

А. Ю. Переварюха, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, madelf@pisem.net

Когнитивное моделирование в анализе структурного взаимодействия экологических процессов Северного Каспия¹

В статье применен метод концептуальной структуризации информации о взаимодействии природных и антропогенных факторов в виде графовых моделей. Запуск цепочки импульсов в знаковом орграфе, результирующем когнитивный анализ экологических взаимосвязей, привел в исследуемой ситуации деградации биоресурсов Каспия к оригинальной динамической системе, моделирующей эффективность воспроизводства осетровых рыб на основе представления модельного времени в вычислительной среде как гибридного мультимножества.

Ключевые слова: компьютерное моделирование популяционных процессов, методы когнитивной структуризации, гибридные динамические системы.

Введение

Регулярно наблюдаются критические сокращения промысловых запасов ценных популяций, промысел которых регулируется с применением научно обоснованных рекомендаций. Предотвращение подобных ситуаций является задачей контролирующих правила рыболовства организаций, принимающих решения на основе некоторой неполной ретроспективной информации о состоянии запасов и экстраполирующих ее в прогнозах. Очевидно, сформулированные на основе неполных данных ожидания будут допустимыми только при сохранении действовавших ранее факторов и глобальных трендов.

Нелинейные динамические модели позволяют рассматривать качественные изменения процессов, но возникает проблема их существенной биологической интерпретации и критериев объективности построения для задач расчета оптимальной эксплуатации биоресурсов. Опыт показывает: даже выбирая на основе решений конечно-раз-

ностных уравнений оптимальные значения параметров эксплуатации в компьютерных моделях популяционной динамики, трудно оценивать реакцию экологических систем в условиях антропогенного воздействия и интродукции новых видов. Специалистами достаточно давно обсуждается необходимость применения гибких методов структурного анализа сведений о динамике взаимосвязанных исследуемых процессов. По нашему мнению, обсуждаемые в статье когнитивные подходы к структуризации противоречивой экспертной информации актуальны, должны составлять обоснование разработки имитационных моделей и использоваться на этапе экологической интерпретации результатов вычислительных экспериментов.

О классификации методов моделирования в экологии

Изначально принципы разработки популяционных моделей были заимствованы из теоретической физики. Однако физика наука универсальная, имеет дело с четырьмя фундаментальными взаимодействиями, одинаковыми во всех точках Вселенной, тогда как в экологии взаимовлияния фак-

¹ Работа выполнена в рамках Проекта РФФИ № 14-07-00066.

торов могут обрасти обратными связями, иногда превращаясь в противоположно направленный процесс. Один фактор может оказывать прямое положительное и опосредованное отрицательное влияние на благополучие репродуктивного процесса. Например, при затоплении территории водохранилищ увеличится площадь нерестилищ, но заливание грунта ухудшит условия нереста рыб. «Знак» влияния относителен. Похожее наблюдается в реакторе, где обычная вода вместе с поглощением тепловых нейтронов замедляет нейтронный поток.

Известная модель «хищник — жертва» для специалистов-зоологов служит примером шаблонного подхода математиков к экологическим проблемам, так как флуктуации численности зайцев происходят за пределами ареала обитания рысей. Вито Вольтерра адаптировал свои разработки в области механики деформируемого твердого тела к биологическим проблемам. Классическая математическая модель формализует некоторые представления о характере взаимодействий как об инвариантных во времени. Например, биомасса жертв переходит в биомассу хищников пропорционально их произведению. Основоположник математического подхода к динамике популяций Вито Вольтерра предполагал описывать взаимодействие видов системой интегро-дифференциальных уравнений, но из-за трудности их анализа подход не получил практического развития. Существует множество разновидностей моделей «хищник — жертва» как систем дифференциальных уравнений, в том числе современные разработки для уравнений с переменным запаздыванием [1].

Методологически полезным нам представляется выработать систематизацию популяционных моделей. В данной области можно классифицировать модели по их свойствам динамических систем, но можно разделить по заложенным в их структуре теоретическим гипотезам. Как было отмечено в [2], имеющие различный теоретический базис нелинейные ихтиологические модели обладают сходными качественными изменениями поведения траектории. Метаморфозы качественного поведения, бифуркации с переходом к хаотическому движению и другие сложные динамические режимы представляют отдельную малоизученную проблему для компьютерного моделирования популяционных процессов. В рамках проблем исследуемой экосистемы интересен вопрос сопоставления нелинейных эффектов с описанием наблюдений. Требования адекватности накладывают ограничения на возможности интерпретации вычислительных результатов, соответственно разграничивая диапазоны в пространстве модельных параметров.

Для этапа анализа сведений о противоречивом влиянии различных факторов развиваются когнитивные методы системного анализа, работающие с качественной информацией. В статье рассматриваются методы когнитивной структуризации, которые могут стать «указующим перстом» в формировании динамических моделей экологических процессов, и они же могут быть использованы при сущностной интерпретации результатов вычислительных экспериментов.

Обзор комплексных последствий антропогенных изменений

В XX в. огромные пресноводные экосистемы подверглись масштабным антропогенным изменениям. Долгосрочная оценка многообразия последствий вмешательства является задачей междисциплинарных исследований.

Наиболее существенно последствия зарегулирования стока рек отражаются на возможностях размножения анадромных видов — лососевых и осетровых. Для созревающих в море рыб становятся недоступными используемые ранее пригодные для нереста участки в верховьях рек. Восполнить потери в воспроизводстве популяций ценных промысловых рыб Волги предполагалось за счет технологии искусственного оплодотворения икры, искусственного выращивания молоди и последующего ее выпуска.

В 1975 г. была принята стратегия максимизации ежегодного вылова (до 30 тыс. т) за счет выпуска (порядка 90 млн шт.) молоди осетровых как основного источника формирования запасов, не только компенсирующего, но и превосходящего потери в естественном воспроизводстве при гидростроительстве. К поставленной цели резкого увеличения масштабов выпуска удалось приблизиться в результате строительства рыбоводных предприятий для искусственного выращивания молоди. В 1977 г. уловы осетровых достигли максимума — 27,3 тыс. т, однако затем начали неуклонно уменьшаться [3]. Ситуация с промыслом осетровых рыб Каспия развивалась в точном соответствии с предупреждением, высказанным в 1950 г. основоположником метода гормональных инъекций профессором Н. Л. Гербильским: «Поддержать относительно благополучное в численном отношении стадо неизмеримо легче, чем восстанавливать его из жалких остатков». На настоящий момент эксперты Международного союза охраны природы (IUCN) констатируют деградацию трех популяций осетровых Каспия, имеющих с 2010 г. в Красной книге статус Critically Endangered. Сейчас промышленный лов осетровых запрещен, что, по мнению IUCN, является крайне запоздалым решением.

Ихиологами неоднократно проводилась переоценка реальной величины промыслового возврата от искусственного воспроизводства, и получение достоверной оценки представляет существенную сложность. Подтверждено, что изначально заложенный в планах 1970-х годов коэффициент промыслового возврата заводской молоди в размере 3% оказался завышенным. В 1989 г. определялось для осетра — 1,2%, севрюги — 1%, белуги — 0,1%. В 1998 г. для осетра — 0,7%, севрюги — 0,83%, белуги — 0,07% [4].

Оценка динамики снижения реальной выживаемости на ранних этапах жизненного цикла рыб важна при планировании мер по сохранению генофонда деградировавших популяций. Отдельную задачу представляет анализ причин невыполнения прогно-

зов 1970-х годов в сопоставлении с динамикой экосистемных изменений, на фоне которых был организован рыбоводный процесс и определялась величина допустимого вылова.

Гидростроительство повлекло перемены в трофической цепи ихтиоценоза Нижней Волги, изменив соотношения доминирования автохтонных рыб и способствовав расселению растительноядных видов вселенцев. По естественным причинам менялась гидрологическая обстановка региона. Период регрессии сменился в 1978 г. быстрым и неожиданным для климатологов повышением уровня Каспия. Для бессточного озера площадью более 370 тыс. км² исторически характерны колебания уровня, которые сложно предсказывать. Их амплитуда за период наблюдений составляет 3,8 м. Подъем моря рассматривался экспертами как благоприятный фактор, так как прогнозировалось увеличение площади акваторий Северного Каспия, пригодных для нагула молоди рыб [5], и улучшение трофической обстановки. В прогнозах не брался в расчет ряд значимых факторов. Так, на фоне деградации осетровых уловы их пищевых конкурентов аналогично уменьшались, что не укладывается в выводы из вольтерровской модели, описывающей динамику конкурирующих за один ресурс двух ограниченных популяций [6].

Из исторических сведений о промысле известно, что в XIX в. четыре популяции осетровых были более многочисленны, чем в начале регулярного тралового учета в 1968 г. Особенностью ареала обитания моделируемых популяций является то обстоятельство, что в условиях солоноватоводного мелководья сформировалась автохтонная донная фауна, где барьер солености ограничил распространение пресноводных организмов. В период регрессии эндемичные виды моллюсков вытеснялись вселенцами. Повышение уровня сопровождалось опреснением акватории. Изменения условий оказались на ареале распространения искусственно вселенных в 1960-х годах видов моллюсков

средиземноморского фаунистического комплекса, ставших важным кормовым ресурсом рыб. В Каспии исторически именно кормовая база и соответственно высокая пищевая конкуренция служили ограничителем развития рыбных ресурсов [7]. Исследования 1950-х годов показали, что на единицу биомассы донной фауны Северного Каспия приходилось в несколько раз больше его потребителей, чем в Азовском море.

Очевидно, что эволюционно сложившаяся стратегия размножения осетровых рыб, выразившаяся в существовании нескольких сезонных рас и длинных миграционных путей, позволяла поддерживать высокую биомассу рыб при относительно небольшой кормовой биомассе. Соответственно, актуально создание компьютерной модели жизненного цикла популяций, позволяющей при анализе имитационных сценариев выделять несоответствия заявленных планов рыбного хозяйства и маркроэволюционного тренда анадромных рыб Каспийского моря.

Метод когнитивной структуризации и анализ факторов

Вмешательство в естественный репродуктивный процесс запустило подобно падающим костяшкам домино неизвестный ранее экспертам комплекс обратных связей в механизмах экологической регуляции. Вселение видов различных фаунистических комплексов, нестабильность речного стока, смена периодов регрессии и трансгрессии моря во взаимосвязи с антропогенными факторами привели к непрогнозируемому развитию ситуации. Анализ возможных причин несоответствия планировавшейся эффективности искусственного воспроизводства и прогнозируемой величины промыслового возврата является актуальной задачей для исследований с применением компьютерного моделирования сценариев развития противоречивой ситуации.

Формальное исследование процессов в больших экосистемах относится к области системного анализа слабоформализо-

ванных проблем. Перспективным подходом к получению формального представления взаимосвязи факторов являются методы когнитивной структуризации разнородной информации, например, использованные в [8] для информационного обеспечения при построении проблемно ориентированных биомедицинских баз знаний. Взаимовлияние конечного множества факторов целесообразно исследовать на уровне описания качественных изменений, так как они отражаются в литературе специалистами в сравнительно-оценочных формулировках как, например, «благоприятность условий нагула рыб». Одним из подходов к гибкому трансформированию знаний в структуры данных в слабоформализованных областях служат методы построения и анализа когнитивных орграфов в специализированных информационных средах [9].

Когнитивный орграф будем рассматривать в первую очередь как инструмент для формирования наиболее полноценных гипотез о функционировании популяционного процесса при определенных внешних воздействиях. Применение концептуальной структуризации может изменить сложившиеся стереотипы, которыми оперируют в предметной области, и способствовать развитию модифицированных математических подходов к прогнозированию риска истощения эксплуатируемых биоресурсов.

Когнитивный подход предполагает формализацию гипотезы о функционировании системы в виде знакового орграфа, вершинам которого сопоставляется выделенное множество факторов, а ребрам — знаки «—» и «+». Ребрам можно сопоставить веса, если будет определена универсальная шкала взаимодействий для всей рассматриваемой проблемы.

В настоящее время развиваются модификации методологии применения когнитивных графов, позволяющих на качественном уровне формализовать ситуацию в виде множества концептов и направлений передачи воздействия [10] по различным путям. Формализм взвешенных знаковых графов явля-

ется расширением представления орграфа $G(X, E)$, которое дополняется множеством параметров вершин V , где каждой вершине x , ставится в соответствие параметр-концепт $v_i \in V$, и функционалом преобразования дуг $F(V, E)$, который определяет в соответствие дуге орграфа знак (или вес).

Функционал преобразования определяется следующим образом:

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +u_{ij}, & \text{если при увеличении } v_i \\ & \text{увеличивается } v_j; \\ -u_{ij}, & \text{если при увеличении } v_i \\ & \text{увеличивается } v_j, \end{cases}$$

где u_{ij} может принимать значения из конечного множества B при рассмотрении только знака влияния $B = \{-1, 1\}$.

В популярной монографии Ф. Робертса предлагал рассматривать последовательные изменения значений параметров, соответствующих вершинам, как импульсные процессы в дискретном времени [11].

Импульс в вершине определим как изменение значения ее параметра v_i в момент n :

$$p_i(n) = v_i(n) - v_i(n-1) \text{ при } n > 0.$$

В импульсном процессе значение параметра вершины будет изменяться:

$$v_i(n+1) = v_i(n) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F(v_i, v_j, e_{ij}) p_j(n). \quad (1)$$

Наиболее интересные выводы можно получить, рассматривая импульсные процессы вида (1) в графах с замкнутыми путями.

Когнитивный орграф взаимодействий для Северного Каспия

Проведем структуризацию обобщенных нами из различных и часто противоречивых источников сведений о характере и степени выраженности взаимодействия факторов, влияющих на благополучие волжских популяций осетровых рыб, в виде знакового когнитивного орграфа.

Ретроспективный анализ промысловой статистики и разнообразных экспертных мнений позволил выделить основные факторы, пригодные для когнитивной структуризации. Суждения специалистов часто противоречивы, но компьютерная среда может реализовать набор сравнительных сценариев. Программная реализация взвешенного орграфа строится на основе стандартных средств объектно-ориентированного программирования.

В качестве концептов, определяющих процессы в экосистеме и влияющих на динамику запасов осетровых рыб, выделим следующие 12 природных и антропогенных факторов и поставим в соответствие вершинам нашего когнитивного орграфа $G(X, E, V)$: v_1 — численность нерестового стада осетровых рыб; v_2 — численность пополнения; v_3 — естественная (компенсационная) смертность; v_4 — благоприятность условий нагула осетровых; v_5 — эффективность естественного воспроизводства; v_6 — масштабы искусственного воспроизводства; v_7 — уровень промысловой эксплуатации нерестовой части популяции; v_8 — биомасса доминирующего вида моллюсков; v_9 — плотность кладок икры на нерестилище; v_{10} — изменение уровня Каспийского моря; v_{11} — степень загрязнения Нижней Волги; v_{12} — протяженность доступных путей анадромной миграции.

В результате сопоставления данных наблюдений, анализа литературы об историческом развитии экосистемы и формализации ряда экспертных мнений удалось сформировать когнитивный орграф, включающий соответствующие концептам 12 вершин и множество взвешенных дуг, отражающих знак и степень взаимовлияния. Орграф, где задано $B = \{-1; -0,5; 0,5; 1\}$, представлен в инструментально-вычислительном свободно распространяемом программном средстве «Графоанализатор».

Очевидно, что представленное дугами качественное влияние разнится по своей выраженности, потому разумно охарактеризовать в экологии условно «сильное» и «слабое» взаимодействия. Негативные воздей-

ствия промысла и загрязнения на биоресурсы различны, потому последнее влияние определено как «слабое» при $u = -0,5$. Импульсные процессы для когнитивного орграфа, целесообразно запускать из вершин v_6 и v_7 .

На основе оценки динамики значений v_4, v_2 орграфа сформирована гипотеза, что темп роста молоди влияет на скорость убыли численности поколения, и при этом существует некоторое пороговое значение веса, после которого действие неблагоприятных факторов резко уменьшается. Характер пульсации значения v_3 свидетельствует, что темп роста, в свою очередь, должен зависеть от плотности скопления молоди, и тогда может наблюдаться зависимость выживаемости от плотности с несколькими экстремумами, которая не описывается известными ранее моделями.

Модель Рикера известна как функция $R = aS \exp(-bS)$, связывающая полученное пополнение R с величиной нерестового запаса S . Интереснее эволюция динамической системы $R_{n+1} = aR_n \exp(-bR_n)$, где a — бифуркационный параметр, трактующийся как репродуктивный потенциал нерестовой части популяции. Соответственно параметр $b < 1$ отражает совокупное действие всех лимитирующих факторов среды. Параметры неравноправны, и на устойчивость стационарного состояния $R^* = f(R^*)$ влияет только a :

$$f'(R) = ae^{-bR} - bRa e^{-bR},$$

$$R^* = \frac{\ln a}{b},$$

$$f'(R^*) = ae^{-\frac{b \ln a}{b}} - b \frac{\ln a}{b} ae^{-\frac{b \ln a}{b}} = \frac{a(1-\ln a)}{e^{\ln a}} = 1 - \ln a.$$

Легко определяется момент нарушения критерия устойчивости — по значению производной в стационарной точке: $|f'(R^*)| < 1$. Ранее нами описаны сравнительные свойства динамических систем на основе моделей Рикера и Шепарда [13], в том числе особенности появления хаоса (рис. 1) через бесконечный каскад удвоения периода цикла по описанному в [14] сценарию М. Фейгенбаума. При последующем увеличении $a > 14,2$ происходит появление окон периодичности с устойчивыми циклами нечетных периодов с последующим внутренним кризисом хаотического аттрактора.

Появление сложных динамических режимов и резких нелинейных эффектов в простых дискретных моделях приводит к целому ряду проблем при исследовании моделей биологических сообществ, что опровергает популярное мнение о доступности и наглядности данного подхода к моделированию в экологии.

Представим аналогичную модели Рикера зависимость в форме дифференциального

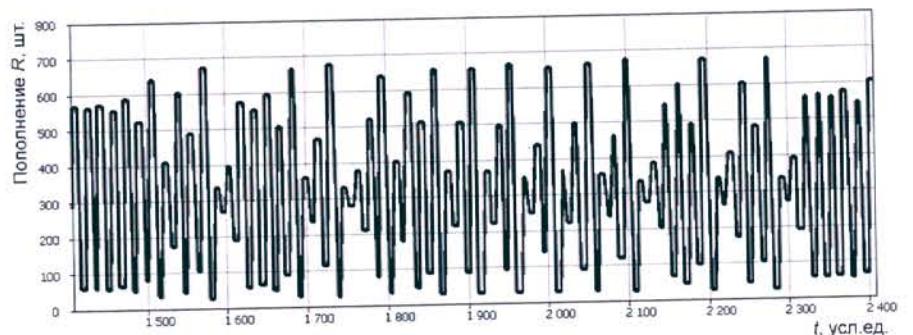


Рис. 1. Хаотическая динамика в модели Рикера

уравнения для убыли численности $N(t)$, решаемого на определенном отрезке $[0, T]$:

$$\frac{dN}{dt} = -(\alpha N(0) + \beta)N(t), \quad t \in [0, T]. \quad (2)$$

Константы в (2) соотносятся с параметрами Рикера: $\alpha = \lambda e^{-\beta T}$, $\beta = \alpha T$, где λ — средняя плодовитость особей популяции, определяющая начальные условия $N(0) = \lambda S$.

Гипотеза в (2) о зависимости смертности от начальной численности $N(0)$ характерна только для ситуации сильного каннибализма. Необходимо дополнить модифицированное (2) уравнением, отражающим среднее размерное развитие в условиях ограниченности доступных кормовых организмов. Учтем характерное обстоятельство, что уязвимость для хищников молоди резко уменьшается по мере роста, так как взрослые осетровые не имеют естественных врагов. Скорость размерного развития представим в уравнении обратно зависящей от дробной степени плотности

$$\frac{dw}{dt} = \frac{g}{\sqrt[N(t)]{N(t) + l}}, \quad 1 < k < 3, \quad (3)$$

где g — объем доступных кормовых ресурсов; l — параметр, учитывающий ограничение скорости развития, не связанное с численностью поколения.

Длительность интервала уязвимости, того периода в жизни поколения, когда смертность зависит от плотности, может вычис-

ляться в модели в зависимости от интенсивности роста поколения, что экологически обосновано. Положим, что при достижении некоторого \hat{w} смертность обусловлена промысловыми причинами. Сформируем систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику убыли численности поколения до вступления в нерестовую часть популяции $S = N(T)$, $T = v(w)$,

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\alpha w(t)N(t) + \bar{f}(N(0))\beta)N(t) \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{\sqrt[N(t)]{N(t) + l}}, \quad 1 < k < 3, \quad w < \hat{w}, \end{cases} \quad (4)$$

где α — мгновенный коэффициент компенсационной смертности; β — коэффициент не зависящий от плотности декомпенсационной смертности; начальные условия задаются: $w(0) = w_0$, $N(0) = \lambda S$. Функция \bar{f} должна обладать свойством $\bar{f}(S) > 1, S < L$ и $\bar{f}(S) \rightarrow 1, S \gg L$, отражающим факт резкого уменьшения эффективности воспроизводства при малой численности нерестового стада, меньшей некоторой критической L .

Реализация гибридного автомата в репродуктивной модели

Модель формирования пополнения (4) рассматривается как непрерывно-дискретная динамическая система и алгоритмически реализуется в вычислительной среде AnyLogic в форме гибридного автомата [15] с предикативным переходом. В отличие

от дискретных карт состояний событийных моделей гибридный автомат (рис. 2) можно назвать картой изменения не состояний, а поведений системы, которая включает множества предикатов Pred и множества начальных условий Init, переходы между которыми изображаются стрелками.

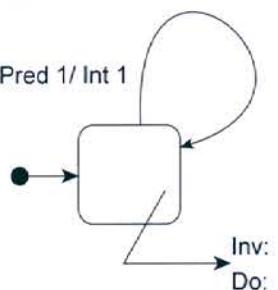


Рис. 2. Простой гибридный автомат с входом и одним переключением

В примененном подходе переключение автомата с непрерывно-дискретным (гибридным) временем в форме (5) происходит между режимами изменения состояния системы. Каждому переходу необходимо сопоставлять определенный набор предикатов, а каждому режиму поведения — условия завершения активности. За подтверждением истинности предиката *Pred1* следует инициализация вычислительной задачи, для чего формируются переопределяемые начальные условия *Init1* дифференциальных уравнений. Функция контроля предикатов определяет в вычислительной среде выбор решаемой в данный момент задачи Коши с инициализацией новых начальных условий или останавливает вычисления при достижении граничных значений. В анализе свойств событийно-управляемых или непрерывно-дискретных динамических систем для алгоритмической реализации модели мы решили применить гибридное время в виде мульти множества, которое вводит компоненту событийности при управлении изменением непрерывного процесса:

$$\vartheta = \bigcup_n \{R_{-\tau_n}, [t_{n-1}, t_n], L_{-\tau_n}\}, \quad (5)$$

где $R_{-\tau_n}$, $L_{-\tau_n}$ — выделяемые события с мгновенной длительностью, ограничивающие

справа и слева интервалы непрерывного времени.

В некоторый выделяемый момент гибридного времени происходит переопределение начальных условий для расчета задачи Коши на следующем в последовательности кадре непрерывного времени. Поведение гибридной системы «склеивается» из непрерывного изменения состояния и дискретных событий, переопределяющих развитие процесса.

Свойства новой гибридной модели репродуктивного процесса

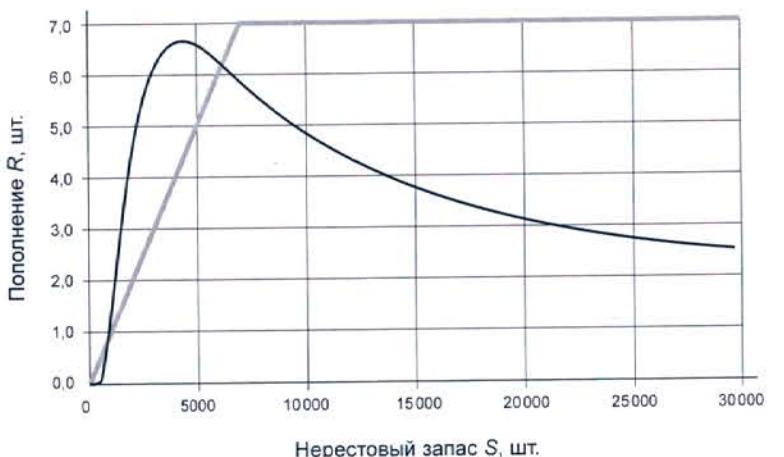
Множество решений задач Коши для допустимых $S \in \mathbb{Z}^+$ определит интересующую нас зависимость $f(S)$, называемую кривой воспроизведения популяции. График (4), полученный в вычислительной среде (рис. 3), задает унимодальную кривую с ненулевой горизонтальной асимптотой и двумя нетрииальными пересечениями R_1^*, R_2^* с биссектрисой координатного угла $R = S$, геометрическим местом стационарных точек.

Полученная зависимость с пологой восходящей ветвью и ниспадающей правой с уменьшающимся наклоном позволила преодолеть два важных недостатка, отмеченных специалистами, применявшими функцию Рикера для практических задач прогнозирования допустимого промыслового режима.

Основной недостаток функции $f(x) = axe^{-bx}$ — наибольшее значение производной достигается при стремлении аргумента к нулю, но вряд ли наибольший прирост воспроизводства может достигаться при таких условиях:

$$f'(x) = ae^{-bx}(1-bx), \quad \lim_{x \rightarrow 0} ae^{-bx}(1-bx) = a.$$

Неудобное свойство $\lim_{x \rightarrow \infty} axe^{-bx} = 0$ не соответствует экспериментальным данным и при моделировании устраняется обычно простым переопределением в вычислительном алгоритме $f(x)$ в кусочно-заданную функцию с интервалом постоянного значения $f(x) = K$, $x > x_1$.

Рис. 3. Кривая $\phi(S)$ воспроизводства по решению системы (4)

Качественное отличие разработанной непрерывно-дискретной динамической системы от ранее предлагавшихся дискретных моделей заключается в наличии двух областей притяжения атTRACTоров в фазовом пространстве Θ_1, Θ_2 . Границей между областями служит неустойчивая стационарная точка первого пересечения с биссектрисой R_1^* , когда точка R_2^* устойчива до момента бифуркации удвоения. АтTRACTором для области Θ_1 служит начало координат, т. е. тривиальное равновесие. Следовательно, R_1^* есть критически допустимая численность для продолжительного существования популяции. Переход траектории модели в область Θ_2 интерпретируется как запуск процесса необратимой деградации популяции.

Заключение

Успешная математическая формализация экологических процессов, как правило, оказывается неинвариантной для разных экосистем. Моделирование некоторой ситуации целесообразно начинать с этапа системного анализа процессов, не полагаясь на уже готовый аппарат, успешно применявшийся когда-то, но в иных условиях. Концептуальная структуризация на основе обобщения данных наблюдений поможет сформировать гипотезы для модификации известных методов, как было сделано для модели

воспроизводства. Отметим, что разрабатываемая нами гибридная динамическая система для других эколого-физиологических условий нереста рыб может оказаться неадекватной. Пососевые и осетровые имеют сходный цикл размножения, но вряд ли стоит ожидать появления куполообразных зависимостей на графике по данным о северных популяциях, нерестящихся в толще морской воды.

Системный анализ и последующие исследования вычислительными методами модели на основе системы дифференциальных уравнений (4) показывают, что для популяций анадромных рыб с длинным жизненным циклом неприменима популярная стратегия оптимального промысла, нацеленная на получение максимально допустимого стабильного вылова. Рискованный промысел может привести к началу процесса необратимой деградации популяций. Возместить потери в естественном воспроизводстве на фоне промыслового давления, добиваясь только массового выпуска заводской молоди в русла рек, нереалистично. Искусственное воспроизводство требует новых исследований жизненного цикла молоди, так как сейчас базируется на результатах, полученных при других экологических условиях.

Целесообразно отметить отдельные недостатки формализма когнитивных графов применительно к задаче системного анали-

за экологических проблем и динамики промысловых запасов. Факторы влияют друг на друга с различной скоростью. Экологическим процессам свойственно явление запаздывания во времени. Например, обеспеченность особей необходимыми ресурсами зависит не от текущей численности, а от плотности поколения на предыдущей стадии развития, и в таком случае в правой части уравнения необходимо использовать функционал с отклоняющимся аргументом: $\Psi[N(t-\tau)]$. Вероятным усовершенствованием представляется допустимость для модели подсистемы выделения подграфа $G_i(X_i, E_i, V_i)$ с функционалом преобразования дуг другой формы. Вполне допустимо в алгоритме обработки орграфа предусмотреть предиктивное изменение знака дуги между концептами, так как «положительность» влияния тоже может быть относительной.

Отдельной проблемой является интерпретация результатов компьютерного исследования нелинейных динамических моделей, например унимодальных отображений. При изменении бифуркационного параметра происходят такие качественные изменения поведения траектории «нелинейные эффекты», как переход к хаотическому движению и обратно к устойчивому циклическому. Каждый параметр в биологической модели несет определенное толкование, что отражается на формировании практических выводов. Можно разбить диапазон допустимых значений параметра на конечное множество ограниченных интервалов выделенного качественного поведения, но объединение диапазонов значений параметра, соответствующих хаотической динамике, представляет собой фрактальное множество.

Список литературы

- Перцев Н. В., Царегородцева Г. Е. Моделирование динамики популяции в условиях воздействия вредных веществ на процесс репродукции особей // Автоматика и телемеханика. 2011. № 1. С. 141–153.
- Perevaryukha A. Yu. Cyclic and Unstable Chaotic Dynamics in Models of Two Populations of Sturgeon Fish // Numerical Analysis and Applications. 2012. Vol. 5. № 3. P. 254–264.
- Ходоревская Р. П., Рубан Г. И., Павлов Д. С. Поведение, миграции, распределение и запасы осетровых рыб Волго-Каспийского бассейна. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. — 242 с.
- Научные основы устойчивого рыболовства и регионального распределения промысловых объектов Каспийского моря. М.: Издательство ВНИРО, 1998. — 167 с.
- Ходоревская Р. П., Калмыков В. А., Жилкин А. А. Современное состояние запасов осетровых Каспийского бассейна и меры по их сохранению // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2012. № 1. С. 99–106.
- Ризниченко Г. Ю. Математические модели в биофизике и экологии. Ижевск, 2003. — 183 с.
- Карпинский М. Г. Экология бентоса Среднего и Южного Каспия. М.: Издательство ВНИРО, 2002. — 283 с.
- Столбов Л. А., Дубавов Д. С., Лисица А. В., Филоретова О. А. Когнитивное моделирование в системах информационного обеспечения задач современной биотехнологии и биомедицины // Прикладная информатика. 2013. № 3. С. 69.
- Авдеева З. К., Коврига С. В., Макаренко Д. И., Максимов В. И. Когнитивный подход в управлении // Проблемы управления. 2007. № 3. С. 2–8.
- Кульба В. В., Миронов П. Б., Назаретов В. М. Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых графов // Автоматика и телемеханика. 1993. № 7. С. 130–137.
- Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. — 496 с.
- Ricker W. E. Stock and Recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1954. Vol. 11. № 5. P. 559–623.
- Переварюха А. Ю. Динамическая модель критического состояния популяции // Екологічна безпека. 2014. № 1. С. 40–45.

14. Feigenbaum M. J. Universal behavior in nonlinear systems // *Physica D*. 1983. Vol. 7. № 1–3. P. 16–39.
15. Kolesov Yu. B., Senichenkov Yu. B. Modeling hybrid systems in MvStudium // *Simulation Europe News*. 2010. V. 20. № 1. P. 31–34.

References

1. Percev N. V., Caregorodceva G. E. Modelirovanie dinamiki popul'iacii v usloviyakh vozdejstviya vrednyx veshhestv na process reprodukcii osobej // *Avtomatyka i telemekhanika*, 2011, no. 1, pp. 141–153.
2. Xodorevskaya R. P., Ruban G. I., Pavlov D. S. Povedenie, migraci, raspredelenie i zapasy' osetrov'ykh ryb Volgo-Kaspiskogo bassejna. M.: Tov-vo nauch. izd. KMK, 2007. — 242 p.
3. Nauchny'e osnovy' ustojchivogo rybolovstva i regional'nogo raspredeleniya promyslov'ykh ob'ektov Kaspiskogo morya. M.: Izd-vo VNIRO, 1998. — 167 p.
4. Xodorevskaya R. P., Kalmykov V. A., Zhilkin A. A. Sovremennoe sostoyanie zapasov osetrov'ykh kaspiskogo bassejna i mery' po ix soxraneniyu // *Vestnik AGTU. Seriya: Rybnoe khozyajstvo*, 2012, no. 1, pp. 99–106.
5. Riznichenko G. Yu. Matematicheskie modeli v biofizike i e'kologii. — Izhevsk, 2003. — 183 p.
6. Karpinskij M. G. E'kologiya bentosa Srednego i Yuzhnogo Kaspija. M.: Izd. VNIRO, 2002. — 283 p.
7. Stolbov L. A., Dubavov D. S., Lisica A. V., Filoretova O. A. Kognitivnoe modelirovanie v sistemakh informacionnogo obespecheniya zadach sovremennoj biotekhnologii i biomediciny // *Prikladnaya informatika*, 2013, no. 3, p. 69.
8. Avdeeva Z. K., Kovriga S. V., Makarenko D. I., Maksimov V. I. Kognitivnyj podkhod v upravlenii // *Problemy' upravleniya*, 2007, no. 3, pp. 2–8.
9. Kul'ba V. V., Mironov P. B., Nazaretov V. M. Analiz ustojchivosti social'no-e'konomicheskikh sistem s ispol'zovaniem znakov'ykh grafov // *Avtomatyka i telemekhanika*, 1993, no. 7, pp. 130–137.
10. Roberts F. S. Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k social'ny'm, biologicheskim i e'kologicheskim zadacham. M.: Nauka, 1986. — 496 p.
11. Perevaryukha A. Yu. Dinamicheskaya model' kriticheskogo sostoyaniya popul'iacii // *Ekologichna bezpeka*, 2014, no. 1, pp. 40–45.

A. Perevaryukha, PhD in Technique, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, madelf@pisem.net

Cognitive simulation in the analysis of structural interactions of environmental processes in Caspian sea

Ecological processes in the face of rapid changes in the environment as an object for the computer simulation requires a flexible approach to the analysis. Article devoted to applications of the conceptual structuring of ideas about the interaction natural and anthropogenic factors on the basis of cognitive models. The formal analysis of pulses in the sign graph in the context of the situation degradation bioresources of Caspian Sea has promoted the development of original hybrid dynamic systems for modeling sturgeon fish reproduction. It is shown that the choice of the mathematical approach to the description of the situation can be based on the results of cognitive analysis of the ecological relationships. At the conclusion of results of computational studies should logically follow the newly theoretical interpretation of the observed changes in behavior of models. Chosen structure of the new models allows us to consider various scenarios of environmental emergencies. In cognitive oriented graph possible to make hypotheses, but to assess the abrupt changes necessary to investigate the nonlinear dynamics of the trajectory of some key characteristics, which for the Caspian Sea is the effectiveness of fish spawning. In such models often arise bifurcations of attractors with the appearance of cycles that effect on environmental implications.

Keywords: computer modeling of population processes, methods of cognitive structurization, hybrid dynamic systems.

T. K. Кравченко, докт. экон. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, tkrawchenko@hse.ru

Системы поддержки принятия решений при оценке эффективности инвестиционных проектов в телекоммуникационной сфере

В статье приводятся результаты научных исследований в области управления рисками при выборе инвестиционных проектов в телекоммуникационной сфере с применением систем поддержки принятия решений (СППР). В этих целях рассматриваются СППР Expert Choice 11.5 и Экспертная система поддержки принятия решений, с использованием которых определен наиболее эффективный и наименее рискованный проект.

Ключевые слова: контент-услуги, системы поддержки принятия решений.

Введение

В настоящее время в телекоммуникационной сфере существует множество способов проведения рекламных кампаний. В статье рассматривается один из их видов — ICB-вещание (*Interactive Cell Broadcast*, или «реклама на спящих экранах»).

Технология сотовой связи, позволяющая рассыпать сообщения абонентам сети сотовой связи по принципу point-to-multipoint, используется для создания медиаканалов, которые дают возможность операторам проводить интерактивные информационные, маркетинговые, рекламные и развлекательные мероприятия.

Средства для инвестирования таких мероприятий ограничены, так как подобные проекты еще не разработаны, и на начальном этапе нет понимания, какими они должны быть. Эта неопределенность обусловлена тем, что контент-услуги в телекоммуникационной среде (в частности, ICB-вещание) — довольно молодая сфера обслуживания, и в ней еще не приняты утвержденные стандарты.

На практике сравнительный анализ инвестиционных проектов (ИП) проводится

в большинстве случаев на основе критериев, которые можно разделить на две группы в зависимости от того, учитывается или нет временной параметр [1–7].

Прежде всего это методы, основанные на дисконтированных оценках («динамические» методы): чистая приведенная стоимость — NPV (*Net Present Value*); индекс рентабельности инвестиций — PI (*Profitability Index*); внутренняя норма прибыли — IRR (*Internal Rate of Return*); модифицированная внутренняя норма прибыли — MIRR (*Modified Internal Rate of Return*); дисконтированный срок окупаемости инвестиций — DPP (*Discounted Payback Period*).

Нередко используются и методы, основанные на учетных оценках («статистические» методы): срок окупаемости инвестиций — PP (*Payback Period*); коэффициент эффективности инвестиций — ARR (*Accounted Rate of Return*).

Как показали результаты многочисленных исследований, при оценке эффективности инвестиционных проектов наиболее часто применяются критерии NPV и IRR. Однако возможны ситуации, когда эти критерии противоречат друг другу, например при оценке альтернативных проектов.