

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПРОИЗВОДСТВА ОСЕТРОВЫХ РЫБ

Переварюха А.Ю., к.т.н.,

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург

В статье описываются новый метод разработки математических моделей, предназначенных для моделирования влияния искусственного воспроизводства и оценки эффективности технологии выпуска. Непрерывно-дискретные динамические системы алгоритмически реализованы с применением формализма гибридных автоматов. В основе метода лежит формализация скачкообразных изменений в экологических процессах с применением системы дифференциальных уравнений с изменяемой структурой правых частей.

Введение

Масштабное антропогенное изменение естественной среды обитания многих ценных видов рыб существенно повлияло на их возможности выживания. Вследствие реализации гидростроительных проектов осетровые Каспийского моря лишились доступа к большей части естественных нерестилищ в бассейне Волги. Восполнить потери планировалось с использованием технологии заводского воспроизводства молоди, однако не было достоверно известна эффективность подобных мероприятий и в результате, коэффициенты возврата заводской молоди неоднократно переоценивались, что приводило к существенным проблемам при оценке допустимого уровня эксплуатации популяций.

Целью работы является разработка моделей, позволяющих оценивать влияние искусственного воспроизводства на состояние популяции и исследовать возможности технологических изменений выпуска молоди.

В ихтиологической практике длительное время используются нелинейные модели. Рикером была предложена и самая известная модель, математически формализующая зависимость запаса и пополнения:

$$R = aS \exp(-bS) \quad (1)$$

где: S – величина нерестового запаса, b – коэффициент, отражающий величину, обратную значению S при котором число выжившей молоди максимально, соответственно, имеет смысл только $b < 1$; a – безразмерный параметр, биологический смысл параметра a трактуется неоднозначно. Графиком (1) является унимодальная кривая, имеющая одну точку перегиба и единственное пересечение с биссектрисой координатного угла $R=S$, геометрическим местом стационарных точек, (1) является функцией с отрицательным шварцианом.

Модель отражает эффект снижения численности пополнения при увеличении численности запаса. В этом случае повышенная плотность популяции становится

негативным фактором, увеличивающим смертность. В модели Рикера предполагается, что на смертность влияет именно первоначальная численность поколения.

Позднее Дж. Шепард предложил уравнение, назвав его универсальным, в котором рассматривал введенную им некоторую критическую биомассу K :

$$R = \frac{aS}{1 + (S/K)^\beta}, \quad (2)$$

где a – константа с размерностью пополнение на единицу биомассы; K – интерпретируется как биомасса, при превышении которой начинают действовать зависящие от плотности факторы смертности; β – параметр, определяющий интенсивность воздействия компенсационной (увеличивающейся от возрастания плотности) смертности. Особенности графика (2) зависят от параметров.

Теория формирования пополнения начала развиваться ранее, чем были описаны некоторые важнейшие особенности динамики одномерных отображений и сценарии хаотизации. Применение (1),(2) отдельно от современных представлений нелинейной динамики оказалось существенным фактором для реальной практики управления биоресурсами и явилось одной из основных причин отмечаемых случаев неудачного применения данных моделей, которых было предложено порядка дюжины.

Разработка гибридных моделей

Преодоление описанных проблем требовало не просто комплекса новых моделей для разных случаев, но разработки принципиально нового метода их построения. Математический аппарат, который должен применяться при расчете допустимого уровня эксплуатации популяций и эффективности воспроизводства, от которого зависит способность восполнения запасов, необходимо разрабатывать с учетом современного уровня представлений нелинейной динамики. Основные математические зависимости, применяемы ранее при подобных расчетах были предложены в 1960 и 1970 годы, ещё до открытия универсальности поведения нелинейных систем М. Фейгенбаума и особенностей образования фрактальных границ областей притяжения аттракторов.

Как показано автором [1], модели формирования пополнения популяций Рикера, Шепарда, Бивертон и Холта рассмотренные с применением методов теории бифуркаций дискретных динамических систем обладают противоречивым поведением с точки зрения сущностной интерпретации всех возможных вариантов изменения их поведения, так как относятся к классу динамических систем, удовлетворяющих критериям теоремы Д. Сингера. Т.е. классифицирующим признаком служат характеристики, не имеющие интерпретации в рамках той предметной области, в которой были предложены используемые при расчете допустимых уловов модели. Недостоверное определение

максимально возможного уровня изъятия, который сможет восполнить популяция, приводит к резкому сокращению запасов и далее полной деградации популяции, как произошло с осетровыми рыбами Каспийского моря.

Таким образом, необходимо решить задачу разработки принципиально новой структуры моделей процесса воспроизводства водных биоресурсов для прогнозирования динамики популяции как результата баланса между репродуктивным потенциалом и величиной промысловой эксплуатации. Решено применить формализм гибридных автоматов (рис. 1), который позволит в моделях на основе дифференциальных уравнений при достижении особых состояний в пространстве переменных состояния (событий) изменять как значения параметров в правых частях ОДУ, так и их форму.

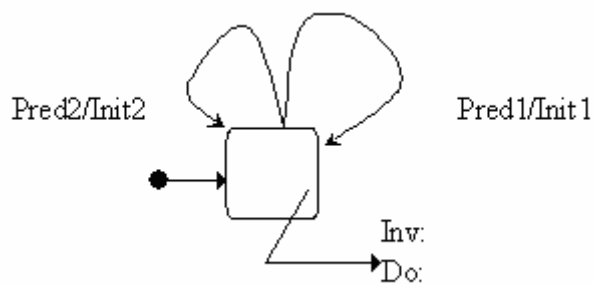


Рис. 1. Простой гибридный автомат с двумя переходами.

Структуру гибридного модельного времени предлагается математически формализовать в виде следующей последовательности:

$$\tau = \left\{ \left\{ \text{Gap_pre}_1, [0, T_1], \text{Gap_post}_1 \right\}, \dots, \left\{ \text{Gap_pre}_n, [T_{n-1}, T_n], \text{Gap_post}_n \right\} \right\}. \quad (3)$$

где: *Gap_pre* – «временная щель» для вычисления согласованных начальных условий *Init* и проверки предиката на левом конце промежутка очередного длительного поведения; *Gap_post* – «временная щель» где определяются новые начальные условия на правом конце текущего промежутка τ_i для решения следующей по порядку или выбранной по условиям предиката задачи Коши. T_i – время срабатывания перехода: в которой становится истинным предикат *Pred* события, приводящего к смене поведения.

Вычисляемые параметры и начальные условия объединены в виде множества кортежей:

$$\langle D_0, \tau, N_0(0), N(\tau) \rangle, \langle D_1, f(w_{k1}), N_0(\tau), N(\tau_1) \rangle, \langle D_2, f(w_k), N_0(\tau_1), N(\tau_2) \rangle. \quad (4)$$

Применение структуры (3) совместно с (4) позволит модельно описывать влияние изменений в онтогенезе происходящих при смене этапов развития особей поколения D_0, D_1, D_2 и критически влияющим на выживаемость поколения $N(t)$, создавая на кривой воспроизводства (графике зависимости запас-пополнение) локальные минимумы. Время срабатывания перехода в гибридном автомате рассчитывается после проверки на истинность условий, заданных массивом значений w_i оцененных по литературным

данным. Модель должна определяться конечным множеством режимов изменения состояния, с каждым из которых связана правая часть ОДУ и множеством переходов между состояниями. Каждому переходу должно быть поставлено в соответствие условие завершения активности и функция инициализации новых начальных условий.

Непрерывно-дискретную модель смешанного воспроизводства, учитывающей выпуск некоторого количества молоди N_{art} , происходящего в момент времени t_{art} , можно определить в виде следующей системы с условиями перехода:

$$\begin{cases} \frac{dN_{i+1}}{dt} = -(\alpha w(t)N_{i+1}(t) + \theta(N_i(\tau)\beta)N_{i+1}(t)), & N_{i+1}|_{t=t_{art}} = N_{i+1}(t) + N_{art}, N_{i+1}|_{t=0} = \lambda N_i|_{t=\tau} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N_{i+1}^{\frac{2}{3}}(t) + \zeta}, & w_{i+1}|_{t=t_{art}} = w_{i+1}(t) + \Delta w, w_{i+1}|_{t=0} = w_0. \end{cases} \quad (5)$$

Для исследования эффективности данного управляющего воздействия необходимо анализировать только величину относительного отклонения:

$$\rho = \frac{\psi(S, \langle N_{art}, t_{art} \rangle) - \psi(S)}{\psi(S)} \times 100.$$

В результате исследования модели показано, что выпуск молоди может как стабилизировать популяцию на более высоком уровне численности, так и снизить численность при чрезмерном выпуске молоди. Популяция нечувствительна к огромным масштабам выпуска:

$$\forall t_{art} < t_{art}^*, \forall S > 0 \exists \eta < 0 \text{ такое, что } \lim_{N_{art} \rightarrow \infty} \frac{\psi(S, \langle N_{art}, t_{art} \rangle) - \psi(S)}{\psi(S)} = \eta.$$

Основной сценарий изменения технологии искусственного воспроизводства заключается в реализации перехода от определённой пары $\langle N_{art}, t_{art} = \text{const} \rangle$ стандарта к упорядоченной последовательности $\mathbf{B} = \{ \langle N_{art}^0, t_{art}^0 \rangle, \dots, \langle N_{art}^i, t_{art}^i \rangle \}$ моментов выпуска партий. Как показывают исследования функционала, $\max \rho[\mathbf{B}]$ увеличивается при формировании равномерно уменьшающихся партий.

В 1970-е гг. эксперты обосновали концепцию максимизации ежегодного вылова за счет выпуска (порядка 90 млн. шт.) молоди осетровых. Были достигнуты существенные объёмы выпуска, но заявленные планы не были реализованы. С 1998 г. осетровые включены в список Конвенции о международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой исчезновения.

Литература

1. A. Yu. Perevaryukha Uncertainty of Asymptotic Dynamics in Bioresource Management Simulation // Automatic Control and Computer Sciences, 2011, Vol. 45, No. 4, pp. 223–232.