

УДК 303.732.4:001.5

Построение моделей для комплексной оценки состояний сложных систем на основе феноменологического анализа опытных данных

А.В. Звягинцева

Донецкий национальный технический университет
anna_zv@ukr.net

Звягинцева А.В. Построение моделей для комплексной оценки состояния сложных систем на основе феноменологического анализа опытных данных. Предложены принципы и теоретические методы комплексной оценки сложных систем на основе использования массивов данных наблюдений и определения статистических вероятностей событий, характеризующих состояния изучаемых систем. Основные гипотезы исследования связаны с возможностью создания на основе опытных данных феноменологических моделей систем, отличающихся многомерным полемым представлением массивов данных, а также существованием скалярного поля распределений статистической вероятности характерных событий, наиболее полно отражающих изменения в состояниях систем. В качестве таких событий могут рассматриваться самые разные сложные события (как опасные, так и не опасные), которые характеризуют изменения в состояниях систем, особенности поведения этих систем или некоторые ситуации, связанные с наблюдением опасных и негативных событий или нанесением ущерба. Сформулированы принципы существования энтропии и потенциала для многомерного пространства состояний сложной системы. Показано, что энтропия и потенциал могут быть приняты в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки. Разработанные модели позволяют предложить для практики расчетные зависимости для комплексной оценки и многопараметрического ранжирования различных объектов и систем, которые отличаются использованием объективных методов анализа данных.

Введение

Комплексная оценка и оценка риска представляют собой системные науки, охватывающие разные области жизнедеятельности человека и существующие на стыке многих областей знаний, как естественных, так и социогуманитарных. В методологическом плане данные науки являются частью целого теоретического направления, которое называется теорией систем, в свою очередь, в научно-практическом плане эти науки связаны с теорией и практикой безопасности систем. Данное направление исследований ориентировано на анализ состояния и тенденций развития систем различной природы, а также на изучение форм и видов опасностей и рисков в экологической, техногенной, экономической и энергетической безопасности систем и т.д.

Далее под сложной системой будем подразумевать социальную, экологическую, экономическую или техногенную систему, состояния которой могут определяться самыми различными количественными показателями. Формирование процессов в сложных системах связано с изменением во времени их состояний. В зависимости от внешних и внутренних условий, в таких системах могут реализовываться различные процессы и наблюдаться разные события. Иногда возникают состояния, которые по

определенным факторам, параметрам или характеристикам могут считаться неблагоприятными, опасными или требующими особого контроля. Поэтому понятия опасности и риска должны быть связаны с понятиями особых состояний сложных систем, которые по факторам безопасности требуют соответствующих методов их распознавания.

В этом плане основные практические задачи в области оценки опасностей и рисков связаны с установлением границ (уровней, порогов), когда процесс изменения состояния системы может быть отнесен по заданным факторам к безопасному или опасному процессу.

В свою очередь, теоретические задачи связаны с изучением вероятностных закономерностей формирования неблагоприятных и опасных событий при различных воздействиях, с формированием подходов, представлений и гипотез для развития теорий, разработкой теоретических и аналитических методов анализа опасностей, построением комплексных моделей оценки состояний систем и т.д.

Построение любой теории основано на использовании общепринятых среди специалистов понятий и определений, систематизации опытных данных, установлении феноменологических и эмпирических закономерностей, а также разработке методологии, позволяющей провести формализацию задач и применить

определенный математический аппарат.

Основной путь решения проблемы комплексной оценки систем и оценки риска лежит в изложении основных положений и представлений об опасности и риске в терминах теории вероятности, исходя из причинно-следственной взаимосвязи событий. При этом основной упор при решении проблемы следует делать не на теоретическое определение вероятностей сложных событий, представляющих собой причинно-следственные деревья (цепочки) множества более простых событий, а на феноменологический анализ вероятностей исходных сложных событий. Однако этот путь требует наличия достаточной экспериментальной базы, позволяющей определять вероятности различных сложных событий.

Методология комплексной оценки сложных систем в настоящее время использует преимущественно экспертные методы и подходы [1 – 10]. Это приводит к тому, что большинство исследований в данной области носит субъективный характер, так как результаты комплексной оценки существенно зависят от мнения, уровня подготовки экспертов и специфики применяемых экспертных методов.

Основные направления и тенденции исследований в данной области связаны с накоплением и созданием все более обширных баз данных показателей состояния, изменения и развития различных видов систем, применением новых методов визуализации и оценки данных, использованием математических методов анализа данных, созданием информационно-аналитических систем хранения, обработки и представления данных, развитием методов комплексной оценки, теории оценки рисков и методов системной динамики [11 – 15].

Комплексная оценка состояния систем обычно представляет собой очень трудоемкую процедуру из-за наличия большого количества показателей, требующих анализа и отражающих самые разные аспекты их развития. В таких исследованиях обычно применяются три подхода. Первый подход связан с разработкой обширных докладов о состоянии и предполагаемом изменении и развитии систем [16 – 18]. Второй подход, с целью упрощения процедуры анализа, основывается на индикаторном методе, когда для оценки состояния и изменения систем вводятся в рассмотрение самые различные индексы, которые интегрируют несколько показателей [19 – 21]. Третье теоретическое направление комплексной оценки связано с методологией оценки рисков [13 – 14] и теорией системной динамики [22].

Целью данной статьи является разработка моделей для комплексной оценки

состояний экологических, социально-экономических и технологических систем на основе применения методов феноменологического анализа данных, характеризующих состояние и развитие этих систем по самым различным аспектам.

Каждая из сложных систем характеризуется своим определенным набором свойств и закономерностей, перечнем характерных параметров, а также особенностями перехода из одного состояния в другое. Определим состояние сложной системы как совокупность ее наблюдаемых показателей, которые формируются под действием условий окружающей среды в конкретный момент времени. В данном случае состояние системы в n -мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться многомерной точкой $M = M(p_1, p_2, \dots, p_n)$, процесс изменения состояния объекта во времени – многомерной кривой, которая описывается точкой M в этом пространстве. Здесь $p_1, p_2, \dots, p_n$ – количественные показатели (параметры), которые характеризуют основные свойства системы.

Изучение связей между опасностью и риском возможно при наличии общего описания поведения сложной системы. Причем это описание может быть представлено множеством функций распределения вероятностей характерных событий j вида $w_j = w_j(p_1, p_2, \dots, p_n)$ или $w_{j_s} = w_{j_s}(p_1, p_2, \dots, p_n)$, при этом риск будет определяться вероятностями нескольких связанных между собой причинно-следственных событий:

- совместными событиями j (причинами) наблюдения параметров системы $p_1, p_2, \dots, p_n$, которые характеризуют ее состояние;

- сложными событиями j_s (следствиями) наблюдения различных событий, характеризующих особенности поведения систем, а также негативные эффекты и последствия.

В общем случае при количественной оценке риска функция состояния системы $w = w(p_1, p_2, \dots, p_n)$ будет определяться как параметрами состояния p_i , так и нежелательными и опасными событиями j , и будет описывать как безопасные, так и опасные состояния системы. Опасность состояния системы может определяться по совокупности значений ее параметров, которые превышают или не достигают заданных пороговых значений, а также возможно попадают в

определенные нежелательные диапазоны. Если исходить из предложенного определения состояния системы, то в пространстве состояний $H_n\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ можно определить области опасных или неблагоприятных состояний. Для этого следует указать диапазоны изменений координат p_k , характеризующие опасные (безопасные) состояния системы или для функции вероятности характерных событий j_s вида $w_{j_s}(p_1, p_2, \dots, p_n)$ задать пороги безопасных значений вероятности (например, меньше 5% или 1% наблюдаемого негативного эффекта). Так как параметры и вероятность связаны между собой функцией распределения, то достаточно нормировать только или параметры системы или вероятность наблюдаемых событий. В каждом конкретном случае данный вопрос должен решаться исходя из особенностей изучаемой системы и имеющихся опытных данных.

Таким образом, *безопасное* состояние системы – это множество состояний, при которых значения всех параметров соответствуют определенно заданным требованиям. В свою очередь, *опасное* состояние системы – множество состояний, при которых значение хотя бы одного параметра не соответствует требованиям, заданным по показателям безопасности. Это также справедливо, если регламентирована вероятность характерных наблюдаемых событий. В этом случае задаются области безопасных и опасных изменений параметров системы, исходя из заданного значения порога вероятности.

Опасное состояние системы формируется под действием окружающей среды, однако в безопасности систем окружающая среда часто не является по отношению к системе явно выраженной внешней средой. Опасная система обычно состоит из объекта и вмещающей этот объект окружающей среды, причем объект чаще всего относится к элементам живой природы и может быть распределен в пространстве окружающей среды (например, популяция, проживающая на определенной территории).

Таким образом, опасность, в целом, являясь важной категорией теории комплексной оценки, представляется множеством опасных состояний системы, определенным образом выделенных по значениям параметров фактора опасности из общего множества всех состояний. В свою очередь, каждое опасное состояние системы однозначно характеризуется вероятностью некоторых опасных или неблагоприятных событий, которые позволяют

распознавать эти опасные состояния, а также параметрами этих опасных состояний.

Подводя общий итог можно сказать, что процедура определения риска для различных сложных систем является обычной комплексной оценкой состояний систем по совокупности показателей относительно вероятности опасных событий, которые особо выделяются при анализе процессов.

Все это при оценке риска дает возможность систематизировать различные опасные и неблагоприятные события по отношению к объектам, времени и месту их возникновения, по отношению к состоянию системы или последствиям, связанным с этим состоянием, и т.д., используя классификацию событий, которая сегодня общепринята в теории вероятности.

Дифференциальные уравнения для феноменологического описания состояний сложных систем

Рассмотрим в общем виде задачу комплексной оценки систем, характеризующихся совокупностью самых разных показателей. Считаем, что имеется массив статистических данных в виде базы данных для некоторой сложной системы, в который входят данные для m объектов (строки) и n показателей (столбцы) и которые достаточно полно характеризуют эти объекты. В базе данных имеется также множество таблиц t упорядоченных по времени, которые отражают процессы изменения состояний этих объектов во времени. Все объекты являются однотипными, например, страны, города, территории, природно-промышленные или природные комплексы (предприятия, сооружения, леса, реки) и т.д.

На основе переменных $p_1, p_2, \dots, p_n$ сформируем многомерное пространство координат $H\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, в котором возможные состояния объектов теоретически образуют некоторую область H_n , охватывающую все наблюдения. В этом случае состояние каждого объекта в данном пространстве может быть представлено многомерной точкой $M(p_1, p_2, \dots, p_n)$, а процессы изменения состояния объектов за определенный период – многомерными линиями. При этом каждая линия процесса будет отображаться t точками. Предположим непрерывность многомерной области H_n . Это означает, что в пространстве состояний H_n существует бесконечное множество состояний для некоторой генеральной совокупности однотипных объектов и точки состояний

$M(p_1, p_2, \dots, p_n)$ этих объектов непрерывно заполняют это пространство. Будем также считать, что опытные точки из базы данных являются ограниченной выборкой наблюдений из данной генеральной совокупности.

Рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения нескольких показателей или выберем некоторое характерное событие, которое имеет характеристическую величину в виде отдельного показателя. Определим, что состояние каждого объекта может характеризоваться данным наблюдаемым событием. Обозначим данное событие как «событие j », и будем считать, что оно позволяет оценить некоторые опасные или неопасные состояния системы, которые выделены при анализе по определенным соображениям по показателям безопасности. Найдем статистическую вероятность этого события на основе опытных данных, которые имеются в базе данных, с использованием алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий. Считаем данную статистическую вероятность вероятностью состояния изучаемой системы. Эта статистическая вероятность w подсчитывается по всей группе объектов.

В процессе группировки данных статистическая вероятность состояния, как правило, определяется алгоритмическим путем на основе имеющихся опытных данных.

Для построения комплексных моделей принимаем гипотезу о непрерывности распределения вероятности состояния системы в области H_n . Другими словами, мы предполагаем существование скалярного поля статистической вероятности w в пространстве H_n вида $w = w(M)$, которое можно оценить по статистическим данным.

Предположим, что в области H_n можно задать комплексный индекс в виде аналитической функции $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$, на основе которой будет формироваться математическая модель вероятностного пространства. При известном виде функции $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$ и значениях переменных $p_1, p_2, \dots, p_n$ в области H_n формируем еще одно скалярное поле, которое назовем средой моделирования.

При построении моделей предполагаем, что в пространстве состояний H_n скалярные поля величин w и T однозначно связаны между собой. Данная связь представляется в виде следующих феноменологических соотношений $dw = c_1 \cdot dT$. При справедливости

принятых гипотез феноменологические описания статистических данных, представленных таблично-временными массивами информации, тесно связаны с уравнениями Пфаффа.

Выберем в области H_n произвольную точку M . Будем считать, что вблизи данной точки осуществляется элементарный процесс, в результате которого состояние объекта изменяется от начального M до конечного состояния M' . Тогда элементарное изменение величины w можно представить в виде:

$$dw = \left(\frac{\partial w}{\partial T} \right)_{p_2 \dots p_n} \left(\frac{\partial T}{\partial p_1} \right) dp_1 + \left(\frac{\partial w}{\partial T} \right)_{p_1, p_3 \dots p_n} \left(\frac{\partial T}{\partial p_2} \right) dp_2 + \dots + \left(\frac{\partial w}{\partial T} \right)_{p_1 \dots p_{n-1}} \left(\frac{\partial T}{\partial p_n} \right) dp_n; \quad (1)$$

$$dw = c_1 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_1} \right) dp_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_2} \right) dp_2 + \dots + c_n \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_n} \right) dp_n \quad (2)$$

где c_k – феноменологические величины, характеризующие процессы изменения состояний объектов при изменении показателей p_k .

Введение индекса $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$ необходимо для построения комплексных моделей описания статистических данных в математическом виде. Уравнение Пфаффа (2) при постоянных величинах c_k зависит от вида функции T и распределений вероятности w .

Так как изучается распределение статистической вероятности, то можно представить комплексный индекс в виде геометрической вероятности пространства H_n или в виде меры относительных изменений:

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n}{p_{1,\max} \cdot p_{2,\max} \cdot \dots \cdot p_{n,\max}}, \quad (3)$$

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n}{p_{10} \cdot p_{20} \cdot \dots \cdot p_{n0}}, \quad (4)$$

где $p_{k,\max}$, p_{k0} – соответственно максимальные значения или некоторые опорные (пороговые, допустимые и т.д.) значения исходных показателей.

В первом случае следует определить максимальные значения наблюдаемых величин в выборке всех данных. Во втором случае, для анализа данных следует предложить некоторую опорную точку $M_0(p_{10}, p_{20}, \dots, p_{n0})$ и состояния всех остальных объектов соотнести с этой точкой.

Данные подходы определения комплексного индекса основываются на использовании принципа соответственных состояний. Данный принцип обобщает эмпирическое наблюдение, которое указывает

на то, что для одних и тех же объектов многие характеристики и показатели тесно связаны с некоторыми характерными свойствами для всех объектов приблизительно одинаково. При реализации этого принципа в процессе построения моделей показатели состояний некоторых объектов выбираются в качестве опорных и все остальные характеристики объектов соотносятся с этой точкой в изучаемом пространстве показателей.

Существуют различные способы формирования комплексных индексов при построении моделей систем. Это связано с особенностями той или иной предметной области, используемыми гипотезами или предположениями, а также сложившимися в научном сообществе представлениями или общепринятыми подходами. Кроме уравнений (3) и (4) также часто используются мультипликативные степенные функции и экспертные зависимости относительно исходных показателей в виде:

$$T = \beta \cdot \left(\frac{p_1}{p_{10}} \right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{p_2}{p_{20}} \right)^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot \left(\frac{p_n}{p_{n0}} \right)^{\alpha_n}; \quad (5)$$

$$T = \beta_1 \cdot \frac{p_1}{p_{10}} + \beta_2 \cdot \frac{p_2}{p_{20}} + \dots + \beta_n \cdot \frac{p_n}{p_{n0}}, \quad (6)$$

где β_k – весовые или стандартизированные коэффициенты. Могут также быть предложены и другие виды функций для задания значений комплексного индекса, например, функции в виде среднего геометрического $T = \sqrt[n]{p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n}$ или среднегеометрического взвешенного.

Будем считать, что комплексный индекс $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$ может быть представлен в виде произведений функций, зависящих от показателей $p_1, p_2, \dots, p_n$, а именно $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(p_n)$. Эта гипотеза охватывает класс уравнений вида (3) – (5). В статье [23] показано, что в этом случае для уравнения Пфаффа (2) существует интегрирующий делитель, который обращает данное уравнение в полный дифференциал. Интегрирующим делителем (2) будет функция $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(p_n)$. Подставляя данную функцию в (2) и деля это уравнение на величину T , получим:

$$ds = \frac{dw}{T} = c_1 \cdot \frac{\varphi_1'(p_1)}{\varphi_1(p_1)} dp_1 + c_2 \cdot \frac{\varphi_2'(p_2)}{\varphi_2(p_2)} dp_2 + \dots + c_n \cdot \frac{\varphi_n'(p_n)}{\varphi_n(p_n)} dp. \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7), представим общий интеграл в виде:

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln \left(\frac{\varphi_1(p_1)}{\varphi_1(p_{10})} \right) + c_2 \cdot \ln \left(\frac{\varphi_2(p_2)}{\varphi_2(p_{20})} \right) + \dots + c_n \cdot \ln \left(\frac{\varphi_n(p_n)}{\varphi_n(p_{n0})} \right), \quad (8)$$

где $s_0, p_{10}, \dots, p_{n0}$ – параметры опорного состояния.

Данную функцию состояния обычно называют энтропией. Таким образом, для скалярного поля вероятности $w(p_1, p_2, \dots, p_n)$ при задании комплексного индекса произведением функций $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(p_n)$ и справедливости функциональных связей в виде $dw = c_i \cdot dT$ может быть определено скалярное поле энтропии вида (8). Причем функция энтропии является аддитивной величиной, каждое слагаемое которой зависит только от одной величины p_k . Из сказанного видно, что смысл поиска функции энтропии связан с преобразованием координат $p_1, p_2, \dots, p_n$ таким образом, чтобы получить линейную аддитивную функцию относительно новых обобщенных координат вида:

$$s - s_0 = c_1 \cdot \psi_1(p_1) + c_2 \cdot \psi_2(p_1) + \dots + c_n \cdot \psi_n(p_1) = c_1 \cdot q_1 + c_2 \cdot q_2 + \dots + c_n \cdot q_n, \quad (9)$$

где $q_k = \psi_k(p_k)$ – преобразованные координаты в виде логарифмических функций.

Геометрически это означает, что энтропия в пространстве новых координат $q_1, q_2, \dots, q_n$ согласно (9) приводится к линейным зависимостям, которые обладают свойством аддитивности.

Таким образом, нелинейное преобразование координат при справедливости гипотез связи вероятности состояния системы с комплексным индексом вида $dw = c_i \cdot dT$ и возможности представления комплексного индекса мультипликативной функцией $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(p_n)$ позволяет с помощью преобразования $ds = \frac{dw}{T}$ представить

нелинейное скалярное поле вероятности в виде аддитивной линейной функции энтропии. Геометрически это выглядит так, что нелинейные многомерные линии скалярного поля вероятности состояния системы преобразуются в линейные многомерные линии скалярного поля энтропии этой системы.

Получим дифференциальное уравнение для описания скалярного поля вероятности. Из соотношения $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(p_n)$ имеем следующую зависимость:

$$\frac{\partial T}{\partial p_k} = \frac{\varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \dots \cdot \varphi'_k(p_k) \cdot \dots \cdot \varphi_n(p_n)}{\varphi_k(p_k)} \cdot \varphi_k(p_k)$$

откуда $\frac{\partial T}{\partial p_k} = \frac{\varphi'_k(p_k)}{\varphi_k(p_k)} \cdot T$ и $\frac{1}{c_k} \left(\frac{\partial w}{\partial p_k} \right) = \frac{\varphi'_k(p_k)}{\varphi_k(p_k)} \cdot T$,

так как $\frac{\partial w}{\partial p_k} = c_k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_k} \right)$. (10)

Суммируя соотношения (15) для всех n получим линейное неоднородное уравнение в частных производных первого порядка вида:

$$\frac{\varphi_1(p_1)}{c_1 \cdot \varphi'_1(p_1)} \left(\frac{\partial w}{\partial p_1} \right) + \frac{\varphi_2(p_2)}{c_2 \cdot \varphi'_2(p_2)} \left(\frac{\partial w}{\partial p_2} \right) + \dots + \frac{\varphi_n(p_n)}{c_n \cdot \varphi'_n(p_n)} \left(\frac{\partial w}{\partial p_n} \right) = n \cdot T. \quad (11)$$

В общем случае решение уравнения (11) осуществляется методом характеристик, которые определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$ds = c_1 \cdot \varphi'_1(p_1) \frac{dp_1}{\varphi_1(p_1)} = c_2 \cdot \varphi'_2(p_2) \frac{dp_2}{\varphi_2(p_2)} = \dots = c_n \cdot \varphi'_n(p_n) \frac{dp_n}{\varphi_n(p_n)} = \frac{dw}{n \cdot T}, \quad (12)$$

где s – параметр, который является энтропией в представлении (7). Если сложить все слагаемые уравнения (12) кроме последнего, то получим в точности уравнение (7).

Известно, что для уравнения (11) характеристики определяются системой уравнений (12), а семейство поверхностей ортогональных этим характеристикам определяется из скалярного произведения вектора

$$\vec{W} = \frac{\varphi_1(p_1)}{c_1 \cdot \varphi'_1(p_1)} \mathbf{e}_1 + \frac{\varphi_2(p_2)}{c_2 \cdot \varphi'_2(p_2)} \mathbf{e}_2 + \dots + \frac{\varphi_n(p_n)}{c_n \cdot \varphi'_n(p_n)} \mathbf{e}_n \quad (13)$$

и единичного вектора $\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 \cdot dp_1 + \mathbf{e}_2 \cdot dp_2 + \dots + \mathbf{e}_n \cdot dp_n$, а именно $(\vec{W} \cdot \mathbf{e}) = 0$.

Последнее соотношение можно представить в развернутом виде многомерного уравнения Пфаффа:

$$\frac{\varphi_1(p_1)}{c_1 \cdot \varphi'_1(p_1)} dp_1 + \frac{\varphi_2(p_2)}{c_2 \cdot \varphi'_2(p_2)} dp_2 + \dots + \frac{\varphi_n(p_n)}{c_n \cdot \varphi'_n(p_n)} dp_n = 0. \quad (14)$$

Если данное уравнение приводится к полному дифференциалу, то существует потенциал $P(p_1, p_2, \dots, p_n) = C$ пространства состояний H_n , который можно представить в виде семейства поверхностей ортогональных линиям энтропии ($s = const$). Для некоторых видов функций комплексного индекса можно получить простые функции потенциала.

Энтропия s и потенциал P могут быть приняты в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки состояний объектов в многомерном пространстве H_n . Их наиболее

важной особенностью является то, что данные величины являются функциями состояния системы при справедливости условия существования скалярного поля статистической вероятности w , а также то, что энтропия и потенциал отличаются свойством аддитивности. Изменение данных функций зависит только от начального и конечного состояния объекта и не зависит от пути его перехода между этими состояниями. Данные функции состояния определяют многомерные криволинейные координаты в пространстве H_n , при этом каждый объект в процессе своего изменения и развития будет занимать некоторое положение относительно этих координат.

Таким образом, благодаря нелинейному преобразованию координат, пространство H_n , где представлено скалярное поле вероятности состояния системы, может быть преобразовано в линейное пространство относительно величин энтропии и потенциала пространства состояний изучаемой системы. Это позволяет объективно провести многопараметрическое ранжирование объекта в иерархическом множестве других объектов, используя для анализа данные функции состояния.

Формулировка основных уравнений для комплексной оценки

Получим основные уравнения и соотношения для комплексной оценки сложных систем. В данном варианте построения теории важным является выбор среды моделирования, исходя из задания различных видов функций для индекса T . Решение уравнения Пфаффа (14) при постоянных величинах c_k зависит от вида функции $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$.

Так как изучаются распределения статистической вероятности различных событий, то рационально представить эту функцию в виде геометрической вероятности пространства H_n или в виде меры относительных изменений согласно (3) и (4). Так как данные уравнения идентичны, далее рассмотрим уравнение (4), для которого

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n}{p_{10} \cdot p_{20} \cdot \dots \cdot p_{n0}}.$$

$p_{10} \cdot p_{20} \cdot \dots \cdot p_{n0}$ можно рассматривать как некоторые пороговые (безопасные) уровни показателей, позволяющие выделить области опасных состояний системы.

Для данного комплексного индекса согласно (7) – (8) энтропию состояния системы можно представить следующим образом:

$$ds = \frac{dw}{T} = c_1 \cdot \frac{dp_1}{p_1} + c_2 \cdot \frac{dp_2}{p_2} + \dots + c_n \cdot \frac{dp_n}{p_n}, \quad (15)$$

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{10}}\right) + c_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{20}}\right) + \dots + c_n \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n0}}\right). \quad (16)$$

В свою очередь согласно (14), потенциал $P(p_1, p_2, \dots, p_n) = C$ может быть найден из уравнения:

$$\frac{p_1}{c_1} \cdot dp_1 + \frac{p_2}{c_2} dp_2 + \dots + \frac{p_n}{c_n} dp_n = 0 \quad (17)$$

или

$$P(p_1, p_2, \dots, p_n) = \frac{1}{2} \left(\frac{p_1^2 - p_{10}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{20}^2}{c_2} + \dots + \frac{p_n^2 - p_{n0}^2}{c_n} \right), \quad (18)$$

где принято, что $P(p_{10}, p_{20}, \dots, p_{n0}) = 0$.

Таким образом, для комплексного индекса вида (3) – (4) можно ввести обобщенные координаты в виде энтропии и потенциала, которые позволят в преобразованном пространстве координат линеаризовать нелинейное скалярное поле вероятности состояния системы.

Рассмотрим теперь уравнение (5) для комплексного индекса следующего вида

$$T = \beta \cdot \left(\frac{p_1}{p_{10}}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{p_2}{p_{20}}\right)^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot \left(\frac{p_n}{p_{n0}}\right)^{\alpha_n}. \quad \text{Можно}$$

показать, что для данного уравнения при $\beta = 1$ энтропия состояния системы представляется в виде уравнения:

$$s - s_0 = c_1 \cdot \alpha_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{10}}\right) + c_2 \cdot \alpha_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{20}}\right) + \dots + c_n \cdot \alpha_n \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n0}}\right), \quad (19)$$

а потенциал состояния системы в виде уравнения:

$$P(p_1, p_2, \dots, p_n) = \frac{1}{2} \left(\frac{p_1^2 - p_{10}^2}{c_1 \cdot \alpha_1} + \frac{p_2^2 - p_{20}^2}{c_2 \cdot \alpha_2} + \dots + \frac{p_n^2 - p_{n0}^2}{c_n \cdot \alpha_n} \right). \quad (20)$$

В свою очередь, при представлении комплексного индекса в виде уравнения (6), энтропия и потенциал могут быть представлены следующим образом:

$$s - s_0 = \frac{c_1}{n} \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{10}}\right) + \frac{c_2}{n} \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{20}}\right) + \dots$$

$$+ \dots + \frac{c_n}{n} \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n0}}\right), \quad (21)$$

$$P(p_1, p_2, \dots, p_n) = \frac{1}{2} \left(\frac{p_1^2 - p_{10}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{20}^2}{c_2} + \dots + \frac{p_n^2 - p_{n0}^2}{c_n} \right). \quad (22)$$

Соответствующие зависимости могут быть получены, исходя из однородности функции (6) и справедливости уравнения (16) для этого случая, когда степень однородности функции (6) принимается равной единице.

Таким образом, используя предложенную теорию комплексной оценки и задавая различные функции комплексного индекса T , можно преобразовывать нелинейное пространство вероятности состояний системы в линейное пространство и потом проверять полученные зависимости на адекватность путем обработки имеющихся опытных данных об изменении и развитии той или иной системы.

Приведенные ранее зависимости (3) – (6) являются достаточно простыми. Надо отметить, что энтропия состояния системы согласно (8) может быть определена для самых различных функций комплексного индекса, представленных в виде произведений функций относительно показателей $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(p_n)$. В свою очередь, решение для потенциала будет определяться из соотношения (9).

Поэтому в каждом конкретном случае решения прикладной задачи необходимо обосновывать выбор индекса T для комплексной оценки и определять конкретные зависимости энтропии s и потенциала P для этого случая. Теоретически получить соответствующие зависимости достаточно легко, однако оценка адекватности данных зависимостей по отношению к опытным данным является не совсем простой задачей. В общем случае мы приходим к необходимости использовать при обработке опытных данных обобщенные координаты в виде энтропии и потенциала. Если эмпирически с учетом принятых гипотез удастся получить качественные регрессионные зависимости, позволяющие связать вероятность состояния системы с энтропией пространства состояний $w = \varphi(s)$, где s – энтропия в виде выражения (8), то данные могут быть преобразованы в линейное пространство и возможна комплексная оценка объектов на основе новых преобразованных переменных. При этом в уравнении $w = \varphi(s)$ феноменологические

величины c_k определяются по опытным данным методами нелинейной регрессии.

Область применения данного метода охватывает процессы, которые медленно меняются во времени и для которых существуют функции распределения характерных событий $w = w(p_1, p_2, \dots, p_n)$ и непрерывные производные $c_l = \frac{dw}{dT}$. Важной

особенностью применения метода является наличие структурированных данных наблюдений для изучаемых сложных систем, которые могут быть представлены в таблично-временном виде. Основные процессы, характерные для многих экологических и социальных систем, обычно медленно протекают во времени, так как показатели этих систем достаточно устойчивы. Практика анализа данных также показывает, что для большинства систем могут быть получены функции вероятностных распределений для различных характерных событий, поэтому вполне возможно установление фундаментальных закономерностей на основе феноменологических описаний процессов изменения состояний систем [22 – 26].

Таким образом, предложенный метод позволяет для различных аспектов развития построить в вероятностном пространстве модели комплексной оценки состояний систем и идентифицировать эти модели по опытным данным.

Выводы

В экологии, охране окружающей природной среды, техногенной и экологической безопасности, биологии, оценке биоразнообразия и социально-экономического развития стран и регионов накоплены большие базы данных, позволяющие вести речь об установлении феноменологических закономерностей развития различных объектов и разработать методы комплексной оценки и многопараметрического ранжирования этих объектов. Существует множество открытых источников данных, которые несут информацию о компонентах и аспектах развития городов, регионов и стран мира, а также техногенных и природно-промышленных комплексов.

Предложенные методы и модели использовались при анализе структурированных статистических данных, решении тестовых задач и разработке методик комплексной оценки для следующих сложных систем:

- урбоэкосистемы городского типа (населенные пункты и города) для изучения загрязнения природных сред и экологической обстановки, анализа негативных и опасных

воздействий на окружающую среду и человека, а также для исследования процессов экологического развития городов;

- страны Европы и мира для исследования экологических процессов и оценки процессов человеческого развития;

- биологические и природные системы для комплексной оценки биоразнообразия и изучения состояния природно-антропогенных систем по показателям биоразнообразия.

Соответствующие результаты, связанные с практическим применением предложенных методов комплексной оценки, приведены в статьях автора [24 – 27].

Разработанные модели и методы позволяют предложить расчетные зависимости для комплексной оценки и многопараметрического ранжирования различных объектов и систем. Особенностью данных зависимостей является то, что они отличаются использованием объективных методов анализа данных.

Литература

1. Смольянинов В.М., Русинов П.С., Панков Д.Н. Комплексная оценка антропогенного воздействия на природную среду при обосновании природоохранных мероприятий. Воронеж: ВГАУ, 1996. – 126 с.
2. Мусихина Е.А. Методологический аспект технологии комплексной оценки экологической емкости территорий. Издательство «Академия Естествознания», 2009. – Электр. ресурс. URL: <http://www.monographies.ru/31> (23.04.2015).
3. Артюхов В.В., Мартынов А.С. Системная методология оценки устойчивости природно-антропогенных комплексов: теория, алгоритмы, количественные оценки. 2013. – 142 с. – Электр. ресурс. URL: <http://www.sci.aha.ru/ots/Metodology.pdf>, www.sci.aha.ru (23.11.2014).
4. Буренков Э.К., Гинзбург Л.Н., Грибанова Н.К., Зангиева Т.Д. и др. Комплексная эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения окружающей природной среды // ИМГРЭ, ЗАО «РИФТ», М.: Прима-Пресс, 1997.
5. Александрова Л.В., Васильев В.Ю., Дмитриев В.В. и др. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. // Под ред. В.В. Дмитриева и Н.В. Хованова. – Деп. ВИНТИ № 2342В00, 2000. – 275 с.
6. Алимов А.Ф., Дмитриев В.В., Флоринская Т.М. и др. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий. // Под ред. А.К.Фролова. –

- С.-Пб., 1999. – 253 с.
7. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). – Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. – 280 с.
 8. Дмитриев В.В. Методика диагностики состояния и устойчивости водных экосистем // Эколого-географический анализ состояния природной среды: проблема устойчивости геосистем. // Под ред. П.П. Арапова и Ю.П. Селиверстова. – С.-Пб.: РГО, 1995. – С. 41 – 67.
 9. Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы / В.В. Дмитриев // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). – 2009. – № 4. – С. 146 – 165.
 10. Колдобская Н.А. Методические подходы к оценке антропогенного воздействия на урбанизированные территории на примере Московской области // Экология и промышленность России. – 2013. – № ноябрь 2013. – С. 28 – 33.
 11. Згуровский М.З. Глобальное моделирование процессов устойчивого развития в контексте качества и безопасности жизни людей (2005 – 2007/2008 годы). – К.: Политехника, 2008. – 331 с.
 12. Глобальная экологическая перспектива: ГЕО4 окружающая среда для развития. // Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, 2007. – 572 с.
 13. Guidelines for Ecological Risk Assessment // U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, DC, 1998. – 114 p. – Электр. ресурс. URL: <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=12460> (21.11.2014).
 14. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М.: НУМЦ Минприроды России, 1996. – 207 с.
 15. Розенберг Г.С. Модели в фитоценологии. – М.: Наука, 1984. – 265 с.
 16. Доклады о человеческом развитии (1990 – 2013 гг.). – Электр. ресурс. URL: <http://hdr.undp.org/en/reports/> (25.04.2015).
 17. Доклад о мировом развитии. Пер. с англ. публикации Всемирного банка: 2000 – 2012. М.: Весь мир. – Электр. ресурс. URL: <http://www.vesmirbooks.ru/books/reports/wdr/>, www.worldbank.org (15.12.2014).
 18. Защита окружающей среды Европы – Четвертая оценка. Европейское агентство по окружающей среде, Копенгаген. Дания: Schultz Grafisk, 2007. – 452 с. – Электр. ресурс. URL: eea.europa.eu (13.05.2015).
 19. Украина в мире. Обзор международных индексов. Фонд «Эффективное управление». – 64 с. – Электр. ресурс. URL: www.feg.org.ua, www.competitiveukraine.org (20.02.2015).
 20. Отчет о конкурентоспособности регионов Украины 2013. Навстречу экономическому росту и процветанию. Фонд «Эффективное управление», Украина. 2013. – 236 с. – Электр. ресурс. URL: competitiveukraine.org, http://www.feg.org.ua/uploadfiles/ckfinder/files/reports/2013/FEG_report_2013_body_rus.pdf (21.12.2014).
 21. Сравнение стран. Описание индексов. Рейтинг регионов. Проект фонда «Эффективное управление» – Электр. ресурс. URL: http://www.feg.org.ua/cms/opisanie_indeksov.html (25.11.2014).
 22. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Взаимосвязь термодинамической и информационной энтропии при описании состояний идеального газа // Сборник научных трудов САИТ. Донецк, 2013. – № 1 (4) – 2(5). – С. 26 – 38.
 23. Аверин Г.В. Системодинамика: наука о закономерностях процессов изменения и развития систем во времени. – Palmarium Academic Publishing, 2014. – 488 с.
 24. Zviahintseva A.V. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems // Сборник научных трудов САИТ. Донецк, 2014. – № 1 (6) – 2(7).
 25. Звягинцева А.В. Модели существования и распространения видов животных для количественной оценки биологического разнообразия // Сборник научных трудов САИТ. Донецк, 2013. – № 1 (4) – 2(5). – С. 81 – 95.
 26. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. Метод комплексной оценки загрязнения атмосферного воздуха на основе определения вероятностей неблагоприятных событий // Геотехническая механика. Днепропетровск, 2015.
 27. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. Стратегическая оценка статуса Украины в современном мире по данным международных организаций. Часть 2: Примеры анализа и результаты // Сборник научных трудов САИТ. Донецк, 2013. – № 1 (4) – 2(5). – С. 46 – 55.

Звягинцева А.В. Построение моделей для комплексной оценки состояния сложных систем на основе феноменологического анализа опытных данных. Предложены принципы и теоретические методы комплексной оценки сложных систем на основе использования массивов данных наблюдений и определения статистических вероятностей событий, характеризующих состояния изучаемых систем. Основные гипотезы исследования связаны с возможностью создания на основе опытных данных феноменологических моделей систем, отличающихся многомерным полемым представлением массивов данных, а также существованием скалярного поля распределений статистической вероятности характерных событий, наиболее полно отражающих изменения в состояниях систем. В качестве таких событий могут рассматриваться самые разные сложные события (как опасные, так и не опасные), которые характеризуют изменения в состояниях систем, особенности поведения этих систем или некоторые ситуации, связанные с наблюдением опасных и негативных событий или нанесением ущерба. Сформулированы принципы существования энтропии и потенциала для многомерного пространства состояний сложной системы. Показано, что энтропия и потенциал могут быть приняты в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки. Разработанные модели позволяют предложить для практики расчетные зависимости для комплексной оценки и многопараметрического ранжирования различных объектов и систем, которые отличаются использованием объективных методов анализа данных.

Комплексная оценка, сложные системы, феноменологический анализ, многомерное пространство, энтропия, многопараметрическое ранжирование

Zvyagintseva A.V. Construction of models for integrated assessment of complex systems based on the phenomenological analysis of the experimental data. The principles and theoretical methods for integrated assessment of complex systems through the use of observational datasets and determining the statistical probabilities of events that characterize the state of the systems under study. The main hypothesis of the study related to the ability to create on the basis of experimental data of phenomenological models of systems with different multi-dimensional representation of field data sets, as well as the existence of a scalar field of statistical probability distributions of specific events that most fully reflect the changes in the systems states. As such events may be considered a variety of complex events (both dangerous and not dangerous) that characterize the changes in the systems states, especially the behavior of these systems, or certain situations related to the supervision of dangerous and adverse events or damages. Stated the principles of entropy existence and the potential for a multi-dimensional space of complex system states. It is shown that both the potential and entropy can be taken as generalized criteria for the overall assessment. The elaborated models allow to offer to practice calculated accordings for integrated assessment and multi-parameter ranking of various objects and systems that are distinguished by the use of data analysis objective methods.

Integrated assessment, complex systems, phenomenological analysis, multidimensional space, entropy, multiparameter rankings

Статья поступила в редакцию 20.09.2015
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук В.Н. Павлышом