

КОНФЛИКТНО-УПРАВЛЯЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ И МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 517.9, 519.6, 004.94, 574.5

А.Ю. Переварюха

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОПУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РЫБ И НАСЕКОМЫХ*

Ключевые слова: моделирование динамики популяций, логико-событийные и гибридные модели, состояние осетровых Каспия, анчоус Перу, коллапс трески Канады, вспышки численности насекомых, бифуркации, темпы роста, сценарии биологических инвазий.

Введение

В этой серии работ продолжаем разрабатывать гибридные популяционные модели в целях расширения методологического арсенала математической биологии. Модели с дискретной и непрерывной составляющей в рамках проектов строились [1, 2] для конкретных ситуаций экологического противоборства. Теоретические модели регуляции применяются и интерпретируются на практике хозяйственного использования биоресурсов. Например, моделирование сценария способно показать внутреннюю механику, как в результате незначительного, на первый взгляд, перелова «over-fishing» происходит стремительная и неожиданная для ихтиологов деградация ранее многочисленных и ценных запасов. Сценарий объяснил главную проблему коллапса трески 1992 г., почему вопреки ожиданиям запасы не восстанавливаются быстро при моратории, как популяции сига озера Онтарио или анчоуса Перу.

В фокусе текущих исследований — сравнительное моделирование общности свойств специфического развития особого характера экологических процессов, включая переход к вспышкам численности. Экологи отмечают [3], как различные биологические объекты демонстрируют идентичную качественную динамику. Теперь интересно сравнить и обобщить математические формы проявления саморегуляции в динамике процессов для таких разных изучаемых биологических объектов, как морские рыбы и насекомые, поражающие лесные массивы Австралии и Канады.

Быстрые перемены видовой разнообразия часто индуцированы антропогенным вмешательством. Вселение нового вида — очевидный, но не всегда обдуманый способ улучшить продуктивность экосистемы, — запускает эффект домино по трофической цепи. Нетривиальное межвидовое взаимодействие, или активный каннибализм у трески влечет особые переходные режимы при неверно рассчитанном антропогенном воздействии.

Со случайными изменениями видовой состава связаны явления вспышек численности, массовых размножений чужеродных видов, что является особой задачей математической биологии. В статье сопоставим важные механизмы развития критических ситуаций и модели пороговых эффектов. Покажем, что различные актуальные сценарии имеют общность с точки зрения нелинейной динамики

* Работа выполнена в рамках проекта РФФИ: № 17-07-00125.

© А.Ю. ПЕРЕВАРЮХА, 2019

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2019, № 1*

и могут быть получены модификацией систем дифференциальных уравнений методом триггерных функционалов. Приведем критерии адекватности для нелинейных моделей с реализацией бифуркаций.

Общность моделей стадийного онтогенеза

Методику анализа нелинейных процессов строим на основе математического описания выживаемости поколений популяций в раннем онтогенезе и продолжаем обобщать и совершенствовать подход. Применительно к меняющимся условиям и факторам в эколого-физиологическом развитии видов вычислительные модели логично формировать в виде логико-событийных структур и рассматривать как сценарии.

Модель популяционного процесса формируется на основе динамически переопределяемой (гибридной) системы, когда ключевой биологический аспект позволяет рассматривать роль изменений в жизненном цикле. Гибридное время формализуется в виде мультимножества кортежей, которое вводит компоненту событийности при управлении изменением непрерывного процесса:

$$\bigcup_n \{R_gap_n, [t_n, t_{n+1}], L_gap_n\}.$$

Форма времени с непрерывной и дискретной компонентами строится из набора упорядоченных кадров нефиксированной длины с временными щелями справа и слева: R_gap_n, L_gap_n . Метод позволяет по предикатам устанавливать моменты — события, с которыми связаны изменения самой системы или управляющего воздействия.

Способ организации непрерывно-событийных вычислительных структур изначально развивался применительно к проблеме низкой эффективности искусственного воспроизводства осетровых рыб Каспия. Использована предикативно-переопределяемая вычислительная структура с тремя последовательными режимами изменения состояния — система записывается дифференциальным уравнением набором возможных форм правой части и множеством предикатов смены режима расчетов. Модель с обобщенными тремя стадиями развития онтогенеза рыб на интервале $t \in [0, T]$ (без триггерных функционалов), но с включением запозывания $\eta < \tau$ на третьей стадии развития описывается следующим образом:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -\alpha_1 N^2(t) - \beta N(t), & t < \tau, \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & w(t) < \bar{w}, \\ -\alpha_3 w(t) N(t) N(t - \eta), & t < T, \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ и β — различно экологически трактуемые коэффициенты ювенальной смертности, \bar{w} — пороговый уровень развития. Формой реализации модели в вычислительной среде служит гибридный автомат на основе графа с ориентированными дугами — путями трансформации правой части. Перестроения правой части происходят либо по отсчетам времени (назовем такие переходы таймированными (time-forced)), либо предикативными переходами (predicative-forced transition, действуют по вычислению внутренних модельных переменных). Модификации возникают между режимами изменения состояния, но не между состояниями, как в дискретно-событийных моделях. Модель (1) применена для расчета воспроизводства волжской севрюги, так как кривая воспроизводства $R = f(S)$ популяции, эмпирическая зависимость пополнения R от нерестового запаса S , полученная методом скользящей средней по данным из [4], показала наличие двух неравнозначных максимумов для численности молоди в реке.

Решается (1) численно во взаимосвязи со вспомогательным показателем размерного развития $w(t)$ особей поколения, описываемого уравнением с обратной дробно-степенной зависимостью от текущей численности:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\mu}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}}, \quad (2)$$

где μ — фиксированно отражает доступность кормовой базы, δ — поправка. Модель предназначалась для оценки эффективности выращивания молоди осетровых рыб в искусственных условиях. Однако динамику кормовой базы $\mu(t)$ можно задать в виде $d\mu/dt = f(\mu(t - \eta)) - \nu N(t)$ подходящим видом правой части $f(\mu(t - \eta))$ — уравнением популяционной динамики Ферхюльста, Гомпертца или «Hutchinson's Equation».

Биологическое обоснование применения численного решения в виде оператора эволюции для итераций строится на теории формирования пополнения запасов [5]. Метод расширения базовой модели сделал идею связного описания роста и выживаемости значимой для многих видов с большой плодовитостью λ , например насекомых с неполным циклом превращений. Численность многих вредных насекомых-фитофагов регулируют паразиты. Наездники атакуют обычно одну из стадий развития, чаще всего яйца [6], и реакция паразитов обусловлена наличием скопления доступных жертв, а именно $N(0)$, что обусловит данную модификацию:

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha_1 w(t) N(0) - \beta N(t), \quad t < \tau.$$

Для таких видов актуально численно рассчитывать именно колебания ювенальной выживаемости $N(0) \rightarrow N(T) \equiv \varphi(N(0))$ как зависимость от начальной (яиц, икры) $N(0) = \lambda S$, так как реакция врагов обусловлена скуденностью самых доступных жертв.

Универсальный метод совершенствования гибридной модели

Эффективность нереста севрюги *Acipenser stellatus* по показателю численности молоди, скатившейся из реки в Каспийское море, резко снижается, если численность нерестового запаса рыб меньше пороговой. При малой численности многократно возрастает роль неблагоприятных факторов среды в воспроизводстве популяций. Непропорциональное сокращение восполнения запасов невозможно предвидеть корреляционными методами. Основная новизна нашего подхода — внедрение в гибридную, предикативно-переопределяемую динамическую систему триггерных функционалов с ограниченной областью воздействия. В уравнении убыли численности поколения два коэффициента смертности — прямо зависящего от плотности популяции $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ и независимого β . Здесь α_i учитывает более быстрое исчерпание необходимых для развития ресурсов по мере увеличения числа личинок. Для мигрирующих рыб оказалось важно, что при низкой плотности зашедших на нерест в реку производителей имеет смысл учитывать потери воспроизводства на стадии $t = 0$. Эффект реализован триггерным функционалом $\Psi(S) = 1 + \exp(-\sigma S^2)$ с ограниченным диапазоном принимаемых функционалом значений $\lim_{S \rightarrow \infty} \Psi(S) = 1, \Psi(0) = 2$ для включения в уравнение убыли поколения:

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha_1 w(t) N^2(t) - \beta N(t) \Psi(S), \quad t < \tau, \quad (3)$$

где параметр $\sigma < 1$ отражает степень выраженности эффекта из-за снижения вероятности образования нерестовых пар. Численное решение используем как оператор эволюции функциональных итераций. Так получим разделение фазового портрета траектории $R_{n+1} = \varphi(R_n) - qR_n$, где $q \in [0, 1)$ — доля промыслового изъятия, для неунимодальной функции на две области притяжения. Таким образом, не выполняются условия теоремы Синжера [7] для реализации сценария перехода к хаосу через каскад удвоения периода цикла согласно теории Фейгенбаума [8]. Модель обладает возможностью образования хаотического репеллера при изменении положения экстремумов зависимости $\varphi(\lambda S)$, но это иной тип переходного хаотического движения, отличающийся от имеющегося во фрактальном хаотическом аттракторе.

В сценарии коллапс промысловых запасов развивается из двух фаз. После увеличения промыслового изъятия стабильная популяция попадает в аперiodический режим флуктуаций при меньшей численности, но с иллюзией восстановления. Далее, если не введен своевременный мораторий, через 10–12 модельных сезонов наступает вторая фаза деградации, как в вычислительном эксперименте на рис. 1, обобщающем ситуации краха промысла крупных долгоживущих рыб — коллапса трески у Лабрадора 1992 г. и растянутого истощения 1991–2000 гг. у осетровых рыб Каспия. Коллапс трески спровоцирован представлениями о благополучном состоянии биоресурсов и алчностью промысла. Перед критическим порогом эффективность воспроизводства популяции согласно нашей модели достаточно высока. Мораторий на вылов трески ввели с ожиданием вступления в репродуктивный возраст виртуальных «резервных» поколений — теоретически 4–5 поколений не должны быть охвачены промыслом. Методы оценки запасов осетровых существенно завышали их реальную численность, и официальный вылов остановлен слишком поздно. У осетровых фаза псевдостабильзации запаса растянулась на 15 лет, с 1977 по 1992 гг., но фаза резкого падения вылова аналогична треске.

Падение запасов короткоцикловых рыб тоже проходит в два этапа: первичное резкое падение 1973 г., затем иллюзия восстановления и крах промысла 1982 г. На рис. 2 показана динамика вылова анчоуса у берегов Перу [9], прошедшего коллапс в 1982–84 гг. [10]. Восстановление анчоуса более эффективно, чем многовозрастного запаса трески Канады; это типично для мелких многочисленных быстро созревающих видов.

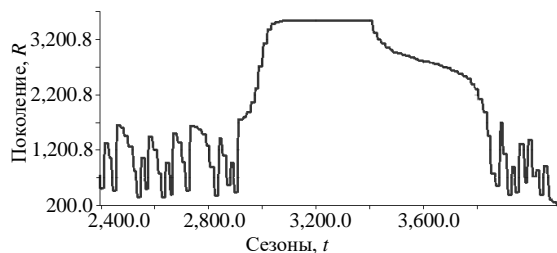


Рис. 1

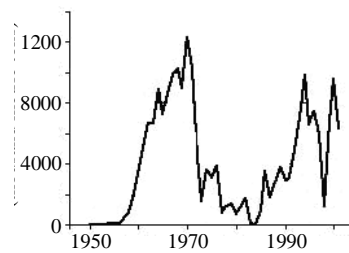


Рис. 2

Общность фаз динамики столь разных запасов при экстремальном промысловом давлении выглядит настоящим откровением. Ведь нерестовый запас крупной хищной рыбы трески состоит из ряда поколений. Теоретически быстрому коллапсу

подвержен анчоус. Сценарий восстановления популяции по типу анчоуса требует введения вероятности в модель в явном виде. Восстановление субпопуляции трески Атлантики «Canada's Northern cod» происходит постепенно за счет притока особей из южных регионов [11].

Для математической реализации подобного сценария коллапса предлагаем два нелинейных эффекта в динамике итераций — обратную касательную бифуркацию с редукцией притягивающего состояния равновесия и граничный кризис интервального аттрактора, который образуется после редукции устойчивой точки. Для такого перестроения фазового портрета необходимы, как минимум, три другие неустойчивые стационарные точки и возможности изменения положения экстремумов $\varphi(\lambda S)$.

На практике это означает, что когда популяция переходит в состояния спорадических колебаний, у наблюдателя нет никаких механизмов расчета и предсказания оптимальной величины изъятия, основанных, как известно, на статистической обработке.

Вариативность изменений фазового портрета динамической системы оказалась большей, чем у любых аналогов, и не только из-за настройки параметров модели, но и из-за возможности учета запаздывания при регуляции смертности на одной из стадий развития $N(t - \eta)$. Фактически непрерывно действующее запаздывание тут влияет на поведение дискретной траектории. Воздействие реализуется посредством сдвига положения минимума зависимости относительно неустойчивой стационарной точки $R_1^* = \varphi(R_1^*)$ итерации.

Модификация для завершения вспышки численности

Вспышки численности вредителей — глобальная проблема математической биологии. Различаются вспышки по фазам запуска, перехода к так называемой эруптивной динамике пика развития и стадии завершения. Вспышки насекомых — ярко выраженный переходный режим. В данном случае не имеет смысла обсуждать асимптотику поведения и притягивающие множества, а существующая теория в строгих результатах развита именно для асимптотического состояния. Один из наиболее распространенных сценариев перехода к вспышке численности — пороговый. Данный порог математически можно представить как неустойчивое равновесие у итераций. Порог должен преодолеваться спонтанно, без внешнего воздействия, но это должно быть редкое явление. Хаотический репеллер из-за локально-несвязной границы областей притяжения альтернативных аттракторов замечательно решает данную математическую проблему моделирования.

Спонтанное преодоление запускает вспышку с выходом к устойчивому равновесию большой численности, но это решение только части проблемы моделирования вспышки. Такие явления скоро завершаются. Экосистема не выдержит подобное состояние долго. Популяция будет уничтожать необходимые ей ресурсы. Для оленей острова Беринга вспышка закончилась фатально, без охоты олени вытоптали хрупкие пастбища, и популяция погибла. Необходимо описать спонтанное завершение вспышки, для чего иным образом модифицируем модель (1) универсальным методом функционалов:

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha_2 N(t) \Xi(N(\tau)) / w(\tau) - \beta N(t), w(t) < \bar{w}, \quad (4)$$

$$\Xi(N(\tau)) = 1 + \frac{e^{c_1 N(\tau)}}{l + c_2 e^{c_1 N(\tau)}}, \quad (5)$$

где параметр $c_2 > 1$ в (5) характеризует стремительность исчерпания ресурсов и правый предел значения функционала: $\lim_{N(\tau) \rightarrow 0} \Xi(N(\tau)) = 1 = 1/c_2$. Коэффициент 1 варьирует уровень численности, при котором эффект начнет заметно проявляться при имплементации триггерного функционала Ξ для второй стадии развития. Для насекомых-вредителей вторая стадия наиболее требует обилия пищевых ресурсов.

Методом можем описать спонтанный непрогнозируемый переход от переходной хаотической динамики к устойчивому равновесию, что составит фазу развития вспышки (рис. 3). Равновесие при большой численности долгое время может казаться устойчивым, однако в модельном сценарии оно будет исчезать из-за действия $\Xi(N(\tau))$.

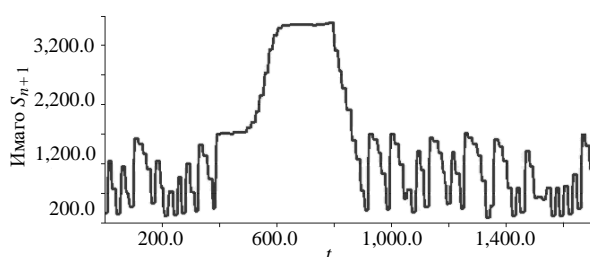


Рис. 3

В сценарии на рис. 3 вспышка — редкое единичное событие. Получена вычислительная структура, которую правильно назвать динамическая система с переопределяемым оператором эволюции. Данный вариант — не единственно возможный сценарий завершения экстремального популяционного процесса. Повторная вспышка — реальный экологический вариант, заменим $w(\tau)$ в уравнении для второй стадии развития насекомых, сделаем вспышку частым нерегулярным явлением:

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha_2 N(t) \Xi(N(\tau)) / w(t) - \beta N(t), \quad w(t) < \bar{w}.$$

Модификация будет быстрее возвращать стационарное состояние при высокой численности, и так опишем скорую повторную вспышку после переходных хаотических колебаний непредсказуемой длительности при кратких пиковых максимумах численности. Для динамики модели наблюдается характерная для хаотических режимов чувствительная зависимость от начальных условий, выражающаяся в спонтанном преодолении порога запуска вспышки.

Подобным образом, как в сценарии на рис. 4, проявляют себя псиллиды, мелкие насекомые семейства Psyllidae с тремя стадиями развития (неполный цикл превращений) в эвкалиптовых лесах Австралии [12]. Численность псиллид контролируется осами-паразитами, которые сами являются объектом атаки других паразитов. У иных насекомых характер вспышки может существенно отличаться.

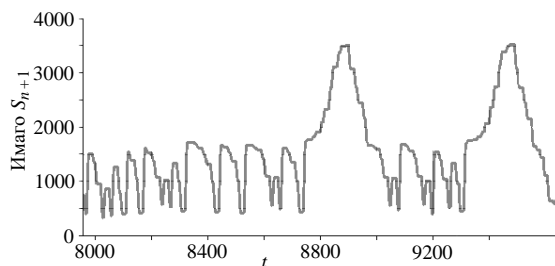


Рис. 4

Взаимодействующие предикативные структуры

При анализе проблемы воспроизводства осетровых Каспия сталкиваемся с тем, что кривые зависимости трех эволюционно близких видов осетровых рыб имеют качественно различную форму. Для осетра *Acipenser gueldenstaedtii* виден выраженный куполообразный единственный максимум. Эмпирическая кривая воспроизводства белуги *Huso huso* не демонстрирует признаков экстремума. Для севрюги *Acipenser stellatus* присутствует явный промежуточный минимум эффективности воспроизводства (рис. 5).

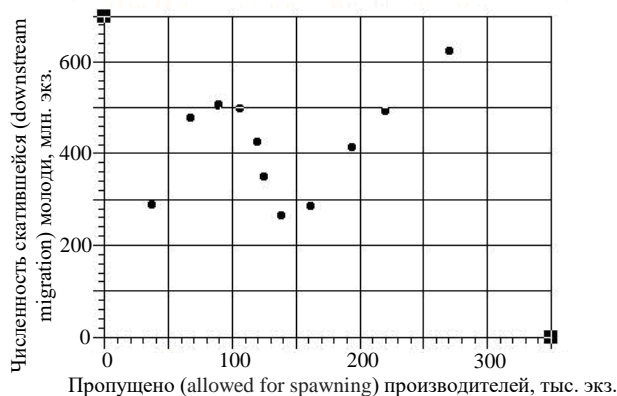


Рис. 5

Разнообразие исходных данных наблюдений для моделирования процесса восстановления осетровых рыб Каспия требовало внесения ряда модификаций в базовую (1) гибридную модель. Восстановление популяций планировалось путем искусственного выпуска молоди рыб, но такой способ восполнения запасов оказался менее эффективным, чем ожидали [13].

Очевидный вариант модификации — усовершенствование и детализация в уравнении динамики размерного развития (2). Темпы роста опосредованно влияют на темпы убыли поколений, по-разному воздействуя на выживаемость каждой стадии развития. Только на второй стадии активно влияет конкуренция поколения за ресурсы. Формализуем темпы размерного развития аналогичной по методу записи динамики убыли $N(t)$ предикативно-переопределяемой гибридной структурой для $w(t)$, которая станет набором парных правых частей для (1), с последовательным решением задач Коши для $\forall N(0), w(0) \in \mathbf{Z}^+$:

$$\frac{dw}{dt} = \begin{cases} \rho, & t < \tau, \\ \zeta \frac{w(t)}{\sqrt{N(t-\eta) + v}}, & t > \tau, w(t) < \bar{w}, \\ \theta \sqrt[3]{w^2(t)} - \vartheta w(t), & t < T. \end{cases} \quad (6)$$

Скорость прироста на ранних этапах онтогенеза не может быть постоянной. Более того, не может полностью описываться балансовым уравнением анаболизма и катаболизма из-за периода эндогенного и смешанного питания личинок рыб. В модели (6) сначала скорость прироста постоянна и определена константой ρ , потом зависит от плотности конкурирующего за ресурсы поколения с учетом запаздывания η . В третьем варианте правой части это — уравнение роста Лео фон Бергаланфи [14] с показателями метаболизма θ, ϑ . Предикаты в (6) тождественны (1), хотя это ограничение не обязательно. Так упрощаем настройку комплексной модели в вычислительной среде. Тонкая настройка модели с двумя гибридными структурами приведет к интересному эффекту в динамике итераций — сосуществованию альтернативных притягивающих циклов периода $p = 2$. Малый цикл существует в очень кратком параметрическом диапазоне. Период большего цикла удваивается, но не бесконечно, потом период цикла сокращается $p = 2^{i-1}$. Наличие альтернативных циклов трактуем как математическое описание проявления популяционной дифференциации, когда промысел влияет на преобладание одной из генетических форм и ведет к формированию репродуктивно изолированных групп.

Для поведения таких систем с альтернативными аттракторами, с двумя каскадами бифуркаций смены периода циклов $p = 2^{i-1}$, $p = 2^{i+1}$ строгой математической теории пока не существует, как для сценария образования канторовского аттрактора при бесконечном удвоении периода цикла $i \rightarrow \infty$ при бифуркациях и переходе к хаотическому движению траектории, которое наблюдается в системе с глобальным притягивающим множеством.

Обобщенные возможности поведения гибридных систем

После формирования модели в вычислительной среде анализируется поведение дискретной составляющей траектории. Исследуются виды бифуркаций при изменении важнейших параметров модели и топологические типы аттракторов. Из-за большой вариативности меняются не только типы аттракторов, но и характер границы их областей притяжения. Аттракторов в итерациях $x_{n+1} = \varphi(x_n)$ существует только три топологических типа [15] — А (равновесие (цикл)), Ф (канторовский «Cantor-like set»), Y (интервальный). Ф и Y связаны с нерегулярными режимами движения. Граница областей притяжения этих аттракторов может быть единственной точкой или несчетным множеством несвязных точек, ответвленных за переходный хаос.

В результате проведенных исследований показано, что для дискретной траектории, полученной при численном решении множества задач Коши разработанной гибридной системы уравнений с модификациями, можно реализовать следующие пять вариантов поведения, которые будут биологически обоснованы:

1) альтернативные аттракторы — тривиальное нулевое состояние $(0, 0)$ и «высокое» R^* стационарное состояние (или простой цикл периода $p < \infty$, как в модели из [16]) с границей областей притяжения единственной точкой-репеллером;

2) альтернативные аттракторы — стационарные состояния, отделенные ограниченным непритягивающим хаотическим множеством, возникшим из-за локально-несвязной границы областей притяжения. Соответственно, наблюдаем переходный хаотический режим, и возникает асимптотическая неопределенность в поведении траектории. По начальным условиям не можем сказать, в какой из аттракторов попадет траектория;

3) один из аттракторов — циклический режим, сосуществующий с хаотическим репеллером. Возможны переходы хаос–цикл для разных уровней численности популяции;

4) альтернативные сосуществующие аттракторы в форме простого цикла $p = 2$ без точки-репеллера с фрактальной на всем интервале значений границей областей притяжения;

5) единственный интервальный хаотический аттрактор Y , не включающий нулевое состояние $(0, 0)$, для которого возможен граничный кризис. После граничного кризиса, т.е. потери свойства инвариантности $x_n \in Y, \varphi^{n+i}(x_n) \notin Y$ аттрактором итерационной динамической системы, для случая $x_0 \in Y, x_0 \neq 0, x_{n+1} = \varphi(x_n) \notin Y$ будет только тривиальное равновесие.

Модификацией модели описан сценарий коллапса трески у побережья Канады 1992 г. именно последним (пятым) вариантом, переходом от равновесия R^* к хаотическому режиму в Y после касательной бифуркации и разрушением интервального аттрактора. Модель учитывает запаздывание, важное в большинстве биологических процессов [17].

Из числа интерпретируемых модельных сценариев исключен вариант с образованием притягивающего канторовского множества, совершенного множества, не содержащего ни внутренних, ни изолированных точек. Подобный фрактальный объект видится необоснованным в контексте решаемых в рамках исследований биологических задач. Образование бесконечного множества неустойчивых траекторий всех периодов в данном случае выглядит излишним проявлением бесконечной делимости числовой прямой, абстрактного свойства, которое нереально перенести на объект с изначально дискретными единицами измерения.

Заключение

На актуальных примерах показано, что гибридные структуры — это сложный в применении, но гибкий и вариативный инструмент вычислительного моделирования разнообразных экологических процессов с резкими и пороговыми изменениями в их протекании. Метод может быть применен для анализа переходных явлений и экстремальных состояний — таких разных ситуаций, как стремительный коллапс промысловых запасов крупных и даже некоторых мелких рыб, прерывистость темпов роста в онтогенезе, вспышка численности насекомых-вредителей. Выделено пять интересных для моделирования вариантов качественного поведения гибридных систем.

Первой задачей, решенной данным методом, было объяснение кризиса эксплуатации биоресурсов при организации искусственного воспроизводства исчезающих осетровых рыб Каспия. Обычные методы не давали результата, по специальному статистическому анализу реальных данных полученная эмпирическая кривая зависимости $R = \varphi(\lambda S)$ запас–восполнение севрюги не только волнообразна, но и имеет пороговый эффект. Схожее наблюдается для трески *Gadus morhua* Северной Атлантики, только по другим экологическим причинам. Описать два случая коллапса запасов смогли, усовершенствовав модель дополнительным триггерным функционалом, и подход оказался универсальным для многих явлений в динамике вспышек вредителей леса. Вспышки численности — на самом деле спектр динамически разнородных явлений, и пороговый запуск — только один из вариантов [18].

Для практики модельные сценарии явления коллапса запасов означают, что путь установления оптимальной квоты вылова q по концепции Maximum sus-

tainable yield (MSY) является опасным. Незначительный в процентном отношении систематический перелов может обернуться катастрофой. Предлагаем лимитировать технические возможности промысла — размеры орудий лова и водоизмещение судов. Вводит краткий мораторий или усиливать ограничения нужно сразу при резком падении уловов на 17–20 %. У промысла не должно быть стимула занижать в отчетах объемы добытой рыбы. В трех рассмотренных случаях коллапса (трески, анчоуса и осетровых) имеются и общие аспекты, и принципиальные отличия. Коллапс трески выглядит несчастным случаем. С осетровыми Каспия произошло осознанное уничтожение, и специалисты, и власти прекрасно понимали ситуацию деградации, но не предприняли вовремя нужных мер.

Актуальный вариант модификации базовой модели, помимо включения функционалов, состоит в более детальном и обоснованном описании темпов развития. В раннем онтогенезе темпы развития не постоянны и резко меняются, поэтому нельзя их описать одним уравнением, но можно сформировать вторую гибридную вычислительную структуру. На скорость прироста воздействуют и абиотические факторы среды, и конкуренция внутри поколения за кормовые ресурсы. Если решающее значение для перемен темпов роста имеют температурные или кислородные изменения, то предикаты системы (6) можно связать с этими внешними факторами.

Подобные ситуации требуют классификации, которую актуально строить в терминах нелинейной динамики. Подход обоснован наблюдением, что инвазионные процессы при вселении чужеродных видов и совершенно несхожих организмов, как стенофора *Mnemiopsis leidyi* в Каспийском море [19] и бабочка *Lymantia dispar* [20] в Северной Америке, могут показывать поразительное совпадение на графиках изменений с переходом к вспышкам. Удивительное для биологов сходство развития активного вторжения объяснимо средствами вычислительных моделей. В следующих работах обсудим сценарий с разрушением среды из-за развития опасного вселенца или инфекции.

А.Ю. Переварюха

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ПОПУЛЯЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ РИБ ТА КОМАХ

Різкі нетривалі зміни в популяційних процесах неможливо розрахувати традиційними математичними моделями — системою балансових рівноваг, і подати в термінах асимптотичної динаміки — замкнутих граничних множин траєкторій, стійких циклів або навіть хаотичних атракторів. У дослідженнях проведено обчислювальне моделювання практично важливих сценаріїв спалахів і небезпечних інвазій, що відносяться до екстремальної та перехідної динаміки. Екосистеми, як організми, не можуть довго існувати в таких перехідних режимах. Спалахи чисельності шкідливих комах у формі окремих піків, але не осцилюючих режимів, мають ряд особливостей порогового розвитку. Завдання аналізу спалахів перетинається з проблемою моделювання вичерпування запасів при промислі риб. Ключовий аспект у методиці побудови гібридних моделей — формалізація нелінійної ефективності відтворення, що змінюється пороговим чином. Швидка деградація популяцій в сценаріях колапсу не може бути своєчасно передбачена методами розрахунків квот (показано на прикладах тріски Північної Атлантики і анчоуса Перу), так як невірні оцінені темпи відновлення запасів. Обговорено переваги методу цілеспрямованої реалізації біфуркацій в гібридних системах. Проведено порівняльний аналіз нових модельних сценаріїв для екстремальних ситуацій з подібними фазами під час колапсу запасів риб і спалахів чисельності шкідливих комах, отриманими модифікаціями функціоналів в базовій гібридній системі. Виділено п'ять важливих для моделювання біосистем варіантів якісної поведінки гібридних систем.

Ключові слова: моделювання динаміки популяцій, гібридні моделі, відтворення осетрових Каспію, анчоус Перу, колапс тріски Канади, спалахи чисельності комах, біфуркації, темпи зростання, сценарії біологічних інвазій.

A.Yu. Perevaryukha

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF MODELING OF EXTREME POPULATION PROCESSES FOR FISH AND INSECTS

Situations of sharp short-term changes in population processes can not be calculated by traditional mathematical models – a system for balance equilibrium. Unstable and short time shifts can not be expressed in terms of asymptotic dynamics – closed limit sets of the trajectory, stable cycles or even chaotic attractors. In our studies, we perform computational modeling of practically important scenarios of outbreaks and dangerous invasions related to extreme and transient dynamics. Ecosystems, like organisms, can not last for long in such transitional regimes. Outbreaks of the number of harmful insects in the form of individual peaks but not oscillating regimes have a number of features of threshold development. Unexpectedly, the problem of analysis of outbreaks intersects with the problem of modeling depletion of stocks in the fishery of fish. Rapid degradation of populations in the collapse scenarios could not be predicted in time by the methods of calculating the catch quotas (shown on examples of cod of the North Atlantic and anchovy of Peru), because the rates of restoration of reserves were incorrectly estimated. A key aspect in the methodology for constructing hybrid models is the formalization of nonlinear reproduction efficiency, which varies in a threshold manner. In the article we prove the advantages of the method of purposeful realization of bifurcations in hybrid systems. We conducted a comparative analysis of new model scenarios for extreme situations with similar phases during the collapse of fish stocks and insect outbreaks of pests obtained by modifying functionals in the basic hybrid system. We identified five variants of qualitative behavior of hybrid systems that are important for modeling of biosystems.

Keywords: modeling of population dynamics, logical-event and hybrid models, state of Caspian Sea sturgeon fish, anchovy of Peru, Canada's northern cod collapse, outbreaks of insects, bifurcations, growth rates, scenarios of biological invasions.

1. Perevaryukha A.Y. Comparative modeling of two especial scenarios of bioresources collapses: Canadian Atlantic cod and Caspian Sea sturgeon. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. Vol. 49, N 6. P. 22–34.
2. Perevaryukha A.Y. Mathematical model for growth rates of competing organisms for biological species with metamorphoses in ontogenesis. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. Vol. 49, N 11. P. 39–52.
3. Heger T., Haider S. Species from different taxonomic groups show similar invasion traits. *Immediate Science Ecology*. 2015. N 3. P. 1–13.
4. Veshchev P.V., Guteneva G.I. Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the lower Volga under current conditions. *Russian Journal of Ecology*. 2012. Vol. 43, N 2. P. 142–147.
5. Ricker W.E. Stock and Recruitment. *Journal of the fisheries research board of Canada*. 1954. Vol. 11, N 5. P. 559–623.
6. Frolov A.N. The beet webworm *Loxostege sticticalis* l. (Lepidoptera, Crambidae) in the focus of agricultural entomology objectives: The periodicity of pest outbreaks. *Entomological Review*. 2015. N 2. P. 147–156.
7. Singer D. Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval. *SIAM Journal of Applied Math*. 1978. Vol. 35. P. 260–268.
8. Feigenbaum M.J. The transition to aperiodic behavior in turbulent systems. *Communications in Mathematical Physics*. 1980. Vol. 77, N 1, P. 65–86.
9. Idyll C.P. The anchovy crisis. *Scientific American*. 1973. Vol. 228. P. 22–29.
10. Barrett R. Population dynamics of the Peruvian anchovy. *Mathematical Modelling*. 1985. Vol. 6, N 6. P. 525–548.
11. Rose G.A., Rowe S. Does redistribution or local growth underpin rebuilding of Canada's Northern cod? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2018. Vol. 75. P. 825–835.
12. Clark L.R. The population dynamics of *Cardiaspina albitextura* (Psyllidae). *Aust. J. Zool*. 1964. Vol. 12. P. 362–380.
13. Khodorevskaya R.P., Kalmykov V.A. Formation of populations of Acipenseridae sturgeons in the Volga-Caspian basin. *Journal of Ichthyology*. 2014. Vol. 54, N 8. P. 576–583.

14. Shelton A.O., Mangel M. Estimating von Bertalanffy parameters with individual and environmental variations in growth. *Journal of Biological Dynamics*. 2012. Vol. 6. P. 3–30.
15. Guckenheimer J. Sensitive dependence on initial conditions for one dimensional maps. *Comm. Mathem. Physics*. 1979. Vol. 70. P. 133–160.
16. Zayats V.M. Construction and analysis of a model of a discrete oscillatory system. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2000. Vol. 36, N 4. P. 610–613.
17. Martsenyuk V.P., Andrushchak I.Ye., Zinko P.N., Sverstiuk A.S. On application of latticed differential equations with a delay for immunosensor modeling. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018. Vol. 50, N 6. P. 55–65.
18. Perevaryukha A.Y. A model of development of a spontaneous outbreak of an insect with aperiodic dynamics. *Entomological Review*. 2015. Vol. 95, N 3. P. 397–405.
19. Pourang N., Eslami F., Saravi H., Fazli H. Strong biopollution in the southern Caspian Sea: the comb jelly *Mnemiopsis leidyi* case study. *Biological Invasions*. 2016. Vol. 18, N 8. P. 2403–2414.
20. Ponomarev V.I., Andreeva E.M., Shatalin N.V. Group effect in the gypsy moth (*Lymantria dispar*, Lepidoptera, Lymantriidae) related to the population characteristics and food composition. *Entomological Review*. 2009. Vol. 89, N 3. P. 257–263.

Получено 27.06.2018