Гидрометеорология и экология
№ 4 2008

УДК 330.111.4

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ И ЭКОСИСТЕМ

Доктор техн. наук М.Ж. Бурлибаев
Д.М. Бурлибаева
Доктор геогр. наук А.А. Волчек
Ан.А. Волчек

В статье, исходя из современных условий состояния экосистем, рассматриваются вопросы освоения и использования территории, об исходной информации и учете ее старения, предпосылок и принципов расчета надежности экосистем, без учета которых невозможно прогнозировать перспективное состояния экосистем и принятия управленческих решений по улучшению окружающей среды.

До сих пор, мы изучали теорию и практику решения конкретных задач в области рационального природопользования. Это было и истощение тех или иных ресурсов, и загрязнение почвы, воды или воздуха, и взаимосвязи между хищниками, жертвами, человеком и др. Однако не менее существенными являются проблемы преобразования территории (региона) в целом, выявления и обеспечения экологической безопасности экосистем (природных систем), экоагросистем (техногенных систем) и инженерных объектов (производственных зон и гидроузлов).

Темпы преобразования территорий, а также эффективность освоения и использования природных ресурсов в регионах во многом определяется общими закономерностями развития отраслей экономики, которые описываются математическими закономерностями. В зависимости от особенностей экономического развития региона, тенденции изменения экономических и демографических показателей могут быть описаны тремя группами уравнений.

Первую группу называют законами динамики с различными порядками констант скорости, которые можно описать следующим образом

$$\frac{dy}{d\tau} = K_{m+1} \cdot y^{m}, \tag{1}$$

где y – прогнозируемый показатель; τ – время; K_{m+1} – константа в уравнении скорости роста; m – порядок скорости роста.

При отсутствии роста *K = 0*, $\frac{dy}{d\tau}=0$, *y* = const. Для линейного типа *m* = 0 и $y=K(\tau-\tau_0)+y_0$. Для экспоненциального типа *m* = 1, а $y=y_0\cdot\exp(\tau_\kappa-\tau_0)$. Для гиперболического типа *m = 2*, $y=\frac{K}{\tau_\kappa-\tau_0}$, где τ_κ – конечный момент времени прогнозирования. Такими уравнениями можно описывать потребности отраслей экономики в сельскохозяйственной продукции и в ряде других процессах.

Однако ряд показателей может быть описан более точно нелинейными моделями, например, показатели демографической деятельности могут описываться экспоненциальными законами. Вторую группу количественных закономерностей изменения экономических и демографических показателей называют параболическими законами роста. Общий вид математической зависимости для первой и второй группы можно записать в виде:

$$\frac{d^n y}{d\tau^n}=K\cdot y^m, \tag{2}$$

где *n* – порядок ускорения роста; *K* – коэффициент пропорциональности; *m* – порядок константы скорости роста.

Для второй группы зависимостей при *m = 0*

$$\frac{dy}{d\tau}=0;\quad y=const \tag{3}$$

линейный закон изменения прогнозируемого показателя

$$\frac{dy}{d\tau}=\alpha, \tag{4}$$

где α – скорость роста.

$$y=\alpha\cdot(\tau-\tau_0); \tag{5}$$

квадратический закон изменения прогнозируемой величины

$$\frac{d^2y}{d\tau^2}=\alpha,\quad y=\alpha\cdot(\tau-\tau_0)^2+y_0. \tag{6}$$

Общая формула для этих законов

$$y=\alpha_n\cdot(\tau-\tau_0)^n+y_0, \tag{7}$$

где α_n – скорость или ускорение соответствующего порядка; τ_0 – начальные моменты; y_0 – значение показателя в начальный момент; n – порядок ускорения роста.

Вторая группа изменения экономических, демографических показателей может быть использована для описания тех же величин, которые описываются закономерностями первой группы. Ту или иную группу зависимости выбирают, исходя из конкретных условий расчетов и физического смысла прогнозируемого показателя.

В третью группу можно выделить закономерности роста с насыщением. Существуют два основных вида таких кривых: кривая асимптотического роста и логистическая функция (или закон Робертсона).

Математический закон асимптотического роста выражают уравнением:

$$\frac{dy}{d\tau} = K_1 \cdot (A_1 - y), \tag{8}$$

где A_1 – уровень насыщения (ордината асимптоты).

Уровень изменения во времени можно записать так

$$y = A_1 - (A_1 - y_0)\exp(-K_1 \cdot (\tau - \tau_0)), \tag{9}$$

где y_0 и K – параметры.

Логистическую функцию находят из уравнения

$$\frac{dy}{d\tau} = K_2 y \cdot (A_2 - y), \tag{10}$$

где A_2 – уровень насыщения; $K_2 \cdot y$ – фактор ускорения; $(A_2 - y)$ – фактор торможения; K_2 – параметр.

Уравнение изменения y во времени можно записать в виде:

$$y = \frac{A_2}{1 + b \cdot exp(- A_2 \cdot K_2 \cdot (\tau - \tau_0))}. \tag{11}$$

Третья группа зависимостей может аппроксимировать экономические и демографические показатели в регионах, где развитие начинает ограничиваться теми или иными факторами. Такой тип развития характерен для развитых регионов.

Таким образом, например, зная законы изменения тенденций того или иного параметра (численность населения, объемов различных видов продукции) и удельные расходы воды на одного жителя и единицу продукции, можно определить перспективный объем необходимых водных ресурсов во всем регионе, речном бассейне и даже стране.

Задача изучения процесса старения информации состоит в анализе кумулятивной функции $k(T)$ во времени, под которой понимается глубина ретроспекции, выраженная в информационных единицах, т.е. элементах, которые могут восприниматься и использоваться самостоятельно на момент времени T.

Процесс кумуляции ретроспективной информации состоит в том, что объём полезной информации по мере увеличения ретроспекции, всё время увеличивается, достигая в некоторый момент $T = T_k$ значения $K(T_k)$, т.е.

$$\left.\begin{array}{l} 0 \le k(T) \le K(T) \le \infty \\ k(T) \le k(T') \ при\ T < T'_R \\ k(T_n) = K(T_n), k(T) \to K(T_n), при\ T \to T_n \end{array}\right\} \quad (12)$$

Для устранения искажающего воздействия динамики границы ретроспекции, целесообразно абсолютные единицы измерения информации выразить в относительных. Это осуществляется через ввод переменной $m(T)$, обозначающей долю полезной информации в общем её объёме, при формировании прогнозного фона, достигнутого к моменту времени T

$$m(T) = \frac{k(T)}{K(T)} \quad (13)$$

При этом если $k(T) \to K(T)$, то $m(T) \to 1$.

Поскольку процесс кумуляции ценной информации имеет верхний предел, то введением переменной, характеризующей скорость приближения процесса к концу, можно определить темп старения информации

$$H(T) = \frac{h(T)}{K(T) - k'(T)} \text{ или } h(T) = \frac{m'(T)}{1-m}, \quad (14)$$

где $H(T)$ и $h(T)$ – интенсивности старения информации для абсолютной $k'(T)$ и относительной $m'(T)$ кумулятивных функций.

Так как

$$m(T) = h(T)(1 - m(T)), \text{ то } m(T) = 1 - exp\left[\int_0^T h(\tau)d\tau\right] \text{ и } m(0) = 0, m(\infty) = 1. \quad (15)$$

Из-за влияния на интенсивность старения информации множества самых различных факторов функцию $h(T)$ можно записать в следующем общем виде

$$h(T) = h[T, m(T), x_i], \qquad (16)$$

где x_i – множество экзогенных факторов, определяющих конкретный процесс старения информации.

Наиболее традиционными уравнениями, описывающими старение научной информации, являются кривые Бартона-Кеблера

$$m(T) = 1 - a \cdot \exp(-T) - b \cdot \exp(-2T), \qquad (17)$$

или их модификации Аврамеску и Коула

$$\left.\begin{aligned} m(T) &= \exp(-a \cdot T) - \exp(-m \cdot a \cdot T); \\ m(T) &= \exp(-\lambda - T). \end{aligned}\right\} \qquad (18)$$

Так как длительность существования полезной информации является случайной величиной, то её идеализированной кривой будет распределение Гомперца–Макегама

$$f(T) = h \cdot \exp(-\lambda \cdot T), \qquad (19)$$

где $\lambda = T_0^{-1}$ – величина обратная средней длительности жизненного цикла полезной информации.

Этому распределению соответствует пуассоновский поток событий. Однако особенности проявления экологических событий определяют необходимость модификации λ в случайный параметр, с описанием в виде $\lambda = a + b \cdot \exp(\lambda_0 \cdot T)$, что позволяет интенсивность старения информации определить двумя составляющими: константой a, не зависящей от длительности цикла полезной информации и слагаемым, экспоненциально растущим со временем. И тогда соответственно –

$$f(T) = [a + b \cdot \exp(\lambda \cdot T)] \cdot \exp\left\{-a \cdot T - \frac{b}{\lambda}[\exp(\lambda \cdot T - 1)]\right\}. \qquad (20)$$

При $a = 0$ появляется возможность описать тренд интенсивности простой экспонентой

$$f(T) = b \cdot \exp(\lambda \cdot T) \cdot \exp\left\{-\frac{b}{\lambda}[\exp(\lambda \cdot T - 1)]\right\}. \qquad (21)$$

И если (20) хорошо описывает процесс старения потока информации с различной интенсивностью старения, то (21) – процесс быстрой потери ценности информации.

Применяя непредельные распределения сумм случайного числа случайных величин, можно объективно выявить статистическую закономерность формирования времени существования полезной информации.

Проведенные исследования позволяют констатировать возможность определения глубины предпрогнозной ретроспекции с учётом старения информации с помощью модели распределения сумм пуассоновского числа нормально распределённых случайных величин

$$\Phi_Z(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \cdot \exp\left(i \cdot t \cdot m \cdot n - \frac{t^2}{2} \cdot \sigma^2 \cdot n \right), \tag{22}$$

где $\Phi_Z(t) = \exp\left(i \cdot t \cdot m \cdot n - \frac{t^2}{2} \cdot \sigma^2 \cdot n \right)$ – характеристическая функция нормальной случайной величины с параметрами m и σ.

Количественная оценка надежности инженерного объекта на всех стадиях его жизненного цикла начинается с составления некоторой условной схемы надежности, которая является основной математической и физической моделью надежности. Причем, инженерным объектам присущи составные элементы двух типов: функционирующие непрерывно в течение определенного промежутка времени и срабатывающие практически мгновенно.

Количественная характеристика надежности элементов первого типа осуществляется на физической модели отказа, затем выявляются параметры, характеризующие безотказную работу составных элементов (сооружений) или протекания конкретных физических процессов в рамках реализуемых технологий.

Для оценки надежности инженерных объектов на этапе проектирования технологической цепочки сооружений необходимо: проанализировать возможные «отказные» ситуации; построить вероятностные модели отказов, с выявлением конкретных отказных ситуаций, выполнить схематизацию анализируемой системы и внешних воздействий; выбрать рациональные количественные признаки надежности инженерных объектов (сооружений) на основе моделей отказов; выбор осуществляется на уровне технико-экономических оценок, с учетом технологических, эксплуатационных и других требований к аналогичным системам; установить расчетные средние значения по данным аналогичных объектов, среднеквадратические отклонения и корреляционные моменты предельных и действующих значений количественных признаков надежности; установить количественные показатели надежности составных элементов исследуемой системы; сравнить полученные показатели надежности инженерных объектов с требуемыми по техническим условиям

$$P_{расч.} \geq P_{тр.}, \tag{23}$$

где $P_{расч.}$ – расчетное значение нижней границы оценки вероятности безотказной работы; $P_{тр.}$ – требуемое значение вероятности безотказной работы.

Если условие (23) не удовлетворяется, то требование по надежности исследуемого элемента считается невыполнимым и необходимо провести их конструктивную доработку, которая обеспечит выполнение (23).

В дополнение к количественной оценке показателей надежности проводится количественный анализ надежности объекта в целом и его составных частей. При качественном анализе надежности их работы необходимо оценивать: новизну использованных элементов, их отличие от общеизвестных; влияние новых элементов на надежность, необходимость и возможность выполнения дополнительных исследований; достигаемый коэффициент запаса прочности; причины завышения (занижения) коэффициента запаса прочности; восприимчивость конструкции к внешним воздействиям; перегрузки, степень защищенности, меры предохранения; защищенность от окружающего вредного воздействия; технологические возможности создания надежных объектов; используемые материалы и возможность замены на них общепринятых материалов, необходимость дополнительных исследований применяемых материалов, ремонтопригодность сооружений; наиболее вероятные отказы в процессе эксплуатации объектов; информацию об эксплуатации аналогов проектируемых объектов; особенности технической эксплуатации и технологического обслуживания объектов; требования к обслуживающему персоналу.

Параметрическая надежность есть вероятность того, что во время функционирования системы (T) параметры состояния не выйдут за допустимые пределы

$$\left.\begin{aligned} &P = Вер(\vec{z} \in \Theta) = Вер\{R_{11} < z_1, < R_{12}; \\ &R_{21} < z_2 < R_{22}; \dots ; R_{n1} < z_n < R_{n2} \mid t \le T\}, \end{aligned}\right\} \quad (24)$$

где $\in$ – символ, указывающий на принадлежность вектора к области Θ; R_{11}, R_{12}, …, R_{n2} – допустимые пределы, являющиеся координатами поверхности предельных состояний; *Вер* – вероятность.

Пересечением вектором $\vec{z}$ в какой-либо момент времени $t \le T$ поверхности предельного состояния означает выход элемента из работоспособного состояния – отказ.

При оценке параметрической надежности условие надежности записывается следующим образом

$$П > B, \tag{25}$$

где $П$ – потенциальная способность объекта противостоять воздействиям; B – воздействие.

Неравенство (25) может выражать условие надежности объекта по любому предельному состоянию (устойчивость, несущая способность, деформативность и т.д.).

Параметр B может выражать как внешние и внутренние воздействия, так и возникающие от них последствия. В общем случае все расчеты объекта, обеспечивающие его надежную работу, могут быть сведены к выполнению условия

$$Y_1 - Y_2 = U \geq 0, \tag{26}$$

где Y_1 – сумма внутренних факторов, характеризующих работоспособность; Y_2 – сумма внешних факторов, характеризующих действующие факторы при их наиболее невыгодном сочетании.

Тогда надежность объекта определяется вероятностью значений больше нуля

$$P = P(U \geq 0). \tag{27}$$

Когда известно соотношение $y = f\left(x_1, x_2, ..., x_n\right)$ и закон распределения случайных величин x_i, то моменты распределения случайных величин устанавливают по известным зависимостям; по этим данным определяют показатель надежности P.

Порядок решения следующий: задаваясь требуемым уровнем надежности $P_{зад.}$ подбирают параметры объекта так, чтобы установленный по формуле (27) показатель надежности P удовлетворял неравенству

$$P > P_{зад.} \tag{28}$$

В ряде задач расчета параметрической надежности нельзя пренебрегать изменением параметров состояния во времени. В этом случае наиболее плодотворным будет использование теории выбросов случайных функций. Так как числовые характеристики параметров состояния, нужные для расчета параметрической надежности, часто неизвестны на этапе проектирования, то расчеты надежности чаще основываются на математической модели работы объекта. Модель работы проиозвольного объекта в зависимости от параметров состояния и воздействий в общем виде можно описать зависимостями

$$\frac{dy_r}{dt} = Fe(y_r, x_i, t), \tag{29}$$

$$\Psi_m(y_r, x_i, t) = 0, \tag{30}$$

где i = 1, 2, ..., k; r = 1, 2, ..., n; e = 1, 2, ..., j; m = j+1, ..., n; Fe и Ψ_m – известные функциональные зависимости; x_i – случайная величина.

Для нахождения закона распределения параметра состояния по известным законам распределения воздействия практически для любых математических моделей можно применить метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). При использовании метода статистических испытаний (или метода статистического моделирования) на математической модели, как аналоге рассматриваемого объекта, обычно многократно проигрывается стохастический процесс функционирования.

Этот прием моделирования основан на формировании последовательности случайных чисел, подчиняющихся заданному закону распределения, причем исходным является равномерное распределение в интервале (0…1).

Учёт неоднородности, принятие решений при неопределённости – одна из важнейших и труднейших задач теории надёжности. Неопределённость параметров, характеризующих работу объекта, чаще всего обусловлена неопределённостью исходных данных. Здесь можно выделить три группы неопределённости:

- связанную с отсутствием точных сведений о параметрах условий работы;
- обусловленную недостоверностью заданных характеристик;
- обусловленную случайными характерами условий работы объекта.

В расчётах по надёжности могут быть применены различные методы учёта и оценки неопределённости.

Равнозначимый анализ, основанный на выделении групп характеристик в соответствии со степенью их влияния на эффективность и с учётом достоверности их значений.

Ограничение числа стратегий, проводимое на основе сопоставления степени влияния на эффективность выбора стратегии и неопределённых параметров.

Выделение уровней моделей, проводимое в соответствии с обеспеченностью исходными данными и известной степенью их неопределённости.

Приёмы доминирования, основанные на определении условий, в которых система доминирует, и построении, хотя бы в теоретическом плане, самой доминирующей системы.

Выделение этапов операции, предусматривающее замену моделей этапов, имеющих высокую степень неопределённости, их выходными параметрами, которые принимаются за исходные.

Анализ чувствительности распределения, используемый в тех случаях, когда ситуацию неопределённости можно свести к субъективной ситуации риска.

Усилительный анализ, предполагающий сравнение системы в условиях, неблагоприятных для проектируемой системы и благоприятных для противостоящей системы.

Уравнительный анализ, предполагающий определение условий равной эффективности вариантов системы с последующим сравнением этих условий.

Неопределённость расчётных параметров можно оценивать приёмами математической статистики. Для расчёта отдельных состояний во многих случаях довольно успешно применяют апробированные детерминистические зависимости. Используя эти аналитические соотношения для получения необходимых при расчётах надёжности оценок средних значений, среднеквадратичных отклонений случайных величин, можно применять метод линеаризации.

Метод линеаризации основан на следующих допущениях: параметры, характеризующие возмущение, описываются нормальным законом распределения; параметры, характеризующие возмущенные факторы, статистически независимы, между возмущениями и выходными параметрами существует линейная зависимость.

Неопределённые параметры в общем случае не являются линейными во всем диапазоне изменения случайных аргументов, они могут оказаться линейными лишь в узком диапазоне их случайных изменений. Как известно, может быть линеаризована любая функция, связывающая основную определяемую характеристику рассчитываемого на надёжность объекта с независимыми переменными $(x_1, x_2, ..., x_n)$, в общем виде можно записать

$$y = \varphi(x_1, x_2, ..., x_n), \quad (31)$$

где $x_1, x_2, ..., x_n$ – параметры-переменные, определяющие конструкцию, размеры, материалы, эксплуатационные показатели и др. Таким образом, y для данного элемента может оказаться неявной функцией внешних условий и времени.

Так как $x_1, x_{2,} ..., x_n$ случайные величины и характеризуются статистическим разбросом, поэтому и y имеет статистический разброс относительно своего номинального значения. Это изменение y приближённо можно определить, используя разложение функции y в ряд Тейлора в окрестности нормальных и средних значений параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлибаев М.Ж., Волчек А.А., Шведовский П.В. Проблемы оптимизации природопользования и природообустройства в математических методах и моделях. – Алматы, Изд-во: "Каганат", 2003. – 525 с.
2. Бурлибаев М.Ж., Достай Ж.Д., Турсунов А.А. Арало-Сырдарьинский бассейн (гидроэкологические проблемы, вопросы вододеления). – Алматы: "Дәуір", 2001. – 180 с.
3. Бурлибаев М.Ж., Нурмаганбетов Д.Ш., Волчек А.А. Теоретические и прикладные основы проблем планирования и управления природопользованием и охраной природы. – Алматы: «Каганат», 2007. – 360 с.

Казахстанское Агентство Прикладной Экологии
Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби
Полесский Аграрно-Экологический Институт НАН Республики Беларусь

ИНЖЕНЕРЛІК НЫСАНДАР МЕН ЭКОЖҮЙЕЛЕРДІҢ ТҮРЛЕНУ ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІК ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ

Техн. ғылымд. докторы М.Ж. Бүрлібаев
Д.М. Бүрлібаева
Геогр. ғылымд. докторы А.А. Волчек
Ан.А. Волчек

Мақалада экожүйенің қазіргі жағдайдағы қалпына байланысты аумақты игеру және пайдалану, бастапқы ақпарат пен оның ескіруін есепке алу, қоршаған ортаны жақсарту жөніндегі басқару шешімдерін қабылдаудың, экожүйенің келешектегі жағдайын болжау онсыз мүмкін болмайтын экожүйенің дәйектілігін есептеудің алғы шарттары мен қағидалары мәселелері қарастырылады.