеризуется частостью

$$q_e = F_r D = (5\cdot10^{-4}\ мг^{-1})(24{,}1\ мг) = 0{,}01.$$

2.3. Оценка допустимых концентраций беспороговых токсикантов

Пример 2.6. Ввод в эксплуатацию некоторого промышленного объекта сопряжен с выбросом в атмосферу загрязнителя-канцерогена. Рассчитать его допустимую концентрацию при следующих условиях:

- допустимый для всей жизни человека индивидуальный риск, обусловленный присутствием в окружающей среде всех канцерогенов, принять равным $5\cdot10^{-6}$;
- устанавливаемый для всей жизни человека индивидуальный риск, вызванный присутствием ранее имеющихся k–1 канцерогенов в окружающей среде с допустимыми концентрациями, составляет $2\cdot10^{-6}$;
- фактор риска нового канцерогена, отнесенный ко всей продолжительности жизни, равен $1\cdot10^{-5}$ мг$^{-1}$;
- время ежедневной экспозиции новому канцерогену – 8 ч.

Решение

Средняя скорость поступления воздуха в организм составляет для населения 20 м^3 в день. Ежедневное поступление загрязненного воздуха будет равно

8 ч /24 ч · 20 м^3/день = 6,66 м^3/день. Величину c_k можно определить по формуле

c_k= ((5·10^{-6}–2·10^{-6})/(25550·1·10^{-5} ·6,66)=1,8·10^{-6} мг/м^3 =1,8·10^{-3} мкг/м^3.

Пример 2.7. Рассчитать допустимую для населения концентрацию в воздухе канцерогена, который поступает в атмосферу 16 ч ежедневно и характеризуется фактором риска, равным 1·10^{-5} мг$^{-1}$. Значение допустимого риска, задаваемое для продолжительности всей жизни, принять равным 5·10^{-6}.

Решение

Как и в предыдущем примере, в качестве значения средней скорости поступления воздуха в организм следует принять 20 м^3/день. Ежедневное поступление загрязненного воздуха будет равно 16 ч / 24 ч · 20 м^3/день = = 13,3 м^3/день. Тогда получим:

c_k = 5·10^{-6} / (25550·1·10^{-5} ·13,3) = 1,5·10^{-6} мг/ м^3 = 1,5·10^{-3} мкг/м^3.

Пример 2.8. Ввод в эксплуатацию некоторого промышленного объекта может сопровождаться выбросом в атмосферу канцерогена. Рассчитать его допустимую концентрацию исходя из предельно допустимого количества дополнительных случаев онкологических заболеваний. Расчет произвести при следующих условиях:

- допустимое количество дополнительных раковых заболеваний, вызываемых ежегодно вследствие наличия в окружающей среде всех канцерогенов, принять равным 1;
- количество дополнительных раковых заболеваний, обусловленное канцерогенами, уже присутствующими в среде обитания, составляет 0,8 в год;
- количество людей, подвергающихся воздействию рассматриваемого канцерогена, составляет 10^6;
- фактор риска рассматриваемого канцерогена равен 1·10^{-5} мг$^{-1}$;
- время ежедневной экспозиции новому канцерогену – 8 ч.

Решение

Скорость поступления воздуха в организм составляет 20 м^3/день. Тогда получим:

c_k = (1 – 0,8)/ (365 ·1·10^{-5} (8/24)·20·10^6) = 8·10^{-6} мг/ м^3 = 0,008 мкг/ м^3.

Пример 2.9. Рассчитать допустимую концентрацию в воздухе канцерогена, который будет поступать в атмосферу ежедневно в течение 8 ч. Фактор риска канцерогена равен 1·10^{-5} мг$^{-1}$; количество людей, которые будут подвергаться его действию, составляет 5·10^4. Считать, что допустимое количество дополнительных раковых заболеваний составляет 0,1 в год.

Решение

Скорость поступления воздуха в организм составляет 20 м^3/день. Тогда получим

c_k = 0,1/ (365·1·10^{-5} ·(8/24)·20 · 5·10^4) = 8·10^{-5} мг/ м^3 = 0,08 мкг/ м^3.

Пример 2.10. Рассчитать для персонала допустимую концентрацию загрязнителя в воздухе рабочих помещений, если им является канцероген с фактором риска, равным 1·10^{-5} мг$^{-1}$. Допустимый индивидуальный риск, обусловленный рассматриваемым канцерогеном и устанавливаемый для полного рабочего стажа, составляет 1·10^{-4}.

Решение

Скорость поступления загрязненного воздуха в помещение составляет 2,5·10^3 м^3/год; при числе рабочих дней в году, равном 250, это соответствует 10 м^3/день.Тогда получим:

c_k = 1·10^{-4} / (10^4·1·10^{-5}· 10) = 1·10^{-4} мг/ м^3 = 0,1 мкг/ м^3.

Пример 2.11. В течение 30 лет персонал некоторого промышленного объекта может подвергаться воздействию трех находящихся в воздухе канцерогенов. Концентрации этих загрязнителей, усредненные по длительности рабочего дня, составляют соответственно 5, 10 и 15 мкг/м^3, а их допустимые концентрации равны соответственно 20, 30 и 40 мкг/м^3. Величины последних получены на основе одного и того же значения допустимого риска (равного 1·10^{-4}) и установлены для всего 30-летнего стажа. Превышает ли суммарный риск, обусловленный действием трех канцерогенов, заданную величину допустимого риска, равную 1·10^{-4}?

Решение

При воздействии нескольких канцерогенов должно соблюдаться условие

$$\sum_{j=1}^{k}(\bar{c}_j / c_j) = (\bar{c}_1 / c_1) + (\bar{c}_2 / c_2) + \cdots + (\bar{c}_k / c_k) \le 1.$$

Для нашего случая оно будет выглядеть:

$$(5/20) + (10/30) + (15/40) = 0{,}96 < 1.$$

Поскольку условие выполнено, суммарный риск не должен превзойти величину, равную 1·10^{-4}.

Пример 2.12. Рассчитать допустимую усредненную по времени рабочего дня концентрацию канцерогена в воздухе рабочего помещения при следующих условиях:

- фактор риска F_{rk} канцерогена составляет 1·10^{-5} мг$^{-1}$;
- количество людей, подвергающихся воздействию канцерогена, N_k = 400;
- допустимое количество дополнительных случаев онкологических заболеваний q_e = 0,1 в год.

Решение

Скорость поступления воздуха в организм работающих составляет 10 м^3/день. Используя формулу

$$c_k = q_e./\ (250F_{rk}v_kN_k),$$

получим

$$c_k = 0{,}1/\ 250\cdot\ 1\cdot10^{-5}\cdot10\cdot400 = 0{,}01\text{мг/м}^3 = 10\ \text{мкг/м}^3\ .$$

Пример 2.13. Группа рабочих подвергается воздействию трех канцерогенных веществ. Усредненные за рабочий день концентрации канцерогенов равны соответственно 10, 15 и 20 мкг/м^3, а допустимые концентрации составляют 60, 70 и 80 мкг/м^3 соответственно. Каждое из значений допустимой концентрации установлено с учетом числа работников и предполагает, что допустимое количество дополнительных случаев раковых заболеваний составляет 0,5 в год. Превысит ли этот принятый допустимый уровень (0,5 год$^{-1}$) полное количество дополнительных случаев рака, вызванное действием трех канцерогенов?

Решение

По неравенству

$$\sum_{j=1}^{k}(\bar{c}_j\ /\ c_j) = (\bar{c}_1\ /\ c_1) + (\bar{c}_2\ /\ c_2) + \cdots + (\bar{c}_k\ /\ c_k) \le 1$$

имеем:

$$(10/60) + (15/70) + (20/80) = 0{,}63<1.$$

Так как сумма отношений меньше единицы, количество дополнительных случаев онкологических заболеваний не должно превзойти установленного уровня.

2.4. Оценка допустимых концентраций пороговых токсикантов

Пример 2.14. Опыты по воздействию некоторого токсиканта на животных в течение короткого промежутка времени установили, что значение H_{NOAEL} составляет 1 мг/кг·день. Ни по биокинетике, ни по чувствительности людей к этому токсиканту данных нет. Как оценить значение H_{NOAEL} для людей в предположении, что рассматриваемыйтоксикант действует на них в течение всего времени жизни?

Решение

В данном случае значения коэффициентов неопределенности будут следующими. Коэффициент F_1 = 10, поскольку данные по биокинетическим особенностям и механизмам токсичности отсутствуют и возможны проявления межвидовых различий в чувствительности к нему животных и людей. Коэффициент F_2 = 1, так как нет сведений о том, что возможны существенные вариации индивидуальной чувствительности людей к рассматриваемому токсиканту. Коэффициент F_3=10, так как требуется определить значение H_{NOAEL} для всей жизни человека, а экспериментальные данные по H_{NOAEL} получены из кратковременных наблюдений.

Таким образом, по формуле $H_{D,A} = H_{D,T} /(F_1F_2F_3)$:

$$H_{NOAEL\text{-}A} = H_{NOAEL}/(10 \cdot 1 \cdot 10) = 0{,}01 \text{ мг/кг·день}.$$

Пример 2.15. Рассчитать допустимую концентрацию в воздухе порогового токсиканта, позволяющую предотвратить его неблагоприятное воздействие (в виде отдаленных эффектов) на жителей, постоянно проживающих в загрязненной местности (f =1). Наиболее подходящим к данным условиям оказалось значение пороговой мощности дозы ($H_{NOAEL\text{-}A}$), полученное в результате экспериментов над животными, включавших длительные экспозиции и наблюдения над отдаленными последствиями. Оно составило 2 мг/кг·день при f = 0,65.

Решение

Полное время воздействия токсиканта T_k = 365·70 = 25550 дней. Его скорость ингаляционного поступления в организм v_k=20 м^3/день. Поскольку в рассматриваемом случае f = 1, то можно считать, что его значение не очень сильно отличается от величины 0,65, которая характеризует опыты с животными.

По формуле

$$c_k = H_{NOEL\text{-}A} \text{ (или} H_{NOAEL\text{-}A}) \ 70 \, f \, 365 \cdot 70 / v_k T_{k,}$$

где c_k – допустимая концентрация k-го токсиканта, выраженная в количестве мг на единицу массы или объема загрязненной среды;

$H_{NOEL\text{-}A}$ и $H_{NOAEL\text{-}A}$ – скорректированные пороговые мощности дозы;

f – отношение длительности экспозиции токсиканту к средней продолжительности жизни;

v_k – ежедневное поступление воздуха, воды или пищи в организм человека (в единицах массы или объема),

T_k – длительность воздействия k-го токсиканта (время экспозиции). Сомножитель 1,79·10^6 равен произведению трех величин: средней массы тела взрослого человека (70 кг), количества дней в году – 365, средней продолжительности жизни человека (70 лет).

Имеем:

$$c_k = 1{,}79 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 0{,}65 /(20 \cdot 25550) = 4{,}56 \text{ мг/м}^3.$$

Пример 2.16. Рассчитать допустимую концентрацию в питьевой воде порогового токсиканта, позволяющую предотвратить его неблагоприятное воздействие (в виде быстропроявляемых эффектов) на жителей, употреблявших загрязненную этим токсикантом воду в течение 120 дней. Наиболее подходящим к данным условиям оказалось значение пороговой мощности дозы $H_{NOAEL\text{-}A}$, полученное в результате экспериментов над животными, включавших кратковременные экспозиции и наблюдения над задержанными последствиями. Это значение составило 0,3 мг/кг·день при $f = 0{,}005$.

Решение

Полное время воздействия токсиканта $T_k = 120$ дней. Скорость поступления токсиканта в организм с питьевой водой $v_k = 2{,}2$ л/день. Значение коэффициента f для человека в данном случае составляет $f = 120/(365{\cdot}70) = 0{,}005$; это совпадает с величиной f, которая характеризует опыты с животными. По формуле

$$c_k = H_{NOEL\text{-}A}\ (\text{или}\ H_{NOAEL\text{-}A})\ 70\, f\, 365{\cdot}70/v_k T_k,$$

где c_k – допустимая концентрация k-го токсиканта, выраженная в количестве мг на единицу массы или объема загрязненной среды;

$H_{NOEL\text{-}A}$ и $H_{NOAEL\text{-}A}$ – скорректированные пороговые мощности дозы;

f – отношение длительности экспозиции токсиканту к средней продолжительности жизни;

v_k – ежедневное поступление воздуха, воды или пищи в организм человека (в единицах массы или объема),

T_k – длительность воздействия k-го токсиканта (время экспозиции). Сомножитель $1{,}79{\cdot}10^6$ равен произведению трех величин: средней массы тела взрослого человека (70 кг), количества дней в году – 365, средней продолжительности жизни человека (70 лет).

Получаем:

$$c_k = 1{,}79{\cdot}10^6{\cdot}\ 0{,}3 \cdot 0{,}005\ /2{,}2{\cdot}120 = 10{,}2 \text{ мг/л}.$$

Пример 2.17. Рассчитать допустимую концентрацию в пище порогового токсиканта, позволяющую предотвратить его неблагоприятное воздействие (в виде отдаленных эффектов) на жителей, употребляющих загрязненную этим токсикантом пищу на протяжении всей жизни. Наиболее подходящим к данным условиям оказалось значение пороговой мощности дозы $H_{NOAEL\text{-}A}$, полученное в результате экспериментов над животными, включавших длительные экспозиции и наблюдения над отдаленными последствиями. Это значение оказалось равным 0,1 мг/кг·день при $f = 0{,}7$.

Решение

Полное время воздействия токсиканта $T_k = 365{\cdot}70 = 25550$ дней. Скорость поступления токсиканта в организм с пищей $v_k = 1{,}5$ кг/день. Коэффициент f для людей в рассматриваемом случае равен единице – можно считать, что его значение не очень сильно отличается от величины 0,7, которая характеризует опыты с животными.

Применяем формулу

$$c_k = H_{NOEL\text{-}A}\ (\text{или}\ H_{NOAEL\text{-}A})70\, f\, 365{\cdot}70/v_k T_k,$$

где c_k – допустимая концентрация k-го токсиканта, выраженная в количестве мг на единицу массы или объема загрязненной среды;

$H_{NOEL\text{-}A}$ и $H_{NOAEL\text{-}A}$ – скорректированные пороговые мощности дозы;

f – отношение длительности экспозиции токсиканту к средней продолжительности жизни;

v_k – ежедневное поступление воздуха, воды или пищи в организм человека (в единицах массы или объема),

T_k – длительность воздействия k-го токсиканта (время экспозиции). Сомножитель $1{,}79 \cdot 10^6$ равен произведению трех величин: средней массы тела взрослого человека (70 кг), количества дней в году – 365, средней продолжительности жизни человека (70 лет).

$$c_k = 1{,}79 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}7 / 1{,}5 \cdot 25550 = 3{,}3 \text{ мг/кг.}$$

Пример 2.18. Рассчитать допустимую концентрацию в воздухе порогового токсиканта, позволяющую исключить его неблагоприятное воздействие (в виде отдаленных эффектов) на персонал, работающий в загрязненных условиях 8 ч ежедневно в течение 20 лет. Число рабочих дней в году – 250. Наиболее подходящим к данным условиям оказалось значение пороговой мощности дозы $H_{NOEL\text{-}A}$, полученное в результате экспериментов над животными, включавших длительные экспозиции и наблюдения над отдаленными последствиями. Это значение составило 0,1 мг/кг·день при $f = 0{,}2$.

Решение

Полное время воздействия токсиканта $T_k = 250 \cdot 20 = 5000$ дней. Скорость ингаляционного поступления токсиканта в организм $v_k = 10$ м^3/день. Коэффициент f для человека в рассматриваемом случае равен $250 \cdot 20/(365 \cdot 70) = 0{,}2$; это значение точно совпадает с величиной, которая характеризует опыты с животными.

По формуле $c_k = H_{NOEL\text{-}A}$ (или $H_{NOAEL\text{-}A}$) $70 f\, 365 \cdot 70 / v_k T_k$,

где c_k – допустимая концентрация k-го токсиканта, выраженная в количестве мг на единицу массы или объема загрязненной среды;

$H_{NOEL\text{-}A}$ и $H_{NOAEL\text{-}A}$ – скорректированные пороговые мощности дозы;

f – отношение длительности экспозиции токсиканту к средней продолжительности жизни;

v_k – ежедневное поступление воздуха, воды или пищи в организм человека (в единицах массы или объема),

T_k – длительность воздействия k-го токсиканта (время экспозиции). Сомножитель $1{,}79 \cdot 10^6$ равен произведению трех величин: средней массы тела взрослого человека (70 кг), количества дней в году – 365, средней продолжительности жизни человека (70 лет). Вычисляем:

$$c_k = 1{,}79 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}2 / 10 \cdot 5000 = 0{,}72 \text{ мг/м}^3.$$

Пример 2.19. Персонал подвергается воздействию присутствующих в воздухе трех пороговых токсикантов, относящихся к одному и тому же классу. Усредненные за рабочий день концентрации токсикантов равны соответственно 15, 25 и 40 мкг/м^3. Установленная допустимая концентрация каждого загрязнителя позволяет предотвратить отдаленные последствия, они базируются на значениях пороговой мощности дозы $H_{NOEL\text{-}A}$, полученных в результате длительных экспериментов с животными с наблюдениями отдаленных эффектов. Величины этих допустимых концентраций составляют 30, 100 и 200 мкг/м^3 соответственно. Будет ли превышен комбинированный порог?

Решение

По условию $\sum_{j=1}^{k}(\bar{c}_j / c_j) = (\bar{c}_1 / c_1) + (\bar{c}_2 / c_2) + \cdots + (\bar{c}_k / c_k) \le 1$.

Получим: (15/30)+(25/100)+(40/200) = 0,95 <1.

Комбинированный порог не превзойден, следовательно, отдаленные последствия не должны иметь места.

Пример 2.20. Рассчитать предельно допустимую концентрацию порогового токсиканта в воздухе, воде и пище, необходимую для предотвращения немедленных эффектов его воздействия на население. Наиболее подходящим к данным условиям оказались значения пороговой мощности дозы $H_{NOAEL\text{-}A}$, полученные в результате экспериментов над животными, включавших кратковременные экспозиции и наблюдения над последствиями.

а. Для воздуха значение пороговой мощности $H_{NOAEL\text{-}A}$ составило 0,2 мг/кг·день.

Решение

Скорость поступления воздуха в организм человека составляет 20 м^3/день. Используя выражение$c_k = (H_{NOEL\text{-}A}$или$H_{NOAEL\text{-}A})\ 70/v_k$, получим

$$c_k = 0{,}2 \cdot 70/20 = 0{,}7 \text{ мг/м}^3.$$

б. Для воды значение пороговой мощности $H_{NOAEL\text{-}A}$ составило 0,5 мг/кг·день.

Решение

Скорость поступления воды в организм человека составляет 2,2 л/день. Используя выражение$c_k = (H_{NOEL\text{-}A}$или$H_{NOAEL\text{-}A})\ 70/v_k$, получим

$$c_k = 0{,}5 \cdot 70/2{,}2 = 16 \text{ мг/л}.$$

в. Для пищи значение пороговой мощности $H_{NOAEL\text{-}A}$ составило 0,1 мг/кг·день.

Решение

Скорость поступления пищи в организм человека составляет 1,5 кг/день. Из выражения$c_k = (H_{NOEL\text{-}A}$или$H_{NOAEL\text{-}A})\ 70/v_k$ следует:

$$c_k = 0{,}1 \cdot 70/\ 1{,}5 = 4{,}7 \text{ мг/кг}.$$

Пример 2.21. Рассчитать предельно допустимую концентрацию порогового токсиканта в воздухе, необходимую для предотвращения немедленных эффектов воздействия этого токсиканта на персонал. Значение пороговой мощности дозы $H_{NOAEL\text{-}A}$, полученное в результате экспериментов над животными, включавших кратковременные экспозиции и наблюдения над последствиями, составило 1,2 мг/кг·день.

Решение

Скорость поступления воздуха в организм человека за рабочий день составляет 10 м^3/день. Из выраженияc_k = (H_{NOEL-A}или$H_{NOAEL-A}$) 70/v_k следует: c_k=1,2·70/10= 8,4 мг/м^3.

Пример 2.22. Персонал подвергается воздействию присутствующих в воздухе трех пороговых токсикантов, принадлежащих одному и тому же классу. Усредненные за рабочий день концентрации этих загрязнителей равны соответственно 3, 9 и 12 мкг/м^3. Установленные предельно допустимые концентрации токсикантов, которые позволяют предотвратить немедленные последствия, базируются на значениях пороговой мощности дозы H_{NOEL-A}, полученных в результате кратковременных экспериментов с животными. Величины этих допустимых концентраций составляют 20, 30 и 40 мкг/м^3 соответственно. Будет ли превышен комбинированный порог?

Решение

По условию $\sum_{j=1}^{k}(\bar{c}_j / c_j) = (\bar{c}_1 / c_1) + (\bar{c}_2 / c_2) + \cdots + (\bar{c}_k / c_k) \le 1$.

Имеем:

$$(3/20)+(9/30)+(12/40) = 0{,}75 <1.$$

Комбинированный порог не превзойден, поэтому немедленные последствия не должны иметь места.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Задание 1

Предприятие платит штрафы за сброс сточных вод **a** млн руб. в год.

Возможны три варианта действий

1. Построить очистные сооружения стоимостью **b** млн руб. по новейшей технологии. Вероятность того, что сооружения будут работать нормально, **c** %. Если сооружения будут работать нормально, то штрафы будут равны 0.

2. Построить очистные сооружения стоимостью **d** млн руб. по традиционной технологии. Вероятность того, что сооружения будут работать нормально, **e** %. Если сооружения будут работать нормально, то штрафы будут равны **f** млн руб.

3. Отложить строительство на **n** лет. Сначала построить опытную установку стоимостью **l** млн руб. Вероятность того, что установка будет работать нормально, **m** %.

Если установка будет работать нормально, то предприятие будет строить очистные сооружения по новейшей технологии. Вероятность того, что сооружения будут работать нормально, **p** %. Если сооружения будут работать нормально, то штрафы будут равны 0.

Если установка не будет работать, то предприятие будет строить очистные сооружения по традиционной технологии. Вероятность того, что сооружения будут работать нормально, **e** %. Если сооружения будут работать нормально, то штрафы будут равны **f** млн руб.

Какова ожидаемая стоимостная оценка наилучшего решения за период **k** лет?

Значения коэффициентов принимать по табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов

Варианты	**a**	**b**	**c**	**d**	**e**	**f**	**n**	**l**	**m**	**p**	**k**
1	5	10	40	5	90	2	1	1	45	90	10
2	10	25	50	15	95	3	2	1	50	95	20
3	12	20	30	10	90	3	1	2	40	90	30
4	20	30	40	12	92	6	2	2	45	95	15
5	25	40	45	15	90	8	1	3	50	90	20
6	5	10	30	5	90	2	1	1	45	95	25
7	10	25	35	15	95	3	2	1	50	90	30
8	15	20	40	10	90	3	1	1	40	95	10
9	20	30	30	12	92	6	2	2	45	90	15
10	25	40	35	15	90	8	1	2	50	95	20

Задание 2

Вариант 1

Объемы поступления воды и воздуха в организм человека приведены в приложении.

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 200 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,2 мг. В этой группе было отмечено 13 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 10. Во второй группе риска было 120 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,6 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 16 против 8 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,15, и частость дополнительного риска при дозе 0,4 мг.

2. Рассчитать допустимую для населения концентрацию в воздухе канцерогена, который поступает в атмосферу 16 ч ежедневно и характеризуется фактором риска, равным $2 \cdot 10^{-5}$ мг$^{-1}$. Значение допустимого риска, задаваемое для продолжительности всей жизни, принять равным $5 \cdot 10^{-6}$.

Вариант 2

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 200 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,1 мг. В этой группе было отмечено 16 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 14. Во второй группе риска было 100 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,6 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 15 против 7 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,2, и частость дополнительного риска при дозе 0,8 мг.

2. В питьевой воде по месту проживания некоторой семьи определена концентрация загрязнителя, равная 5 мкг/л. В процессе экспериментальных наблюдений над его действием установлено, что наименьшей из изученных доз $D_{\text{мин}}$ = 300 мг соответствует частость риска $q_{e,\ \text{мин}}$, равная 0,12. Эксперименты проводились с животными в течение периода времени, составившего 0,5 их средней продолжительности жизни. Как оценить дополнительный риск, которому будет подвергаться данная семья после 40 лет проживания в этом месте, если считать, что рассматриваемое вещество относится кбеспороговым?

Вариант 3

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 200 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,2 мг. В этой группе было отмечено 13 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 10. Во второй группе риска было 120 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,6 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 16 против 8 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,15, и частость дополнительного риска при дозе 0,4 мг.

2. Рассчитать для персонала допустимую концентрацию загрязнителя в воздухе рабочих помещений, если им является канцероген с фактором риска, равным $1{\cdot}10^{-5}$ мг$^{-1}$. Допустимый индивидуальный риск, обусловленный рассматриваемым канцерогеном и устанавливаемый для полного рабочего стажа, составляет $1{\cdot}10^{-4}$.

Вариант 4

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 200 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,1 мг. В этой группе было отмечено 16 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 14. Во второй группе риска было 100 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,6 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 15 против 7 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,2, и частость дополнительного риска при дозе 0,8 мг.

2. Рассчитать допустимую усредненную по времени рабочего дня концентрацию канцерогена в воздухе рабочего помещения при следующих условиях:

- фактор риска F_{rk} канцерогена составляет $1{\cdot}10^{-5}$ мг$^{-1}$;
- количество людей, подвергающихся воздействию канцерогена, $N_k = 400$;
- допустимое количество дополнительных случаев онкологических заболеваний $q_e = 0{,}1$ в год.

Вариант 5

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 500 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,2 мг. В этой группе было отмечено 36 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 30. Во второй группе риска было 400 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,5 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 40 против 20 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,3, и частость дополнительного риска при дозе 0,8 мг.

2. Рассчитать допустимую концентрацию в воздухе канцерогена, который будет поступать в атмосферу ежедневно в течение 24 ч. Фактор риска канцерогена равен $2{\cdot}10^{-5}$ мг$^{-1}$; количество людей, которые будут подвергаться его действию, составляет $8{\cdot}10^{4}$. Считать, что допустимое количество дополнительных раковых заболеваний составляет 0,1 в год.

Вариант 6

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 300 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,4 мг. В этой группе было отмечено 18 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 15. Во второй группе риска было 160 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,8 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 20 против 10 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,15, и частость дополнительного риска при дозе 0,6 мг.

2. Рассчитать допустимую концентрацию в воздухе порогового токсиканта, позволяющую предотвратить его неблагоприятное воздействие (в виде отдаленных эффектов) на жителей, постоянно проживающих в загрязненной местности (f = 1). Наиболее подходящим к данным условиям оказалось значение пороговой мощности дозы ($H_{NOAEL\text{-}A}$), полученное в результате экспериментов над животными, включавших длительные экспозиции и наблюдения над отдаленными последствиями. Оно составило 3 мг/кг·день при f = 0,75.

Вариант 7

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 200 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,2 мг. В этой группе было отмечено 13 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 10. Во второй группе риска было 120 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,6 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 16 против 8 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,15, и частость дополнительного риска при дозе 0,4 мг.

2. Рассчитать допустимую концентрацию в питьевой воде порогового токсиканта, позволяющую предотвратить его неблагоприятное воздействие (в виде быстропроявляемых эффектов) на жителей, употреблявших загрязненную этим токсикантом воду в течение 160 дней. Наиболее подходящим к данным условиям оказалось значение пороговой мощности дозы $H_{NOAEL\text{-}A}$, полученное в результате экспериментов над животными, включавших кратковременные экспозиции и наблюдения над задержанными последствиями. Это значение составило 0,4 мг/кг·день при f = 0,01.

Вариант 8

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 200 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,1 мг. В этой группе было отмечено 16 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 14. Во второй группе риска было 100 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,6 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 15 против 7 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,2, и частость дополнительного риска при дозе 0,8 мг.

2. Рассчитать предельно допустимую концентрацию порогового токсиканта в воде, необходимую для предотвращения немедленных эффектов воздействия этого токсиканта на персонал. Значение пороговой мощности дозы $H_{NOAEL\text{-}A}$, полученное в результате экспериментов над животными, включавших кратковременные экспозиции и наблюдения над последствиями, составило 1,4 мг/кг·день.

Вариант 9

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 160 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,2 мг. В этой группе было отмечено 16 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 14. Во второй группе риска было 80 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,8 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 12 против 5 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,15, и частость дополнительного риска при дозе 0,6 мг.

2. Ввод в эксплуатацию некоторого промышленного объекта может сопровождаться выбросом в атмосферу канцерогена. Рассчитать его допустимую концентрацию исходя из предельно допустимого количества дополнительных случаев онкологических заболеваний. Расчет произвести при следующих условиях:

- допустимое количество дополнительных раковых заболеваний, вызываемых ежегодно вследствие наличия в окружающей среде всех канцерогенов, принять равным 1;
- количество дополнительных раковых заболеваний, обусловленное канцерогенами, уже присутствующими в среде обитания, составляет 0,8 в год;

- количество людей, подвергающихся воздействию рассматриваемого канцерогена, составляет 10^6;
- фактор риска рассматриваемого канцерогена равен $1 \cdot 10^{-5}$ мг$^{-1}$;
- время ежедневной экспозиции новому канцерогену – 8 ч.

Вариант 10

1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 180 чел., каждый из которых получил дозу токсиканта, равную 0,3 мг. В этой группе было отмечено 18 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 15. Во второй группе риска было 120 чел., каждый из них получил дозу, равную 0,6 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 14 против 8 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости (а и б), найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,2, и частость дополнительного риска при дозе 0,8 мг.

2. Ввод в эксплуатацию некоторого промышленного объекта сопряжен с выбросом в атмосферу загрязнителя-канцерогена. Рассчитать его допустимую концентрацию при следующих условиях:

- допустимый для всей жизни человека индивидуальный риск, обусловленный присутствием в окружающей среде всех канцерогенов, принять равным $5 \cdot 10^{-6}$;
- устанавливаемый для всей жизни человека индивидуальный риск, вызванный присутствием ранее имеющихся k–1 канцерогенов в окружающей среде с допустимыми концентрациями, составляет $3 \cdot 10^{-6}$;
- фактор риска нового канцерогена, отнесенный ко всей продолжительности жизни, равен $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ мг$^{-1}$;
- время ежедневной экспозиции новому канцерогену – 16 ч.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин, В.Ф. Научно-методические аспекты риска [Текст] // Атомная энергия. № 1. 1999. С. 12-15.

2. Мягков, С.М. География природного риска [Текст]. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 211 с.

3. Меньшиков, В.В. Концептуальные основы оценки экологического риска [Текст]: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2003. 264 с.

4. Израэль, Ю.А. Экология и контроль состояния среды [Текст]. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 348 с.

Приложение

Стандартные количества поступающих в организм человека объема воздуха и массы воды, принятые в Российской Федерации

Контингент	Воздух	Вода
Население	$7{,}3 \cdot 10^6$ л/год = 20 $м^3$/день	800 л/год = 2,2 л/день
Персонал	$2{,}5 \cdot 10^6$ л/год = 10 $м^3$/день (если в году 250 рабочих дней)	0