

ТЕОРИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РИШЕНЬ

Работа посвящена проблеме расширения возможностей в изучении влияния неопределенности на безопасность сложных систем, для которых неадекватны стандартные методы исследования. На основе теории катастроф предложена методология моделирования режимов с внезапными, нарушающими непрерывность изменениями, вызывающими нестабильность широкого круга сложных систем от экономики и экологии до социологии и биологии.

© К.Л. Атоев, В.А. Пепеляев,
2007

УДК КП 658.012.011.56

К.Л. АТОЕВ, В.А. ПЕПЕЛЯЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В последнее время резко возросла частота маловероятных событий и их разрушающая мощность. Происходит резкий рост числа природных и техногенных катастроф, финансовых и экономических кризисов. Уникальный характер редких событий затрудняет корректное использование теории вероятности для оценки риска, вызывает кризис систем управления, уменьшает горизонт прогнозирования экстремальных явлений, особенно связанных со степенным законом распределения плотности вероятности величины ущерба, убывающего более медленно, чем гауссовский закон распределения вероятности. Анализ редких событий показывает, что они, как правило, связаны с внезапными, скачкообразными изменениями, являющимися результатом малых непрерывных воздействий на систему. Традиционные методы прогнозирования их поведения не являются достаточно эффективными для событий такого рода. Новые риски требуют новых методов исследования. Таким образом, необходимость работы обусловлена появлением новых форм глобальных проблем, связанных с широким кругом ассиметричных угроз, высокой чувствительностью к начальным условиям, повышением возможности того, что малое нарушение может привести к непредсказуемым экологическим, экономическим, эпидемиологическим, социальным и политическим последствиям.

Моделирование возникновения неустойчивости сложных систем. Методология моделирования разработана на основе математического формализма для моделирования нелинейных систем, поведение которых показывает внезапные, скачкообразные изменения или фазовые переходы, являющиеся следствием малых непрерывных изменений в переменных, которые воздействуют на систему – теории катастроф (ТК), которая применялась к широкому кругу различных систем – физическим, инженерным, биологическим, психологическим и социологическим. Небольшой перечень специфических явлений, которые анализировались и моделировались с помощью ТК, включает квантовый морфогенез, образование каустик в лучевой оптике, стабильность черных дыр, морфогенез, бистабильность восприятия [1].

Методология оценки риска внезапного перехода из одного стационарного состояния в другое, базирующаяся на использовании ТК, рассмотрена в [2–4]. Она позволяет проводить расчет бифуркационных значений, кривых и поверхностей параметров управления. Вероятность перехода оценивается как мера приближенности значений параметров управления к их бифуркационным значениям, которые характеризуют переход системы из одного стационарного состояния (норма) в другое (катастрофа).

Допустим, что сложная система удовлетворяет всем требованиям потенциальной системы и может быть описана потенциальной функцией $U(x, A_1, A_2, \dots, A_N)$ поведенческой переменной x и параметров управления A_i . Динамика детерминистической градиентной системы описывается уравнением вида

$$dx/dt = - \partial U / \partial x. \quad (1)$$

Уравнение (1) означает, что переменная x изменяется в направлении уменьшения потенциала со скоростью пропорциональной наклону градиента потенциального поля. Равновесным многообразием данной системы является множество величин x таких, что $dx/dt = - \partial U / \partial x = 0$.

Например, если

$$U(x, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) = 1/6 x^6 + 1/4 A_1 x^4 + 1/3 A_2 x^3 + 1/2 A_3 x^2 + A_4 x + A_5, \quad (2)$$

то система находится в равновесии, когда $x^5 + A_1 x^3 + A_2 x^2 + A_3 x + A_4 = 0$.

Функция U имеет 5 стационарных состояний; 3 из них устойчивые, 2 – неустойчивые. Переход системы из одного стационарного состояния в другое, или изменение характера стационарного состояния (например, из устойчивого в неустойчивое) является функцией параметров управления A . Эти параметры управляют как движением изображающей точки системы по поверхности U , так и трансформацией самой этой поверхности.

Число стационарных состояний системы можно определить на основе анализа множества исходных данных. Предположим, что этот анализ показывает, что исследуемая сложная система имеет три устойчивых стационарных состояния. Для простоты, можно высказать следующие предположения. Первое устой-

чивое стационарное состояние характеризует нормальные условия. Уровень x в этом состоянии минимальный. Второе – характеризует состояние со средним x . Третье – характеризует кризис с высоким уровнем x . При данных предположениях потенциальная функция U описывается уравнением (2).

Этот случай с тремя устойчивыми стационарными состояниями и четырьмя параметрами управления соответствует одной из универсальных деформаций теории катастроф – “бабочке”:

$$-\partial U(x, A)/\partial x = x^5 + A_1x^3 + A_2x^2 + A_3x + A_4. \quad (3)$$

Для минимизации уязвимости сложных систем предлагается методология, включающая следующие этапы: сбор и анализ исходной информации; определение функции $U(x, A)$ на основе множества экспериментальных данных с помощью технологии предложенной в [5]; отображение множества исходных данных во множество параметров управления катастрофы с помощью соответствующих преобразований; определение индексов, характеризующих параметры управления, на основе множества исходных данных и соответствующих математических моделей, позволяющих определение траектории параметров управления во времени; вычисление бифуркационных поверхностей, при пересечении которых изменяется число или характер стационарных состояний; оценка риска перехода с одного уровня уязвимости на другой по степени удаленности точки, описывающей текущее состояние системы от бифуркационных поверхностей, разделяющих разные уровни безопасности.

Сдвиги в отношениях между A_i могут вызвать переходы из нормы в предкризисное или в кризисное состояние. Бифуркационные значения этих параметров могут быть рассчитаны с помощью предложенных математических методов. Достижение таких критических величин резко увеличивает вероятность перехода из одного функционального состояния в другое. Таким образом, для данного состояния системы, можно определить области значений параметров, соответствующих норме, предкризисному и кризисному состояниям.

Главное преимущество предложенной методологии моделирования возникновения неустойчивости сложных систем заключается в том, что она позволяет определить трансформацию уязвимости сложной системы, как функцию динамических переменных.

Возможности исследования неустойчивости сложных систем. В работах [2–4, 6–11] проведена структуризация сложных систем в широком спектре дисциплин. Алгоритмизация взаимосвязей в указанных системах позволила на основании анализа исходных данных обосновать вид функции $U(x, A)$. В табл. 1, 2 приведена классификация параметров управления, используемых для исследования ряда систем в экологии, биологии, психологии и социологии. В табл. 3 приведена классификация параметров управления, используемых для исследования глобальных изменений, экономических, биологических (охрана здоровья, нейро-иммунно-эндокринная сеть (НИЭС), клеточный энергетический триггер,

метаболическая и гормональная регуляция), эпидемиологических (прогноз распространения инфекционных заболеваний, управление эпидемическим процессом и ранжирование рисков) и политических систем с помощью катастрофы типа “бабочка” (3).

ТАБЛИЦА 1

$\partial U/\partial x$	Параметры управления	
	A_1	A_2
$x^3 + A_1x + A_2$	Биологические системы: расчет вероятности возникновения предпатологических и патологических состояний [2]	
Тип катастрофы – “сборка”	Определяется резервами биологической системы	Определяется напряженностью регуляторных механизмов
	Экологические системы: расчет критических уровней загрязнений и резервов экосистемы [3, 4]	
	Определяется резервами экологической системы	Определяется уровнем загрязнения среды обитания
	Психологические системы: формирование позиции	
	Зависит от эмоциональной оценки ситуации с точки зрения ее важности	Зависит от рациональной оценки ситуации с точки зрения вероятности выгод и потерь

ТАБЛИЦА 2

$\partial U/\partial x$	Параметры управления		
	A_1	A_2	A_3
$x^4 + A_1x^2 + A_2x + A_3$	Социальные системы: исследование влияния физического, человеческого и социального капиталов социальную безопасность		
Тип катастрофы – “ласточкин хвост”	Зависит от индекса устойчивого развития, оценивающего вклад эндогенных факторов (экономических, экологических и социальных) в изменение безопасности	Определяется индексом глобализации, который оценивает вклад экзогенных факторов (сдвиги в структуре взаимосвязей в глобальном мире) в изменении безопасности	Определяется индексом социального капитала, оценивающим степень человеческой корпорации в обществе, позволяющей индивидуумам сотрудничать в информационном обществе в рамках определенного „радиуса доверия”

Таким образом, вышерассмотренный подход может применяться к различным сложным системам от экологии и экономики до психологии и социологии

и может лечь в основу разработки средств для расширения горизонта прогнозирования, выработки глобальной стратегии предотвращения экстремальных и редких явлений, недостаток в которых остро ощущается в настоящее время.

ТАБЛИЦА 3

Параметры управления			
A_1	A_2	A_3	A_4
Глобальные системы [6, 7]			
Зависит от способности предотвращать / минимизировать последствия аварий	Зависит от стимуляторов насилия, ментальной дезадаптации, эпидемий, суицидов	Зависит от факторов, вызывающих стихийные бедствия из-за климатических сдвигов	Зависит от факторов, повышающих риск техногенных аварий и антропогенную нагрузку
Экономические системы [8]			
Зависит от факторов, характеризующих рынок труда: индекс Джини безработица и др.	Зависит от факторов, характеризующих рынок денег: кредиты, инфляция и др.	Зависит от факторов, связанных с рынком ценных бумаг: деловая активность и др.	Зависит от факторов, связанных с рынком товаров и услуг: доходы населения ВВП, др.
Биологические системы [9, 10]			
Зависит от энергетики клеток, биологически активных веществ, гормонов, НИЭС	Зависит от баланса синтеза и расхода энергии, адаптационного потенциала клеток	Зависит от психического статуса организма, формирующего ментальное здоровье	Зависит от генетической предрасположенности (наследственной)
Эпидемиологические системы [11]			
Зависит от скорости размножения возбудителей, их устойчивости к лекарствам и др.	Зависит от устойчивости к вирусам, резервов и иммунного статуса организма	Зависит от качества противоэпидемических служб, наличия вакцин и оборудования	Зависит от влияния окружающей среды на устойчивость организма к инфекциям
Политические системы			
Зависит от сети идей – верований, доказательств, дефиниций	Зависит от сети правил – предписаний, норм, идеалов, ценностей	Зависит от сети действий – упорядочения статусов, иерархий, кругов общения	Зависит от сети интересов – возможностей, шансов, доступа к ресурсам

Исследование влияния глобальных изменений на водные ресурсы. Дефицит водных ресурсов оказывает влияние на устойчивое развитие и безопасность. Прогнозируется, что в недалеком будущем рынок водных ресурсов будет аналогичен современному рынку энергоносителей с его острой конкуренцией и борьбой в “горячих точках” глобального мира. По этой причине становится актуальной задача создания систем поддержки принятия решений для исследования взаимосвязей в системе глобальный мир – водные ресурсы – уязвимость общества. В основу таких систем может быть положен подход, рассмотренный в данной работе.

Пусть X – уровень глобализации, определяемый уровнями технологического развития, экономической интеграции, интенсивностью персональных контактов между людьми и политических обязательств, Y – уровень доступных водных ресурсов, Z – уровень нестабильности, связанной с борьбой за водные ресурсы. Было показано, что взаимосвязь между указанными переменными, описывается с помощью модели метастабильного хаоса Лоренца [4]:

$$dX/dt = \sigma(Y - X), \quad dY/dt = rX - Y - XZ, \quad dZ/dt = XY - bZ. \quad (4)$$

Здесь σ , b , r характеризуют скорости процессов. Параметр r – функция текущих спросов и предложений на уровне глобализации и водных ресурсов. Флуктуации параметра r вызывают существенные трансформации динамики системы. Существуют интервалы соотношения спрос-предложение, которые соответствуют разным режимам функционирования. На границах таких интервалов флуктуации могут приводить к катастрофическим последствиям, связанным с переходом от устойчивости к неустойчивости (рисунок).

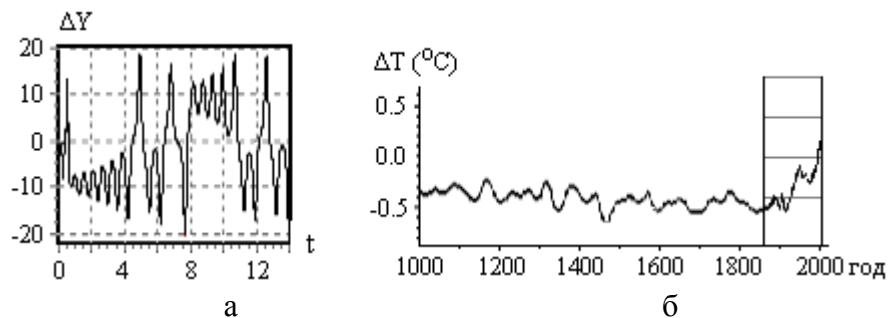


РИСУНОК. Режимы метастабильного хаоса: а – моделирование отклонения уровня водных ресурсов от начального состояния ΔY ; б – средняя температура поверхности Земли ΔT в Северном Хэмпшире за 50 летние интервалы измерений [12]

Хаотические колебания ΔY , полученные с помощью модели (4) показаны на рисунок, а (ΔY и время t даны в условных единицах). Как свидетельствуют результаты наблюдений [12], начиная с 1860 года происходит существенное из-

менение колебаний ΔT , так, что временной интервал, отмеченный прямоугольником на рисунке, б – пример бифуркационной зоны, в которой произошла потеря устойчивости функционирования.

Заключение. Проведенное исследование связано с разработкой новых методов моделирования для решения комплексных задач адаптивного управления поведением систем в неустойчивой неравновесной среде при сильной зависимости от начальных условий и сильных информационных перегрузках. Предложенный подход позволяет подойти к решению ряда кардинальных вопросов, связанных с кризисом современных систем управления: минимизировать запаздывание между началом катастрофических изменений и моментом их обнаружения; трансформировать приоритеты с реагирования на последствия (тактика «планирования вчерашнего дня») на управление риском событий; определить оптимальное перераспределение средств и эффективных воздействий (управлений), минимизирующих ущерб от природных и техногенных катастроф, так же как и от террористических актов; ранжировать различные типы угроз, выявлять слабые звенья сложной системы, оценивать ее адаптивность к быстро меняющемуся миру.

К.Л. Атоев, В.А. Пепеляев

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ВИНИКНЕННЯ НЕСТАБІЛЬНОСТІ
СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Робота присвячена проблемі розширення можливостей у вивченні впливу невизначеності на безпеку складних систем для яких не є адекватними стандартні методи дослідження. На основі теорії катастроф запропонована методологія моделювання режимів з раптовими змінами, які порушують неперервність та викликають нестабільність широкого кола систем від економіки та екології до соціології та біології.

K.L. Atoyev, V.A. Pepelyaev

MODELING OF MECHANISMS OF COMPLEX SYSTEM INSTABILITY

The main objective of the work is to strengthen the capacity in study of uncertainty impact on security of complex systems for which standard modeling methods are inadequate. The regimes with sudden, discontinuous changes that cause the instability have been modeling for a wide range of different complex systems from economics and ecology to sociology and biology.

1. *Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир, 1980. –607 с.
2. *Атоев К.Л.* Разработка автоматизированной технологии для оценки риска возникновения необратимых изменений на разных уровнях организации биосистем // Моделирование функционального состояния организма и управление им. – Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 1993. – С. 4–30.
3. *Atoyev K.L.* Risk Assessment in Ukraine: New Approaches and Strategy of Development // Assessment and management of environmental risks: methods aid applications in Eastern

- European and developing countries /eds I. Linkov, J.M. Palma Oliveira. – Amsterdam: Kluwer, 2001. – P. 195–202.
4. *Атоев К.Л.* The Challenges to Safety in East Mediterranean: Mathematical Modeling and Risk Management of Marine Ecosystem // Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences. – 2005. – **50**. – P. 179–197.
 5. *Lange R., Oliva T.A., McDade S.R.* An Algorithm for Estimation Multivariate Catastrophe Models: GEMCAT II // Studies in Nonlinear Dynamics and Econometrics. – 2000. – **4**. – P. 137–168.
 6. *Атоев К.Л., Пепеляев В.В., Томин А.А.* Нелинейная динамическая модель для интегральной оценки системных рисков в техногенной сфере // Компьютерная математика. – 2006. – № 1. – С. 29 – 40.
 7. *Атоев К.Л., Пепеляев В.В.* Математическая модель для исследования влияния флуктуаций на трансформацию пространства безопасности // Таврический вестник информатики и математики. – 2006. – № 1. – С. 116 – 126.
 8. *Атоев К.Л.* Investigation of the influence of economic, financial, political and social factors on risk of social shocks // Proc. 9th Ann. Conf. “Risk Analysis: Facing the New Millenium”. – Rotterdam: 1999. – P. 616–619.
 9. *Атоев К.Л.* Mathematical modeling of metabolic and hormonal regulation: risk assessment of environmental and radiation influence on various links of endocrine system // НАИТ J. of Science and Eng., В. – 2005. – **2**. – N 1-2. – С. 31 – 53.
 10. *Атоев К.Л.* Оптимальное управление нормализацией энергетического баланса клетки // Теорія оптимальних рішень. – 2006. – № 5. – 76– 84.
 11. *Оценка эскалации ВИЧ-инфекции и СПИДа в Украине. Информационная технология управления эпидемическим процессом и ранжирования рисков / О.В. Лапушенко, К.Л. Атоев, С.П. Бережнов и др. // Врачебное дело. —2004. —№ 5/6. — С. 3–17.*
 12. *Climate Change 2001 - Impacts, Adaptation, and Vulnerability. IPCC Third Assessment Report (2001) /eds. J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White. Cambridge: University Press. – 2001. – 98 p.*

Получено 31.01.2007