

УДК 519.6

© А. Ю. Переварюха

СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМЫ ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ¹

Разработка действительно актуальных вычислительных моделей в экологии требует внимания к описанию ключевых аспектов взаимодействия среди большого числа других фоновых факторов. В статье представлено формирование графовой модели для анализа сценариев последствий вмешательства в функционирование экосистемы с использованием запускаемого из управляющих вершин импульсного процесса. Структурный граф включает комплекс биотических и антропогенных факторов, воздействующих на стабильность восполнения промысловых запасов осетровых рыб Каспийского моря. Направленность распространения импульса отражает причинно-следственный характер взаимовлияния, проявляющегося при изменении состояния одного из компонентов экосистемы. Исследовались контуры действия обратных связей, которые не были учтены ранее при согласовании промысловых прогнозов и отразились в стремительном истощении биоресурсов. Выявлен контур цепи факторов, переменное действие которых ослабляет эффективность рыболовных мероприятий при завышенной оценке репродуктивного потенциала. Обсуждается ограниченность интерпретации традиционных для промысловой ихтиологии дискретных динамических систем с возможностью реализации сценария хаотизации применительно к задачам управления биоресурсами и перспективы разработки альтернативных сценарных популяционных моделей.

Ключевые слова: модели динамики промысловых популяций, когнитивные графовые модели, импульсные процессы, обратные связи в экосистемах, интерпретация результатов вычислений.

Введение

Нами развивается подход к моделированию состояния промысловых популяций при несовершенных способах оценки их способности к самовосстановлению [1], но разработать модель иногда проще, чем объяснить для практических задач результаты имитационных экспериментов. Выбранная концепция формализации изменяющихся факторов смертности на стадиях развития рыб включала достаточно узкий сегмент экосистемного взаимодействия [2], что вызывает ряд замечаний со стороны практиков рыбного хозяйства. Расширение модели с достаточно сложной структурой любым дополнительным параметром значительно увеличивает затраты на вычислительное исследование особенностей поведения траектории. В реальной экологической проблеме деградации изолированных популяций рыб Каспийского моря гораздо больше факторов, чем возможно включить в непрерывно-событийную динамическую модель на основе системы дифференциальных уравнений с предикативно переопределяемыми правыми частями.

Методы дискретной математики и «мягкие вычисления» к популяционной проблематике применялись нечасто. Из современных работ можно отметить использование клеточных автоматов для прогнозирования пространственного распределения планктонных организмов. Актуальной становится задача обоснования концепции моделирования популяционной динамики при разнообразном антропогенном воздействии на основе гибких методов системного анализа, работающих с многофакторной проблематикой. Эксплуатация биоресурсов часто оказывается нерациональной из-за однозначной трактовки прямого влияния факторов. В настоящей работе рассматривается формирование графовой модели, структурирующей качественную информацию о значительно более широком наборе взаимодействующих факторов, влияющих на благополучие рыбных ресурсов Каспия. Орграф с особым видом функционала преобразования дуг предназначен для выявления в направленном импульсном процессе цепи обратных связей и противоположно направленных контуров опосредованного влияния на интересующие ключевые факторы — параметры вершин графа. Другая обсуждаемая в статье проблема при моделировании реальных экологических ситуаций состоит в интерпретации результатов вычислительных экспериментов при разнообразии качественного поведения траектории.

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 15-07-01230, 14-07-00066).

§ 1. Краткий анализ экологической ситуации

Биологическая продуктивность — один из важнейших показателей для прогнозирования перспектив хозяйственного использования водных популяций в измененной среде. Динамика соотношения суммарной продуктивности сообщества и его биомассы (P/B -отношение) отражает общий тренд развития экосистемы. Помимо скорости образования биомассы важна качественная оценка ее неравномерного перераспределения, выраженная количественно в индексе биоразнообразия сообщества. Особые междисциплинарные исследования должны занимать ситуации деградации отдельных ценных промысловых популяций на фоне относительно стабильной среднемноголетней продуктивности водоема и последующего сдвига в распределении сравнительного обилия видов, которое не просто вернуть в предшествующее состояние. Ниша в трофической цепи занимает другими видами, часто чужеродными и неинтересными для промысла.

Наиболее существенно последствия зарегулирования стока рек отражаются на возможностях размножения мигрирующих анадромных видов. Для осетровых и крупных сиговых становились недоступными ранее пригодные для нереста участки в верховьях рек. Восполнить потери в воспроизводстве популяций таких ценных промысловых рыб, как байкальский омуль, ладожский сиг и четыре вида осетровых Каспийского моря, предполагалось за счет технологии искусственного оплодотворения икры и последующего выпуска выращенной в прудах молоди.

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, способного не только компенсировать, но и превзойти потери в естественном воспроизводстве при гидростроительстве. В результате строительства рыбоводных предприятий для искусственного выращивания молоди к поставленной цели резкого увеличения масштабов выпуска удалось приблизиться. В 1977 г. уловы осетровых достигли своего максимума в размере 27,3 тыс. т, однако затем начали неуклонно уменьшаться [3]. В 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. Отдельные заявления о нелегальном промысле, многократно превышавшем официальный, выглядят сомнительно. Когда в легальном кошельковом неводе отсутствует улов, то почему рыбы должно быть больше на браконьерских крючках, если эффективность облова створа реки неводом, безусловно, выше?

Неоднократно проводилась переоценка реальной величины промыслового возврата от искусственного воспроизводства, и получение достоверной оценки представляет непреодолимую сложность. Подтверждено, что изначально заложенный в планах 1970-х гг. коэффициент промыслового возврата заводской молоди в размере 3% оказался завышенным ожиданием. В 1989 г. определялись: для осетра — 1,2%, севрюги — 1%, белуги — 0,1%. В 1998 г. для осетра — 0,7%, севрюги — 0,83%, белуги — 0,07% [4]. Анализ причин невыполнения прогнозов 70-х гг. в сопоставлении с цепочкой экосистемных изменений, на фоне которых организован рыбоводный процесс и определялась величина допустимого вылова, составляет обособленную задачу в комплексных исследованиях. При планировании мер по сохранению уже деградировавших популяций необходима оценка факторов реального снижения выживаемости на ранних этапах жизненного цикла рыб.

Влияние водности половодья противоречиво оценивается специалистами. Пресный сток воды стимулирует интенсивность нерестовой миграции, но в многоводные годы большой сброс холодный воды ГЭС [5] задерживает начало миграции половозрелых рыб из моря в русло Волги. При отмеченных противоречиях водность считалась ихтиологами ведущим фактором в формировании промысловых запасов и закладывалась при расчетах промысловых прогнозов. В маловодные годы коэффициент промысловой смертности севрюги достигал 0,89 [6], что связано с техникой лова неводом в русле. Представляется логичным, что отмечаемая «малородность» поколений за маловодные годы объясняется повышенной уязвимостью идущих на нерест рыб для промысла. Подобные коллизии факторов часто встречаются в естество-

знании: в многоводные годы площадь пригодных нерестилищ больше, но и скорость течения воды, уносящей в потоке недостаточно сформированную молодь, увеличивается. Сравнительное сопоставление схожих по условиям ситуаций подтвердит некоторые гипотезы. Маловодный период Волги 1930-х гг. не привел к критическим последствиям для запасов осетровых, в 1950–60 гг. наблюдался умеренный рост уловов, что говорит о превалирующем факторе промысловой смертности нерестовой части запаса, но не объясняет переоценку возможностей искусственного воспроизводства.

Период регрессии сменился в 1978 г. неожиданным для климатологов быстрым повышением уровня Каспийского моря, амплитуда изменений которого за период наблюдений составляет $\approx 3,8$ м. Подъем рассматривался экспертами как благоприятный фактор, прогнозировалось увеличение площади акваторий, пригодных для нагула молоди, и улучшение трофической обстановки [7]. В прогнозах не брались в расчет ряд значимых фаунистических факторов, связанных с распространением интродуцированных организмов. Обратим внимание, что на фоне деградации осетровых уловы их пищевых конкурентов аналогично уменьшались, что не укладывается в выводы из вольтерровской модели — системы уравнений, описывающих динамику конкурирующих за один ресурс двух ограниченных популяций [8], в которой побеждает популяция, сохранившая репродуктивный потенциал в новых условиях. Особенностью ареала обитания популяций является то, 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 сказались на ареале распространения искусственно вселенных в 60-х гг. видов моллюсков средиземноморского фаунистического комплекса, ставших важным кормовым ресурсом. Исторически именно кормовая база при достаточно высоком ее P/B -отношении служила ограничителем развития рыбных ресурсов моря [9], усиливая пищевую конкуренцию в неблагоприятные годы. Эволюционно сложившаяся репродуктивная стратегия осетровых, выразившаяся в существовании сезонных рас и длинных миграционных путей, позволяла поддерживать высокую биомассу рыб при относительно небольшой кормовой биомассе. Указанные аспекты ставят для концептуальной структурно-динамической модели общий вопрос, насколько успешно выбранная рыбохозяйственная стратегия была способна переформатировать эволюционный тренд анадромных популяций.

§ 2. Формальный аппарат моделирования

Описание схемы нарушенного функционирования экологических процессов относится к области системного анализа слабоформализованных проблем. Взаимовлияние между множеством факторов приходится исследовать на уровне сопоставления качественных изменений, так как они отражаются в литературе в сравнительно-оценочных формулировках. Оцениваемые в работах биологов «благоприятность условий нагула рыб» или «напряженность трофической обстановки» неестественны для формализации в уравнениях и представляют агрегированный показатель. Для адаптивного трансформирования оценок и суждений в динамические структуры в слабоформализованных областях развиваются методы построения и анализа «когнитивных графов» в специализированных информационных средах [10].

Определение «когнитивной модели» достаточно расплывчатое, в нейрофизиологии этот термин имеет вполне специфическое значение, потому мы предпочтем говорить о структурно-динамических моделях. Структурирующий оргграф будем рассматривать как инструмент для формирования наиболее полноценных гипотез о функционировании популяционного процесса при включении определенных внешних воздействий. Применение концептуальной структуризации может изменить сложившиеся стереотипы, которыми оперируют в предметной области, и способствовать развитию гибких логико-сценарных подходов к прогнозированию вероятности истощения эксплуатируемых биоресурсов в зависимости от принципов принятия управленческих решений.

Структуризация предполагает представление функциональных связей гипотезы об эволюции системы в форме знакового оргграфа [11], вершинам которого сопоставляется выделенное

множество факторов, а ребрам — знаки «−» и «+». Ребрам можно сопоставить веса, если определить универсальную шкалу взаимодействий $\langle -u_{max}, \dots, 0, \dots, +u_{max} \rangle$ для всей рассматриваемой ситуации. В отличие от моделей в виде уравнений для расчета основной величины, оргграф — это наглядный результат аналитического сопоставления и обсуждения группы безразмерных показателей. Для построения экологической графовой модели необходимо подробно определить причинно-следственный комплекс наиболее вероятных связей и уже на базе формального анализа в следующем этапе перейти к построению традиционной вычислительной системы.

Формализм знаковых (взвешенных) графов является расширением представления оргграфа $G(Y, E)$, которое дополняется множеством параметров вершин V , где каждой вершине y_i ставится в соответствие безразмерный параметр-концепт $v_i \in V$. Функционал преобразования дуг $F(V \times V, E)$ ставит в соответствие дуге оргграфа знак (или вес).

Функционал преобразования определим следующим образом:

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +u_{ij}, & \text{увеличение } v_i \text{ влечет возрастание } v_j, \\ -u_{ij}, & \text{увеличение } v_i \text{ влечет уменьшение } v_j, \end{cases} \quad (2.1)$$

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

Ф. Робертс для моделирования социально-экономических ситуаций предложил рассматривать последовательные изменения заданных значений параметров, соответствующих вершинам как импульсные процессы в дискретном времени [12]. Тогда импульс $p_j(n)$ определим через изменение значения параметра вершины v_j в момент $n > 0$:

$$p_j(n) = v_j(n) - v_j(n - 1).$$

После запуска импульсного процесса значение параметра вершины будет изменяться:

$$v_i(n + 1) = v_i(n) + \sum_{j=1, j \neq i}^N F(v_i, v_j, e_{ij}) p_j(n). \quad (2.2)$$

Очевидно, что какие-то актуальные выводы и значимые гипотезы можно строить, рассматривая импульсные процессы (2.2) для вершин, попадающих в контуры с замкнутыми путями. Интерес представляет не абсолютное условное значение в вершинах, а сравнение их изменений $\Delta_n v_i$ относительно начального $v_i(0)$ за фиксированное число шагов.

§ 3. Формирование структурно-динамической модели Каспия

Ретроспективный анализ промысловой статистики и разнообразных экспертных мнений позволил составить множество основных концептов, в том числе пригодных для запуска импульсов из вершин. Суждения специалистов противоречивы, но отдавать предпочтение лучше мнению независимых экспертов-наблюдателей, не принимавших непосредственного участия в выработке решений. В [13] обосновывается, что нелегальный вылов является своеобразным «громоотводом», неким внешним фактором, присутствием которого можно объяснить неудачи любой стратегии управления биоресурсами, а его степень влияния должна быть вне рамок шкалы. Эмпирическая рекомендация для графа — не менее десяти, но не более пятнадцати вершин, при этом при сомнениях лучше отбросить избыточные и неподтвержденные факторы. В качестве концептов, определяющих процессы в экосистеме Каспия и влияющих на динамику запасов осетровых рыб, определим следующие 12 обсуждавшихся специалистами природных и антропогенных факторов и поставим их в соответствие вершинам оргграфа $G(Y, E, V)$: v_1 — состояние нерестовой части стада осетровых рыб; v_2 — годовое пополнение молоди; v_3 — естественная (компенсационная) убыль поколения; v_4 — благоприятность условий полового созревания; v_5 — удельная эффективность естественного воспроизводства; v_6 — масштабы искусственного выпуска; v_7 — уровень промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов; v_8 — биомасса доминирующего вида кормового бентоса; v_9 — обеспеченность кислородом кладок икры

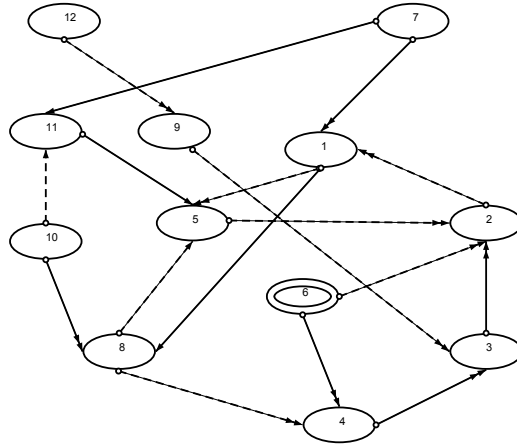


Рис. 1. Структурный граф взаимодействия факторов

на нерестилище; v_{10} — трансгрессия уровня Каспийского моря; v_{11} — численность основных естественных врагов молоди; v_{12} — доступная протяженность путей нерестовой миграции.

Массив изучаемой информации содержался в ежегодниках и тематических сборниках. Оказалось информативным отмечать коррекции прогнозов хозяйственного использования популяций и изменения учитываемых их составителями факторов. Сопоставлялись доступные данные по уловам двух видов осетровых; пропуску производителей на нерестилища и скату молоди севрюги *Acipenser stellatus*, для которой сохранились естественные нерестилища [14]; подсчетам численности по результатам морских траловых съемок. Оценки общей численности воспринимались как косвенная информация из-за сомнений в достоверности расчетов, полученных путем экстраполяции данных с квадратов лова.

В результате сопоставления данных наблюдений, анализа литературы об историческом развитии экосистемы и формализации ряда экспертных мнений удалось сформировать когнитивный оргграф, включающий 12 вершин и множество направленных дуг, отражающих знак и условную *выраженность* силы влияния (рис. 1). В функционале преобразования будет задано четыре вида передачи влияния $B = \{-1, -0.5, 0.5, 1\}$, по два для дуг «+» (на рис. 1 пунктирная дуга) и «-» (показана сплошной дугой).

Представленное дугами влияние различается не только по своему возникновению как «антропогенное» или «природное», но и по выраженности. Разумно по аналогии с физикой охарактеризовать для моделей в экологии «сильное» и «слабое» взаимодействие. Негативное действие промысла и сдвига уровня моря на биоресурсы различны, потому влияние $F(v_{10}, v_{11})$ определено как «слабое» с $u = -0.5$ (на рис. 1 с одним наконечником дуги). Вершины в графовой модели разделяются на зависимые и свободные от влияния других концептов, как величина промыслового изъятия и колебания уровня моря. Объем искусственного воспроизводства мы должны определить свободным концептом, так как дуга $\{v_1, v_6\}$ сделала бы импульсный процесс банальным, но масштаб выпуска будет сокращаться из-за нехватки пригодных для рыболовных целей производителей при малочисленности нерестовой части популяции. Импульсные процессы целесообразно запускать из антропогенно обусловленных свободных концептов v_6 (на рисунке выделена как стартовая) или v_7 . В структуре рисунка 1 мы считаем, что интенсификация промысла v_7 влияет и на осетровых, и на биомассу их конкурентов v_{11} . Два имеющих общую вершину контура оргграфа будем называть конкурирующими.

Алгоритмическая реализация оргграфа строится на основе стандартных средств с использованием инструментальной среды, поддерживающей дискретно-событийное моделирование. Преимущества позволяют реализовать сравнительный перебор сценариев расположения дуг и отбросить заведомо не согласующиеся. На основе оценки несинхронности пульсаций значений v_4, v_2 , входящих в конкурирующие контуры оргграфа, сформирована гипотеза, что присутствует еще один измеримый показатель, который может регулировать убыль численности поколения — темп роста молоди. Пороговое значение веса, после которого действие небла-

гоприятных факторов смертности молоди резко уменьшается, следует из представления об этапности жизненного цикла рыб. Характер регулярного колебания значения v_3 , синхронизированного с v_6 , предсказывает, что темп роста, в свою очередь, должен обратно зависеть от пищевых потребностей при увеличении плотности партий молоди.

Второй значимый вывод заключается в том, что существует предел процентного приращення численности нерестового запаса, который можно получить, предполагая неограниченность возрастания объемов выпуска. Достаточно долго обсуждался выбор оптимального веса для искусственно выпускаемой молоди, который при минимизации затрат на выращивание обеспечивал бы желаемый промысловый возврат. Был установлен средний вес 3 г, но выдвигаются аргументы по его наращиванию [15], так как результаты оказались скромнее ожидаемых. Навеска выпускаемой молоди является параметром, которым можно оптимизировать технологию искусственного воспроизводства в модельных сценариях.

Взаимосвязь скорости роста и убыли численности можно отразить системой уравнений, если формализовать некоторые особенности развития, связанные с метаморфозами в раннем онтогенезе рыб. Для осетровых значителен период эндогенного питания за счет желточного мешка, потому динамику скорости молоди трудно описать известным балансовым соотношением анаболизма и катаболизма, например уравнением Л. фон Берталанфи. Для данной задачи требуется нетривиальный подход к расчетам, один из способов, по нашему мнению, — это применение дифференциальных уравнений с разрывной правой частью.

§ 4. Заключение

Выполнена структуризация разнородных сведений в виде знакового орграфа с набором вершин, соответствующих перечню факторов, влияющих на продуктивность Каспийского моря. Работу можно считать опытом применения метода, занимающего промежуточное положение между вербальным и математическим описанием развития процесса. Установленные дугами связи по принципу возрастания/понижения передаваемого сильного/слабого влияния смежных вершин позволяют рассматривать контуры опосредованного воздействия на благополучие популяций в тактах импульсного процесса. Обосновано, что на этапе построения графа нет необходимости дополнять интуитивно сложившуюся картину принципиально новыми концепциями, но желательно отбросить избыточные из числа тех, что многократно обсуждались специалистами. Цель анализа графа — не оценивать динамику по очевидным взаимосвязям, но выявить те дополнительные факторы, которые ранее были упущены и могли бы быть формализуемы далее в вычислительной модели. Для анализируемой ситуации неявным выявленным фактором представляется скорость роста молоди в зависимости от плотности, которая не учитывалась отдельно в известных дискретных моделях формирования популяций рыб.

С применением модификаций известных функциональных зависимостей вида «кривая воспроизводства» [16] (Рикера, Шепарда, Кушинга) не реально построить итерационную модель сценария деградации популяций осетровых при внесении дополнительных параметров из-за возникающих качественных метаморфозов поведения траектории. Бифуркации моделей Шепарда [17] и Рикера сущностно противоречивы. В дискретных динамических системах параметр искусственного восполнения запаса включается в выражение для критерия устойчивости аттрактора. Возникающие метаморфозы динамики траектории и отвечающие им экологические факторы моделей противоречат имеющимся данным наблюдениям и с неоправданно большими допущениями интерпретируются при биологическом обсуждении результатов вычислений. В качестве методики построения новых моделей для дальнейших исследований сценариев экологических ситуаций автором предлагается развивать непрерывно-событийные автоматные системы на основе дифференциальных уравнений с переопределяемой правой частью. Наиболее перспективным нам представляется переопределение скорости роста по мере смены стадий развития осетровых рыб, чем непосредственно скорости убыли поколений. Метод оценки эффективности и безопасности альтернативных стратегий эксплуатации биоресурсов в современных условиях рационально далее развивать не только на основе максимизации целевого функционала, а рассматривая последовательное повышение устойчивости траектории к возмущениям в окрестности минимально допустимого равновесия в сравнительных сценарных экспериментах.

Список литературы

1. Переварюха А.Ю. Циклические колебания и этапность развития в новых моделях динамики популяций // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2008. № 3. С. 116–125.
2. Переварюха А.Ю. Переход к устойчивому хаотическому режиму в новой модели динамики популяции в результате единственной бифуркации // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2010. № 2. С. 117–126.
3. Ходоревская Р.П., Рубан Г.И., Павлов Д.С. Поведение, миграции, распределение и запасы осетровых рыб Волго-Каспийского бассейна. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2007. 242 с.
4. Магзанова Д.К. Анализ данных по искусственному воспроизводству осетровых рыб // Экологические системы и приборы. 2011. № 12. С. 3–5.
5. Пироговский М.И. Влияние уровня моря на динамику численности осетровых в Северном Каспии // Рациональные основы ведения осетрового хозяйства. Волгоград: Волгоградская правда, 1981. С. 197–198.
6. Лепилина И.Н., Довгопол Г.Ф., Коноплева И.В. Оценка влияния водности на миграцию осетровых рыб в Каспийском бассейне // Научный потенциал регионов на службу модернизации. 2013. № 2 (5). С. 32–39.
7. Сапожников В.В. Изменение экосистемы Каспийского моря за последние 70 лет // Рыбное хозяйство. 2007. № 6. С. 39–43.
8. Ризниченко Г.Ю. Математические модели в биофизике и экологии. Ижевск, 2003. 183 с.
9. Карпинский М.Г. Экология бентоса Среднего и Южного Каспия. М.: ВНИРО, 2002. 283 с.
10. Хрусталёв Е.Ю., Мингалиев К.Н. Когнитивные модели стратегического управления оборонно-промышленным комплексом // Вооружение и экономика. 2011. № 1. С. 105–120.
11. 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.
12. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. 496 с.
13. Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005. 355 с.
14. Вещев П.В., Новикова А.С. Воспроизводство севрюги *Asipenser stellatus* в нижнем течении Волги // Вопросы ихтиологии. 1987. № 5. С. 801–806.
15. Коккоза А.А., Дубов В.Е. О стандарте заводской молоди и путях повышения эффективности искусственного воспроизводства осетровых рыб // Вопросы рыболовства. 2011. Т. 12. № 1. С. 121–126.
16. Ricker W.E. Stock and recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1954. Vol. 11. № 5. P. 559–623.
17. Shepherd J.G. A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries and construction of sustainable yield curves // ICES Journal of Marine Science. 1982. Vol. 40. № 1. P. 67–75.

Поступила в редакцию 24.09.2015

Переварюха Андрей Юрьевич, к. т. н., с. н. с., лаборатория прикладной информатики, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 14-я линия, 39.
E-mail: madelf@pisem.net

A. Yu. Perevaryukha

Structural and dynamic simulation of the interaction between the components of aquatic ecosystems under anthropogenic impact

Keywords: models of the dynamics of commercial populations, graph cognitive model, pulsed processes, feedbacks in ecosystems, interpretation of the computational results.

MSC: 68R10

The development of truly actual computational models in ecology requires attention to key aspects of the interaction among a very large number of other background factors. This paper presents forming of the graph model to analyze of intervention scenarios in the functioning of ecosystems using a pulsed process that starts from the special control vertices. The structural graph includes a complex of biotic and anthropogenic factors affecting on the stability of the replenishment of sturgeon stocks in the Caspian Sea. Orientation of pulse propagation represents causal nature of mutual influence, which manifests itself under change of state of one of the components of the ecosystem. We studied the contours of feedbacks, which were not earlier taken into account in coordination of fisheries forecasts and were reflected in the rapid depletion of the biological resources. It was revealed a contour of chain of factors that weaken the effectiveness of fish breeding. Such implicit chain leads to an overestimation of reproductive potential. We discuss the boundedness of interpreting the traditional for ichthyology discrete dynamical systems with the possibility of the appearance of chaos scenario applied to the problems of biological resource management as an important reason for the development of an alternative type of population models.

REFERENCES

1. Perevaryukha A.Yu. Transition to robust chaotic mode as a result of single bifurcation in the new model of population dynamic, *Vestn. Udmurt. Univ. Mat. Mekh. Komp'yut. Nauki*, 2010, no. 2, pp. 117–126 (in Russian).
2. Perevaryukha A.Yu. Cyclical fluctuations and step-wise changes in new models of population dynamic, *Vestn. Udmurt. Univ. Mat. Mekh. Komp'yut. Nauki*, 2008, no. 3, pp. 116–125 (in Russian).
3. Khodorevskaya R.P., Ruban G.I., Pavlov D.S. *Povedenie, migratsii, raspredelenie i zapasy osetrovyykh ryb Volgo-Kaspiiskogo basseina* (Behavior, migration, distribution and stocks of Sturgeon of the Volga-Caspian basin), Moscow: KMK, 2007, 242 p.
4. Magzanova D.K. Analysis of data on artificial reproduction of Sturgeon fishes, *Ekologicheskie Systemy i Pribory*, 2011, no. 12, pp. 3–5 (in Russian).
5. Pirogovskii M.I. The impact of sea level rise on the dynamics of the sturgeon in the Northern Caspian, *Rational bases of conducting Sturgeon fishery*, 1981, pp. 197–198 (in Russian).
6. Lepilina I.N., Dvopopol G.F., Konopleva I.V. Evaluation of the effect of water availability on the migration of Sturgeon fishes in the Caspian basin, *Nauchnyi potentsial regionov na sluzhbu modernizatsii*, Astrakhan, 2013, no. 2 (5), pp. 32–39 (in Russian).
7. Sapozhnikov V.V. Changing in the Caspian Sea ecosystem over the past 70 years, *Rybnoe khozyaistvo*, 2007, no. 6, pp. 39–43 (in Russian).
8. Riznichenko G.Yu. *Matematicheskie modeli v biofizike i ekologii* (Mathematical models in biophysics and ecology), Izhevsk, 2003, 183 p.
9. Karpinski M.G. *Ekologiya bentosa Srednego i Yuzhnogo Kaspiya* (The benthos ecology of the Middle and South Caspian), Moscow: VNIRO, 2002, 283 p.
10. Khrustalev E.Yu., Mingaliev K.N. The cognitive models for strategically control in defense-manufacturing complex, *Vooruzhenie i Ekonomika*, 2011, no. 1, pp. 105–120 (in Russian).
11. Kulba V.V., Mironov P.B., Nazaretov V.M. Stability analysis of socio-economic systems with the use of symbolic graphs, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1993, no. 7, pp. 130–137 (in Russian).
12. Roberts F.S. *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nyim, biologicheskim i ekologicheskim zadacham* (Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems), Moscow: Nauka, 1986, 496 p.
13. Panin G.N., Mamedov R.M., Mitrofanov I.V. *Sovremennoe sostoyanie Kaspiiskogo morya* (The current state of the Caspian Sea), Moscow: Nauka, 2005, 355 p.
14. Veshchev P.V., Novikova A.P. Reproduction of Stellate sturgeon it *Asipenser stellatus* in the Lower reaches of the Volga, *Voprosy ikhtiologii*, 1987, vol. 27, no. 5. pp. 801–806 (in Russian).
15. Kokoza A.A. Dubov V.E. About the standard and some other questions of contemporary statement of sturgeon artificial reproduction, *Voprosy rybolovstva*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 121–126 (in Russian).
16. Ricker W.E. Stock and recruitment, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1954, vol. 11, no. 5, pp. 559–623.
17. Shepherd J.G. A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries and construction of sustainable yield curves, *ICES Journal of Marine Science*, 1982, vol. 40, no. 1, pp. 67–75.

Received 24.09.2015

Perevaryukha Andrei Yur'evich, Candidate of Engineering, Senior Researcher, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, ul. 14-ya liniya, 39, St. Petersburg, 199178, Russia.

E-mail: madelf@pisem.net