

$$\Pi^k = \underbrace{\Pi_1 \Pi_2 \Pi_3 \dots \Pi_k}_{k \text{ раз}}, \quad (7.26)$$

$$E[\Pi(k)] = \Pi(0) [p_0 E_0 + p_0 \Pi + p_1 \Pi + p_2 \Pi^2 + \dots] \quad (7.27)$$

где  $E_0$  — единичная матрица.

При Пуассоновом законе распределения числа переходов системы (объекта)

$$P_k = \frac{v^k e^{-v}}{k!}, \quad (7.28)$$

где  $v$  — среднее число переходов, имеем:

$$E[\Pi(k)] = \Pi(0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{v^k e^{-v}}{k!} \Pi^k \quad (7.29)$$

При этом вместо переходных вероятностей  $P_{ij}$  матрицы можно использовать плотность вероятности перехода  $\lambda_{ij}$ .

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}, \quad (7.30)$$

где  $P_{ij}(\Delta t)$  — вероятность того, что система, находящаяся в момент  $t$ , в состоянии  $S_i$  за время  $\Delta t$  перейдет из него в состояние  $S_j$ .

## 7.2. Особенности прогнозов экологической надежности систем и объектов

Риск и безопасность — это взаимосвязанные понятия. Чем выше риск, тем меньше безопасность, и наоборот. Чтобы увеличить безопасность, необходимо снизить риск.

Методология анализа и управления риском должна учитывать широкий спектр экономических, социальных, технологических, экологических и других факторов. В настоящее время база знаний по этим факторам неполна, что всегда ведет к неопределенностям. Значительные неопределенности имеются и в идентификации опасностей и оценке соответствующих рисков. Например, неопределенность в оценке риска от аварий на промышленных объектах, по мнению различных групп экспертов, составляет один порядок величины при оценке ущерба

и два порядка — при оценке вероятности. Еще большие неопределенности возникают на уровне системного анализа социально-экономической системы.

В качестве ключевых направлений и задач в развитии методологии прогнозирования риска есть предложения по:

- созданию баз данных и знаний (в области надежности оборудования, описания и численного моделирования процессов гидродинамики тепло- и массопереноса, воздействия вредных веществ на организм человека и экосистемы и т. д.);

- совершенствованию методов математического и имитационного моделирования в исследованиях процессов, сопровождающих аварии и определяющих их последствия;

- исследованию роли человеческого фактора с целью оценки его вклада в общий риск любой функционирующей технически сложной системы;

- разработке критериев, характеризующих риск крупных аварий и их социальные, экономические и экологические последствия;

- комплексной оценке и прогнозированию риск-ситуаций с учетом природных катастроф и катаклизмов.

Проведенный анализ наиболее известных в практике методов прогнозирования процессов и состояния систем (объектов) показал, что по существу все они сводятся к четырем основным методам: экстраполяции, экспертных оценок, морфологического расчленения и моделирования.

*Метод экстраполяции* основывается на переносе развития событий, происходивших в недалеком прошлом, на будущее (экстраполяции динамических рядов). Сюда также могут быть отнесены метод прогнозирования по параметрам, метод огибающих кривых и различные модификации, возникающие в связи с особенностями полиномов, применяемых при экстраполяции (спрямление кривых). Однако эти методы неприменимы при использовании источников информации, не содержащих числовых параметров.

*Метод экспертных оценок* основан на выяснении мнения экспертов по тем или иным вопросам, относящимся к проблеме прогнозирования. Его разновидностями являются метод мозговых атак, метод ассоциаций, метод «проб и ошибок», метод сценария событий, метод щелей, метод сенектических оценок

Гардона и др. Широкое распространение получила модификация, называемая методом Делфи, в которой предложен интересный способ обработки результатов опроса, базирующийся на корректировании «оппозиционных мнений» экспертов.

*Метод морфологического расчленения* основан на расчленении проблемы на «цели» прогнозирования, каждой из которых присваивают определенный «вес». Расчленение проводят до тех пор, пока не станет возможным конкретное решение задач, вытекающих из целей прогнозирования. По этому же принципу (расчленения) построены система ПАТТЕРН, метод горизонтальных и вертикальных матричных решений, метод Цвиги и др. Слабым звеном в методе морфологического расчленения является определение веса целей.

*Метод моделирования* основан на целесообразном абстрагировании при исследовании процесса развития события в будущем. Различают следующие разновидности этого метода: логические, информационные и математические модели, аналогии и т. д. Математическое моделирование является наиболее общим и вместе с тем достаточно строгим методом прогнозирования.

Рассмотрим детально основные теоретические аспекты прогнозирования экологической надежности систем (объектов).

Экологическая надежность определяет способность системы выполнять характерные ей функции экологического аспекта, с сохранением основных параметров при антропогенных воздействиях на нее.

Основные параметры надежности по исследованиям [6, 24, 53] должны определяться соотношением в системе (объекте) самовосстанавливающихся и не восстанавливающихся элементов (цепей), структурно-функциональной связанностью их (последовательное, параллельное, наложенное, с последствием и др.), степенью их управляемости, продолжительностью эксплуатационных циклов и наличием слабых «звеньев» (степенью контролируемости и прогнозируемости).

С математической точки зрения параметрическая функция экологической надежности есть вероятность того, что за время функционирования системы  $T$  параметры ее состояния и состояния объекта (среды) не выйдут за допустимые

пределы, являющиеся координатами поверхности предельных экологических состояний системы (объекта) и среды.

Если базировать экологическую надежность на обобщенных сопротивляемости (живучести)  $R$  и нагрузке  $P$ , то вероятность экологической надежности системы можно выразить соотношением:

$$P_i = P(R-R) > 0, \text{ при } P_i + Q = 1, \quad (7.31)$$

где  $Q$  — вероятный риск.

Соответственно непараметрическая функция будет иметь вид:

$$F(t) = n^t \cdot (1 - \bar{h}_j), \quad (7.32)$$

где  $\bar{h}_j$  — оценка функции максимального правдоподобия;  $t$  — время функционирования системы;  $n$  — число независимых нецензурируемых (неконтролируемых) и цензурируемых систем.

В общем экологическая надежность должна аспектироваться относительно функций эколого-социальных последствий ( $F_1$ ) и экологической безопасности ( $F_2$ ), определяющих параметры и степень экологических нарушений среды обитания ( $\Pi_1$ ) и изменения социально-экономических условий проживания ( $\Pi_2$ ).

Количественное определение этих параметров предлагается осуществлять через самые различные критерии: среднюю продолжительность жизни населения, как в целом, так и по возрастным и социальным группам; уровни обеспеченности комфортности и т. д. Но независимо от системы определяющих критериев понятие «отказ» для систем всегда будет случайным событием, вызывающим разного рода эколого-социальные и экономические последствия, как материально осязаемые, так и ценностно-неосязаемые.

Так как параметры экологической надежности всегда случайные величины, то их количественную оценку необходимо определять с позиций теории вероятности и выбросов (флуктуации) случайных функций.

Однако специфичность отказов (социально-экономические последствия для общества и экологические — для агроценозов и биогеосистем) требует разработки новых методов статистиче-

ского анализа данных, так как они формируют специфическую группу — данные типа времени жизни. Наиболее целесообразно использовать суммарные статистики на базе теории векторов с анализом покомпонентных воздействий и внутренних и внешних свойств систем, которые позволяют учесть накопленную меру воздействий ( $K_j$ ) и их сдвиг во времени ( $\tau_j$ ).

Необходимо также отметить, что структурная сложность и неоднородность природных объектов позволяют создать только формализованные методы прогноза и оценки их состояний, ибо, в принципе, любое изменение абиотических параметров вызывает изменения всех систем.

При этом степень допустимости (недопустимости) изменений их состояния имеет всегда внеэкономическую компоненту, связанную с уникальностью, т. е. оценка изменений состояния природных объектов, а, соответственно и антропогенизирующих систем должна проводиться на основе теории полезности, включающей как «материально осязаемые», так и «неосязаемые полезности».

Отсюда функция экологической надежности ( $P_c$ ) должна охватывать три области: собственно систему ( $P_1$ ), ее элементы ( $P_2$ ) и процессы ( $P_3$ ), т. е.  $P_c = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$ . При этом, если не наступает катастрофического разрушения системы,  $P_1$  — определяет вероятность ее функционирования в пределах допустимого,  $P_2$  — вероятность того, что основные элементы системы, в течение определенного периода, не выйдут за пределы допустимого, а  $P_3$  — вероятность того, что технология природопользования не вызовет катастрофических изменений основных элементов системы и среды.

Анализ единичных графиков функции экологической надежности [ $P_c(t)$ ], функции интенсивности нарушения элементов природной Среды [ $\lambda(t)$ ] и функции «резервной» надежности [ $f(t)$ ], определяющей длительность периода до неблагоприятных изменений (рис. 7.1), показывает, что интенсивность отказов в период формирования критического уровня экологической надежности, должна определяться уровнем начальной надежности и изменчивостью во времени внутренних процессов системы и внешних факторов. Итак, необходим достоверный учет созидательных антропогенных факторов (последствий условных значений ошибок и упущений) и непредвиденных геоклиматических

и георегиональных факторов. Выбор же начальной «резервной» надежности является, при этом, чисто экономической задачей, так как она определяет, в итоге, стоимость создания экологически надежных систем.

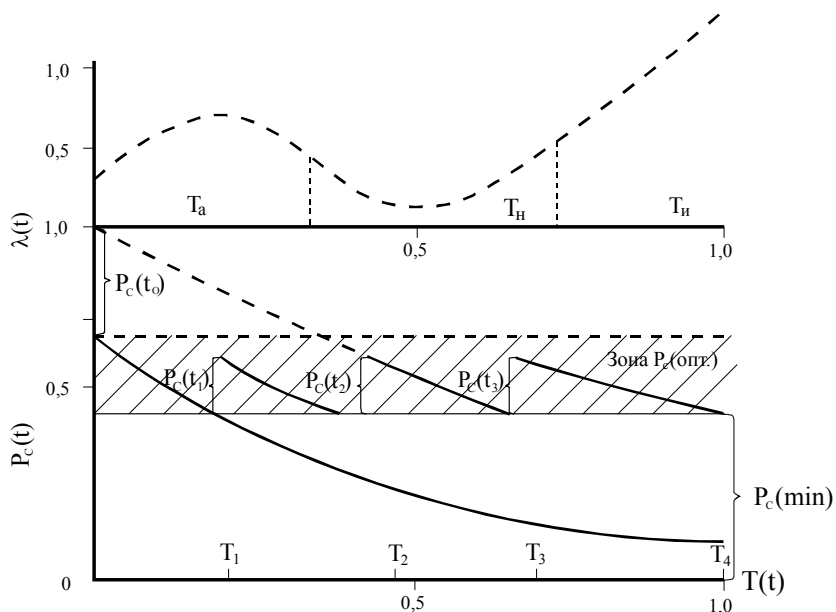


Рис. 7.1. Временные графики изменения экологической надежности  $[P_c(t)]$  и интенсивности нарушений  $[\lambda(t)]$ :

$T_n$  — начальный период воздействия (период эксплуатации системы);  $T_{н}$  — период оптимального функционирования;  $T_{и}$  — период формирования критического уровня экологической надежности;  $P_c(t)$  — экологическая надежность при начальном «резервировании»;  $P_c(T_1)$  — повышение надежности при поэтапной реализации природовосстановительных и природоохранных мероприятий;  $P_i^{\min}$  — минимально допустимая экологическая надежность

Так же очевидно, что оптимальный уровень экологической надежности можно обеспечивать на двух направлениях: начальным «резервированием»; поэтапной реализацией природоохранных и природовосстановительных мероприятий.

С эколого-социальной точки зрения определение оптимального компромисса между приведенными затратами и

экологической надежностью требует установления функции экологического ущерба вида:

$$Y_i(S) = Y(a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_n), \quad (7.33)$$

где  $a_i$  — параметры, определяющие состояние системы воздействием, влияющих на вероятность появления экологических изменений;  $b_i$  — детерминированные величины, определяющие конструктивно-технологические и эколого-экономические характеристики.

Прогнозирование поведения любых гео-, био- и экосистем требует выделения и анализа четырех возможных и несовместимых состояний:  $S_0$  — нормального функционирования;  $S_1$  — некоторой допустимой перегрузки;  $S_2$  — потери способности к самовосстановлению;  $S_3$  — критического состояния.

По принципу формирования возможных реальных состояний системы ее поведение можно описать функцией —

$S_i = \sum_{j=1}^a \sum_{n=1}^m S_i^{r \cdot t}$ , где  $i$  — состояние группы элементов типа  $r = 1, 2, \dots, m$ , находящихся под воздействием  $t = 1, 2, \dots, n$  — факторов, для которых характерно 7 прямых ( $S_0 \leftrightarrow S_1$ ) и 3 контингентных ( $S_0 \leftrightarrow S_2 \cdot S_3$ ) рисков.

Общий закон вероятности разрушения системы или отдельных ее элементов, исходя из предельных состояний и способности к самовосстановлению и нормальному воспроизводству, имеет вид:

$$Q = F_o(T_{CP}) = \int_0^{1/\beta_2} \phi_1(S) \cdot \left[ \int_0^{\beta_1/\beta_2} \phi_2(r) dr \right] dS, \quad (7.34)$$

где  $\beta_1/\beta_2$  — суперпозиция функций;  $\beta_1 = f(r, S)$  и  $\beta_2 = \lambda(r, S)$ ;  $r$  — характеристика устойчивости системы к преобразованию;  $S$  — резерв экологической надежности;  $T_{CP}$  — период функционирования;  $F_o$  — функция экологической надежности;  $\phi_1(S)$  — плотность вероятности действующих антропогенных воздействий;  $\phi_2(r)$  — плотность вероятности критических (разрушающих) воздействий;  $f$  и  $\gamma$  — соответственно, функции «резервной» надежности и интенсивности нарушений.

Проведенный анализ показывает, что функция экологической надежности вполне определима номенклатурой следующих критериев (признаков-свойств):  $k_1$  — степень обратимости и взаимодействия природных и производственных процессов;  $k_2$  — степень пригодности и качество выполнения социально-экологических функций;  $k_3$  — направленность и интенсивность развития основных компонент;  $k_4$  — величина критического воздействия (нагрузки) на отдельные компоненты;  $k_5$  — реакция на систему мероприятий по предупреждению и (или) устранению негативных последствий;  $k_6$  — степень воспроизводства природных (биосферных) ресурсов;  $k_7$  — степень удовлетворения общественных потребностей в качестве природной Среды;  $k_8$  — показатель репродукционной продуктивности;  $k_9$  — степень окультуренности ландшафтов;  $k_{10}$  — степень изъятия биосферных ресурсов;  $k_{11}$  — величина удельных капиталовложений;  $k_{12}$  — степень совершенства технологических процессов (геохимической локально-региональной активности территории).

Численное определение этих критериев описано в работе [6].

Необходимо отметить, что дополнением к функции экологической надежности ( $F_0$ ) является и функция эстетичности ( $P_э$ ), определяющая психолого-эстетические качества системы и среды ( $k^1_p$  — коэффициент натуральности облика;  $k^2_p$  — степени антропогенности элементов среды;  $k^3_p$  — степени композиционной значимости визуальных пространств;  $k^4_p$  — степени разнообразия территории по структуре и компонентам).

Оптимальность диапазонов критериев экологической надежности ( $F_0$ ) и психолого-эстетических качеств системы и среды ( $P_э$ ) должна обеспечивать их биосферную совместимость.

Следует отметить, что оценку критерия эстетичности большинством исследователей предлагается производить относительно наихудшего ландшафта, который более определим, так как по отношению к понятию «наилучший» всегда существует и превосходная степень и, тем более имеется неопределенность для чего или кого (человека, флоры, фауны, рекреационный целей).