

# УПРАВЛЕНИЕ В БИОЛОГИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК 519.622

*А.Ю. Переварюха*

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХ ОСОБЫХ СЦЕНАРИЕВ КОЛЛАПСОВ БИОРЕСУРСОВ: ТРЕСКИ КАНАДЫ И ОСЕТРОВЫХ КАСПИЯ\*

### Введение

В приложениях теории управления в экологии стремятся достичь оптимальности, подразумевая максимизацию выгоды от эксплуатации биоресурсов. Организация оптимального промысла предполагает рассмотрение любой водной биосистемы как вполне управляемой системы, для которой можно определить набор управляющих воздействий, переводящих эксплуатируемые популяции в некоторое наиболее выгодное состояние по размерно-возрастным показателям или просто наибольшей продуктивности [1]. В статье рассмотрено моделирование аспектов проявления нелинейных зависимостей в саморегуляции репродуктивного цикла, влекущих принципиальные ограничения прогнозирования динамики развития популяционного процесса и имеющих фундаментальную математическую интерпретацию. В анализируемых модельных сценариях неточности в управлении режимом эксплуатации выражаются не в упущенной выгоде, а в непредвиденном прекращении экономически важного промысла и десятилетиях напрасного ожидания его восстановления, как это произошло в двух описываемых далее разных ситуациях.

### Анализ развития двух ситуаций краха промысла

В истории управляемого рыбного промысла самая большая деградация уникальных рыбных запасов произошла в Каспийском бассейне. На настоящий момент годы межгосударственного моратория не принесли заметных улучшений [2]. В начале XX в. три популяции реликтовых рыб семейства осетровых обеспечили уловы до 40 тыс.т. Уже тогда были подорваны запасы крупного хищника белуги *Acipenser huso* (= *Huso huso Linnaeus*, 1758), самого ценного объекта морского промысла XIX в. с уловами до 14 тыс.т. Общий промысел четырех видов в современных условиях после строительства каскада водохранилищ повторно достиг максимальных значений в 1977–78 гг. прошлого века, около 28 тыс.т., планировались стабильные уловы объемом 30 тыс.т. из расчетов на увеличение производительности рыбоводных заводов [3]. Прогнозы не сбылись. Суммарные уловы после заметного пика постепенно уменьшались, в конце 1980 г. вдруг с незначительным

---

\* Научная работа выполнена в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований RFBR № 15–07–01230.  
© А.Ю. ПЕРЕВАРЮХА, 2017

интервалом времени обнаружилось стремительное сокращение двух самых значимых видов (рис. 1, динамика уловов после максимума: 1 — осетр (объединено *Acipenser gueldenstaedtii* Brandt, 1833 + *Acipenser persicus* Borodin, 1897), 2 — севрюга *Acipenser stellatus* Pallas, 1771).

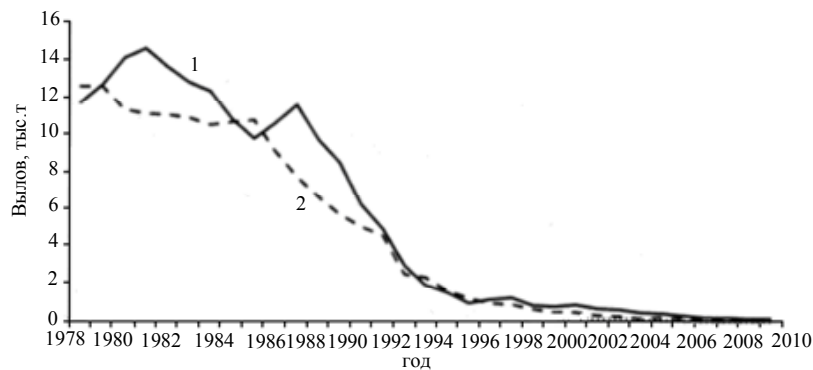


Рис. 1

Уловы осетра после прохождения своего пика в 1981 г. при сохраняющемся режиме промысла через 7 лет вновь показали оптимистичную тенденцию, но за этим сразу последовало резкое сокращение. Расчеты на восполнение запасов при организации масштабного искусственного выпуска молоди с ожидаемым промысловым возвратом 3 % не оправдались при благоприятных для нагула рыб условиях подъема уровня и опреснения Каспийского моря. Уловы севрюги неуклонно уменьшались с 1986 г., асимптотически стремясь к минимальному отличному от нуля равновесию, которое в действительности в 1992 г. оказалось неустойчивым пороговым значением для состояния запаса, в результате перешедшего к фазе деградации. За 10 лет к 1997 году численность нерестового стада севрюги сократилась в семь раз [4]. Только с 2005 г. в Волго-Каспийском регионе был прекращен официальный «коммерческий» промысел. С 2010 г. все осетровые Каспия внесены в Красную книгу.

Из сравнительных сведений об экологии осетра и севрюги график падения уловов выглядит достаточно неожиданно. Осетр более экологически пластичный вид и менее уязвим для орудий лова. В выпуске заводской молоди преобладал осетр. Волжская севрюга теплолюбива, зависима от условий позднего нереста [5]. Пороговый эффект в снижении эффективности воспроизводства для осетра выражен отчетливо резко. Воспроизводству севрюги способствует лучшая сохранность эволюционно оптимальных нерестилищ, которые исторически расположены в нижнем течении Волги и не пострадали при строительстве водохранилищ.

С непреодолимыми последствиями перелома при, казалось бы, регулируемом промысле сталкиваются страны с научной практикой прогнозирования, налаженного мониторинга и учета биоресурсов. В 1992 г. произошел самый обсуждаемый в литературе и масштабный по последствиям коллапс «Northern Cod collapse» из состояния оцененного как благополучное: прекращен промысел атлантической трески Северо-Западного побережья Атлантики (рис. 2). Тресковый кризис стал социальной проблемой региона. Рыболовецкие ресурсы удалось частично перенаправить на добычу донных беспозвоночных, размножившихся из-за утраты доминирующего хищника.

Промысел трески *Gadus morhua* Linnaeus, 1758 показал максимальные результаты на рубеже 1970-х гг., но далее не удержался на среднесреднегодном уровне. Как видим, неотвратимое истощение последовало не сразу вслед за годами рекордных уловов. Первичное падение приостановилось. Наблюдалось десятилетие (1981–90 гг.) не столь обильных, но приемлемо колеблющихся объемов

вылова и оптимистичных ожиданий по его наращиванию перед крахом промысла. В анализе Р. Майерса [6] развитие событий объяснялось тем, что естественный тренд снижения численности трески мог совпасть с увеличением реального процента промысловой смертности из-за системной переоценки ее запасов. В литературе мы нашли аналогичные ситуации. Например, с мониторингом запасов минтая Охотского моря [7], где выявлены ситуации, в которых применяемые методы расчета завышают ожидаемое пополнение от переоцененного нерестового запаса, когда в реальности происходит его существенное убывание.

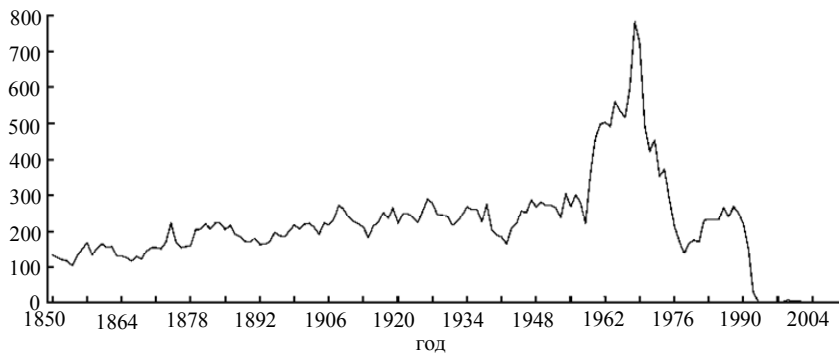


Рис. 2

Опыт кризиса 1992 г. не улучшил методологию организации предосторожного промысла, не лишаящую популяцию возможности быстрого восстановления. Последние данные [8] свидетельствуют о признаках сходного истощения запасов южной популяции трески в заливе Мэн, где при определении промысловой нагрузки не учитывались негативные для нее изменения Гольфстрима. Численность трески залива Мэн продвигалась к деградации, испытывая значительные по амплитуде флуктуации. Для обоих случаев коллапса важный методический аспект: специалисты не смогли представить реалистичный прогноз о темпах регенерации запасов. Введенный немедленно в Ньюфаундленде изначально двухлетний мораторий выразился в неожиданных для ихтиологов 25-летних вынужденных и угнетающих экономику севера Канады промысловых каникулах. Проблема исчерпания трески не сводится к своевременному выявлению признаков. Есть основания полагать, что за стремительным развитием событий скрыты нетривиальные особенности репродуктивного процесса. Популяции крупных ценных рыб после перелова восстанавливаются не так быстро, как следовало ожидать из полученной при благополучном состоянии популяции статистики смены облавливаемых поколений.

### Принципы моделирования воспроизводства

Известно достаточно много моделей с включением внутренних механизмов регуляции численности популяций. Из логистического уравнения Ферхюльста строилась теория максимизации устойчивого вылова (Maximum Sustainable Yield — MSY), которая уже достаточно давно подвергается осуждению со стороны экологов из-за последствий ее оптимизма, и очередную критику П. Ларкин назвал «эпифазией» [9]. Модели MSY требуют константного параметра репродуктивного потенциала, оценив который, легко управлять промыслом, не подвергая риску запасы, если точно выдерживать необходимое превышение над критической численностью, переводя учетные запасы в состояние  $S_{\max}$  наиболее интенсивного приращения.

В настоящее время развиваются способы имитационного моделирования популяций на основе мультиагентного метода, алгоритмических сетей [10], клеточных автоматов и искусственного интеллекта. По нашему мнению, аппарат дина-

мических систем далеко не исчерпал описательные возможности. Мы можем предложить средства для принципиального событийного расширения классического непрерывного представления моделей.

В основе моделей эксплуатируемых популяций рыб должна содержаться нетривиальная формализация баланса воспроизводства и смертности от различных факторов. Естественная убыль на ранних этапах жизни рыб очень велика, и все ее изменения сказываются на благополучии популяций крупных хищников, это не учитывают другие формальные методы расчетов в теории рыболовства, как когортный подход и метод (Virtual population analysis — VPA).

В математической экологии возникло направление исследований, объясняющее закономерности изменений эффективности воспроизводства. Построение «Кривых воспроизводства» (recruits / spawners curve) использовалось при подборе оптимального промыслового режима для особенностей нереста крупных рыб. Определение вида эмпирической зависимости  $R = f(S)$  на основе данных наблюдений должно способствовать обоснованию прогнозов по темпам восполнения промыслового запаса  $S$ . Обзор способов построения математических моделей в теории формирования пополнения запасов проведен в [11] и для подобных задач предложено использовать дифференциальные уравнения убыли численности на времени интервала уязвимости  $T$ . Идея моделирования воспроизводства состояла в описании лимитирующих факторов  $v(S)$ , регулирующих величину пополнения  $R$  при повышении плотности рыб на нерестилищах с характеристикой фертильности  $a > 1$ :  $R = aS/v(S)$ . W.E. Рикер [31] предложил экспоненциальную  $v(S) = e^{bS}$ , где  $b < 1$  — показатель влияния лимитирующих факторов. Дж. Шеферд обобщил зависимость  $v(S) = 1 + (S/K)^b$ , учтя запас  $K$ , соответствующий необременительной емкости среды [12].

Без установления критериев допустимых метаморфоз поведения моделей популяций сложно обосновать выводы. Анализ моделей проводится в виде функциональных итераций  $R_{n+1} = \psi(R_n)$ . В [11] не упомянуто, что при изменении параметра нелинейных кривых,  $a$  Рикера или  $b$  Шеферда происходят бифуркации образования циклов увеличивающегося периода  $2^i$  с переходом к хаотическому режиму и аттрактору  $A$  в форме нигде не плотного множества. Данные функции удовлетворяют критериям теоремы Сингера [13]. Из критериев следует, что количество точек перегиба кривой более значимо для динамических характеристик, чем положение ее асимптоты. Реализация каскада бифуркаций М. Фейгенбаума [14] при изменении одного параметра не достоинство и не недостаток моделей. Аналогично фундаментальное математическое свойство сосуществования циклов теоремы украинского математика А. Шарковского [15], и им обладают итерации ряда трансцендентных функций, не получавшие биологического толкования некоторых трансцендентных функций.

Качественные изменения поведения траектории двух моделей будут взаимно противоречивы при их интерпретации в промысловой ихтиологии. Введение доли промыслового изъятия  $H$  в итерации функции  $R = aS \exp(-bS)$  Рикера  $R_{n+1} = \psi((1-H)R_n)$  стабилизирует флуктуации. Наоборот, учет искусственного выпуска молоди рыб  $R_{n+1} = \psi(R_n) + GR_n$  хаотизирует траекторию. У простых моделей могут быть сложные динамические режимы и неожиданные метаморфозы, три вида кризисов — внутренние перестроения аттракторов и границ их областей. Независимо от способа учета лимитирующих факторов и плотности особей классические модели пополнения в ситуации превышения критического уровня изъятия покажут монотонную убыль уловов после прохождения максимум-

ма, различаясь выраженностью пика промысла. На графике функций трех популярных моделей пополнения (рис. 3) сверху вниз показаны кривые моделей Бифертна–Холта, Шеферда, Рикера в порядке убывания их оптимистичности — максимального превышения положения кривой над биссектрисой координатного угла.

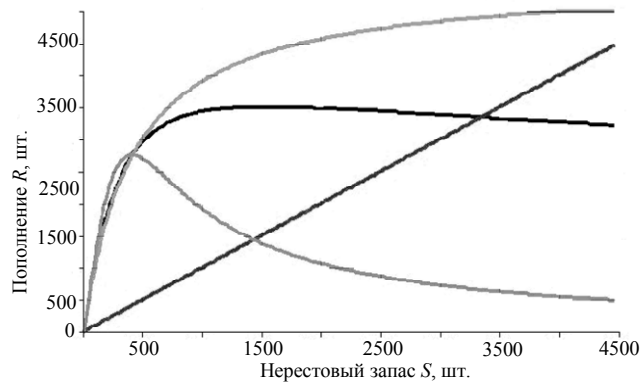


Рис. 3

Методы определения характеристик зависимости запас–пополнение по временным рядам предлагались, но если популяция представляется как динамическая система  $\lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(R_0; a) = A$  под действием оператора эволюции  $\psi$ , то увидеть форму графика  $\psi$  по данным о нерестовавших производителях и скатывающихся к местам нагула сеголеток сможем в случае продолжительного использования закритического значения доли промыслового изъятия  $H$ . Иначе будем делать выводы о метаморфозах притягивающего множества  $A$ , количестве и расположении неустойчивых граничных стационарных состояний. Только для всего разнообразия подобных итераций математическая топология предполагает три типа аттракторов: цикл, канторовское множество, объединение конечного числа несвязных интервалов [16].

### Непрерывно-событийная модель пополнения

При систематическом перелове, как следует из рассмотренных примеров, реализуется не просто вялотекущий и монотонный процесс деградации, а неожиданный переход в состояние с минимальной за историю наблюдений численностью, если даже исходно запас состоял из многих поколений. Будем разрабатывать модель пополнения с использованием организации непрерывно-событийной вычислительной структуры для получения качественно других свойств динамики итераций. Учтем, что кривая воспроизводства при сильном саморегулировании совсем не обязательно должна описываться куполообразной унимодальной с единственным экстремумом функцией, что отметил В. Рикер [17]. Дополнительно примем, что зависимость способна масштабироваться вдоль оси ординат, немного сжимаясь под действием внешних не включенных напрямую в модель факторов.

У рыб выражена стадийность развития в раннем онтогенезе: предличинки на питании из желточного мешка, активно питающиеся личинки, свободно мигрирующие к местам нагула молодь. Выделяют около полусотни коротких стадий формирования органов. Факторы смертности должны различаться по стадиям, при этом момент достижения перехода личинка→молодь как дискретного события может регулироваться вспомогательным показателем успеха развития  $w(t)$ . На старших стадиях успешное развитие должно сокращать действие квадратичной смертности  $\alpha$ , поэтому замедление развития становится значимым фактором. Опишем убыль начальной численности  $N(0)$  от момента вылупления из икринок

дифференциальным уравнением на составном промежутке непрерывного времени  $t \in [0 \dots \tau, \tau_1 \dots T]$ , разбитым на кадры двумя событиями. Учтем изменения действия факторов смертности по ходу прохождения стадий развития особей. Примем, что смертность молоди от реакции хищников обусловлена обилием доступных для нападений жертв на второй стадии:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha N(t) + U[S]\beta) N(t), & t < \tau, \\ -(\alpha_1 N(\tau) / w(\tau) + \beta) N(t), & w(t) < w_d(\tau_1), \\ -\beta_1 N(\tau_1) N(t), & \tau_1 < t < T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент зависящей от плотности компенсационной смертности;  $\beta$  — коэффициент нейтральной убыли. От абстрактного «репродуктивного потенциала» разумно перейти к естественному вычисляемому по подсчетам икринок показателю средней плодовитости  $\lambda$ , в нескольких аспектах отражающему благополучие популяции. Учет селективного промысла в отношении самок можно проводить при корректировке  $\lambda$ . Нехватка питания при нерестовых миграциях приводит к резорбции икры, уменьшая  $\lambda$ . Начальные условия для уравнения (1) с дважды переопределяемой правой частью:  $N(0) = \lambda S$ ,  $\tau$  — длительность первой стадии с эндогенным питанием для рыб, обычно постоянна,  $\tau_1$  зависима от  $w_d$  — условного уровня развития, при достижении которого ослабляется действие факторов смертности, что интерпретируется с точки зрения экологии обитания молоди при начале самостоятельной миграции. Вспомогательное уравнение для темпов развития  $w'(t) = m / (N^{2/3}(t) + \zeta)$ .

Эффект Allee или стратегия «агрегированной группы», когда для успешного воспроизводства требуется наличие некоторого сообщества особей, проявляется в морских экосистемах по результатам наблюдений [18]. При малой плотности рыб уменьшается вероятность образования нерестовых пар в акватории, что сильно сокращает продуктивность нереста, особенно при длительной миграции анадромных рыб. Форму правой части при  $t < \tau$  дополним триггерным функционалом  $U(S) = 1 + \exp(-cS^2)$  с областью значений  $E(U) = [2, 1)$ , где  $c < 1$  определяет степень выраженности фактора плотной группы. Функционал быстро стремится к  $\lim_{S \rightarrow S^*} U(S) = 1$  и не влияет на расчеты при оптимальном  $S$ . Интервал ювенальной уязвимости  $[0, T]$  разделен на тройку кадров модельного времени. При смене кадров специальной функцией вычислительного окружения проводится реинициализация начальных условий для следующей формы правой части, так реализуется структура переходов между состояниями модели в формализме гибридного автомата [19].

В инструментальной среде алгоритмически формируется непрерывно-событийная переопределяемая вычислительная структура, состоящая из трех форм правой части уравнения убыли и условий завершения их активности. Условия срабатывают для каждой формы правой части в выделенный момент модельного времени. Последовательность численных решений задач Коши для допустимых значений  $S \in Z^+$  определит итоговую форму композиционной трехстадийной зависимости (рис. 4).

Из (1) получена зависимость, где диапазоны превышения  $\psi(S) > S$  чередуются с состояниями, в которых имеющийся нерестовый запас восполняется неполностью. Минимум  $N(T)$  соответствует локальному максимуму промежуточного  $N(\tau)$ . Волнообразные формы зависимости описаны по реальным наблюдениям для лососевых рыб [20] на рис. 5 для *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792.

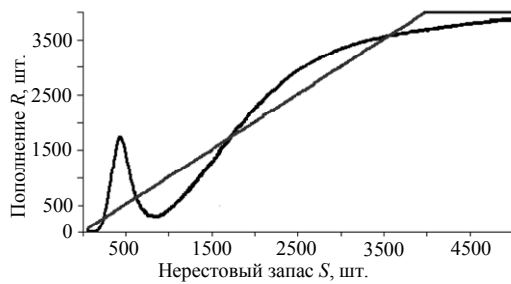


Рис. 4

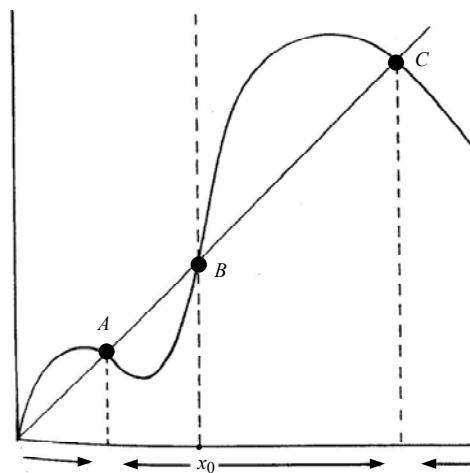


Рис. 5

В предложенной кривой равновесие при низкой численности горбуши столь же устойчиво, как и при высокой, но такое предположение вряд ли допустимо, так как при сократившейся численности возрастает удельное влияние непостоянства случайных факторов. Исходя из кривой рис. 5, нельзя объяснить самостоятельное преодоление популяцией граничного равновесия  $B \rightarrow C$ , объяснение есть только для  $C \rightarrow B$  при перелове. Обосновано появление промежуточных экстремумов кривой избирательной реакцией хищников в отношении наиболее массовой и доступной добычи. В частности предпочитаемой добычей становится молодь своего вида, что характерно для трески, поэтому наблюдаемый иногда промысловиками переизбыток трески, что отмечено недавно в [21], сопровождается переходом к каннибализму и будет устранен из-за усиления внутривидового трофического взаимодействия.

Новая модель развития ситуации перелова будет складываться из двух фаз. Совершенствование гипотетической кривой воспроизводства горбуши в Британской Колумбии дало четыре нетривиальные стационарные точки  $\psi(R_i^*) = R_i^*$ . Устойчиво только наибольшее из равновесий  $R_4^*$ , как и тривиальное  $\psi(0) = 0$ . Три первых пересечения с биссектрисой  $R_1^* < R_2^* < R_3^*$ , судя по превышению наклона касательных  $\pi/4$  в точках, оказываются неустойчивыми, в вычислительных моделях для установления устойчивости точек используется вычисление  $f(f(x))$ .

Так как в окрестности максимума модельная кривая немного превосходит треть равновесие  $\psi(R_{\max} \pm \varepsilon) > R_3^*$ , и если исходное состояние популяции  $R_0$  соответствует диапазону  $R_0 \in (R_1^*, R_3^*) \cap \{\psi^{-n}(R_2^*)\}$ , то через ряд аperiodических флуктуаций достигается состояние высокой стабильной численности  $R_4^*$ . Гипотетический вариант устойчивости  $R_1^*$  или  $R_2^*$  не может объяснить самостоятельного восстановления популяций после некритического перелова. Аperiodическое движение чувствительно к выбору начального значения  $R_0$ , это означает принципиальную невозможность делать прогнозы при подобном характере популяционной динамики. Фундаментальное свойство появления хаотичности, пусть и в транзитивном варианте [22], означает уход за горизонт предсказуемости, как бы точно не настраивались параметры модели, вряд ли мы сможем узнать исходное состояние нерестового запаса с точностью до каждой самки. С другой стороны, в малочисленном диапазоне популяция более подвержена влиянию нестабильности среды, и переходная «транзитивная» хаотизация более достоверно имитирует природную неопределенность ситуации [23].

Наблюдаемый в вычислительных экспериментах аperiodический режим вызван локально-несвязным характером области притяжения аттрактора  $R_4^*$ , так как область не включает множество не притягивающихся к аттрактору прообразов двух неустойчивых точек:  $\{\psi^{-n}(R_2^*)\} \cup \{\psi^{-n}(R_3^*)\}$ . Точка  $R_1^*$  — неустойчивое критическое равновесие, если  $R_0 < R_1^* - \varepsilon$ , то реализуется необратимая деградация  $\psi^n(R_0) \rightarrow 0$ . В случае негативного внешнего воздействия на выживаемость изменится конфигурация стационарных точек у масштабируемой по оси ординат кривой. Для модели возможна обратная касательная бифуркация: при слиянии  $R_3^*, R_4^*$  с исчезновением устойчивой стационарной точки, при сохранении оставшихся  $R_1^*, R_2^*$ . Изменения означают пребывание популяции при существенно меньшей среднесуточной численности в режиме флуктуаций значительной амплитуды, которому отвечает интервальный аттрактор III-го топологического типа по Гукейнхэймеру. Продолжительность колебаний зависит от положения минимума кривой, если происходит сдвиг  $\psi(R_{\min}) < R_1^*$ , то реализуются граничный кризис «boundary crisis» интервального аттрактора [24].

Интересна динамика в вычислительных экспериментах для полученной зависимости при резком повышении доли промыслового изъятия, которое проводится при уже благополучном состоянии запаса  $\bar{\psi}(R_n) \approx R_4^*$ . Задача регулирования улова — не позволять сбрасывать запас в режим неблагоприятных для промысла и непредсказуемых колебаний при редукции равновесия возмущенной системы  $\bar{\psi}$  выше  $R_3^*$ . В негативном случае короткий мораторий может стать действенным решением по возвращению на уровень нестабильных уловов. В 1967 г. случилось резкое падение уловов сельди Британской Колумбии. Тогда был введен четырехлетний мораторий, и промысел удалось восстановить, ограничив  $H \leq 0,2$ , но оценка реальной убыли оказалась сложна, так как ситуация с переловом сельди повторилась в худшем варианте [25] и восстановление после очередной депрессии происходит дольше.

Пусть популяция после долгой нестабильности восстановилась до своего оптимума, уловы плавно пошли вверх, после чего принимается решение об интенсификации режима промысла: сценарий чрезмерного оптимизма. Уловы  $Y = HRn$  сначала демонстрируют исторические максимумы, но затем довольно очевидно снижаются, успешно проходят локальный минимум, не попадая сразу в окрестность критического состояния. Р. Майерс констатировал, что методика оценки запасов «недостаточно чувствительна» чтобы показать начавшееся сокращение. Промысловые прогнозы гарантированно учли в расчетах высокую эффективность воспроизводства в предыдущие годы и что уловы после спада немного возвращают былые объемы. Такое восстановление обманчиво, а его продолжительность связана со случайными факторами (рис. 6).

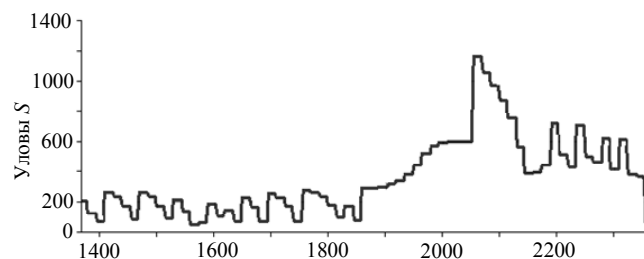


Рис. 6



Численность запаса после интенсификации промысла возвращается в аperiodический режим флуктуаций при малой численности со сжимающейся амплитудой колебаний, но не остается в нем в случае запоздалого установления прежней рациональной доли изъятия. После кратких колебаний следует второе, уже критическое падение уловов (рис. 7).

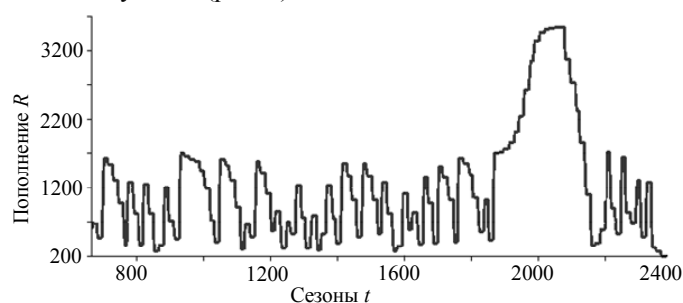


Рис. 7

### Обоснование свойств новой модели

Характер графика с чередованием диапазонов невосполнения запасов объясняется вариативной реакцией хищников, проявлением избирательности в отношении наиболее массовой и доступной жертвы. Объяснение приемлемо для лососевых и особенно трески, где селективность хищничества может быть связана с выбором собственной молоди как объекта охоты [26], но вряд ли подходит для типа питания осетровых рыб. Нет сведений, что преимущественно бентосоядным волжскому осетру и севрюге свойственен каннибализм. Среди осетровых каннибалом считается крупный хищник *Acipenser dauricus* (=Huso dauricus Georgi, 1775) — амурская калуга. Мы можем предложить другое объяснение возникновению кривой воспроизводства с локальным экстремумом минимумом. Для осетровых волнообразный характер скорее является проявлением статистического эффекта при агрегированном характере набора данных. Нередко в результате суперпозиции двух независимых величин с нормальным распределением для наблюдателя возникает странное бимодальное с двумя максимумами по краям. У анадромных видов выделяют две репродуктивные сезонные расы, что связано с эволюционной адаптацией для лучшего использования ограниченных площадей пригодных нерестилищ. Рыбы озимой расы могли осваивать нерестилища в верховьях рек, созревая по ходу долгой миграции [27]. После зарегулирования Волги озимые образовывали плотные скопления в районе плотины, что и побудило увеличить долю их изъятия [28] свыше 0,6. Яровые используют ближайшие к дельте нерестилища. Фактором частичной репродуктивной изоляции групп служит температурный оптимум нереста.

Имеющаяся промысловая статистика и данные учета молоди не различали принадлежность к группам и даже к двум видам осетров Каспия. Объективно характеристики эффективности воспроизводства двух рас должны различаться. Самки озимых обладают несколько большей плодовитостью и пресноводный период жизни их молоди более длительный. Влияние эффекта Алле должно выражаться в разной степени. Если предполагается наиболее вероятной унимодальная зависимость, то отличие как минимум двух параметров приводит к различным положениям максимума и точек перегиба [29]. При композиции двух наборов данных получена бимодальная зависимость с разновеликими максимумами у виртуальной кривой воспроизводства, так как распределение общего запаса на две группы неравномерно. У осетра озимая группа исторически была больше, у севрюги значительно преобладала яровая, потому ее первый максимум менее выра-

жен. Промысел не может одинаково интенсивно облавливать все репродуктивные группы из-за растянутого во времени захода осетровых в реки. Менее уязвимыми окажутся неосновные группы, заходящие на нерест существенно позже или раньше основных пиков сезонного хода, они получают некоторое эволюционное преимущество, поэтому их вклад в пополнение при существовавшем режиме промысла статически будет неуклонно возрастать.

### **Кризис интервального аттрактора в модели**

Недолгий тренд повышения уловов непосредственно перед коллапсом следует из характера нелинейности модели кривой воспроизводства, связанного с существованием двух уровней численности популяции; достаточно превышения допустимой доли изъятия на 0,02 для реализации такого сценария падения. При низкой численности популяция испытывает резкие флуктуации, но существует перспектива восстановления обилия при ослаблении промысла. Эффект граничного кризиса интервального аттрактора описывает явление неожиданного коллапса больших запасов трески, происходящего в два этапа. При граничном кризисе аттрактор соприкасается с границей своей области притяжения, теряет свойство инвариантности  $\bar{\psi}(A) \in A$ , и на его месте появляется непритягивающее хаотическое множество, где ограниченное время пребывает траектория и далее  $\bar{\psi}(R) \rightarrow 0$ . После кризиса, вызванного сдвигом минимума, единственное инвариантное замкнутое притягивающее множество — точка начала координат, так в две фазы реализуется сценарий деградации.

Наличие критического значения численности актуально не для всех видов рыб [30]. Неприхотливый мелкий хищник дальневосточный ротан *Perccottus glenii* Dybowski, 1877 заселяет водоемы при попадании единичных особей. Согласно концепции репродуктивной изменчивости Е. Малкина способность к быстрейшему восстановлению связана с быстрым циклом полового созревания [31]. У осетровых рыб Каспия время созревания растянуто и часто неравномерно по поколению. Многие рыбы заходят в реку с совсем незрелыми половыми железами. Созревание широко распространенного морского вида трески зависит от района обитания, у северных популяций значительно медленнее, и у тресковых рыб, как и у осетровых, отмечалась массовая резорбция ооцитов [32]. Концепция не исключает проблем с переловом короткоцикловых рыб, регулярно наблюдались депрессии популяций мойвы, но они не переходили в длительную деградацию и за относительно короткий срок при моратории на промысел в Баренцевом море запасы восстанавливались.

### **Алгоритм сценария коллапса осетровых**

В случае осетровых рыб многие авторы указывают на огромное неучтенное изъятие, которое по их расчетам должно намного превышать официальные объемы вылова, что сложно представить по технологическим причинам (переработка, хранение, транспортировка), но иначе трудно объяснить, почему не оправдывались их прогнозы. В [33] говорится о 12-кратном превышении нелегального вылова. Практически ощущаемое повышение реальной доли промысловой смертности может быть следствием неточной оценки запаса от метода контрольных тралений раз в несколько лет. В физике известно о кумулятивном эффекте накопления малых ошибок.

Допустим, мы оценили численность в десять рыб и оптимальной неистощительной долей изъятия считаем 0,4 (как рекомендовано в [34] для экономически прибыльного промысла трески), тогда как 0,5 предельно разумная, при немного большей доле убыль может не возмещаться нерестом при случайных капризах

гидрологических условий. В действительности доступный промысловый запас идентичен нерестовому и составлял только девять рыб, что вполне допустимая ошибка при обработке данных траловых съемок. Используемый в расчетах коэффициент уловистости, какая часть особей из зоны облова способна избежать траля, — сложно оцениваемый параметр в разнородной акватории. Пусть дополнительно кто-то своевольно выловил одну рыбу. Тогда хотя ошибка учета и осталась в рамках допустимой и для наблюдателя перелов пока не считается критическим, но в реальности осуществлено 0,55 изъятия, что будет критической величиной промысловой смертности. Можно сказать, что однократное завышение на 15 % еще не самое опасное по последствиям для промысла, если есть резерв не достигших промысловых размеров поколений, но будет ли этот перелов учтен в прогнозах? Вместо ожидаемого результата воспроизводства шести рыб мы получим спустя необходимый для созревания рыб срок пополнение только от четырех. Ошибка на треть — уже значительная погрешность и, безусловно, скажется на благополучии популяции, в успехе воспроизводства которой теперь возрастает роль некоторых случайных условий. Только в самом удачном случае гендерное распределение допущенных к нересту особей окажется равномерно, но для северяги, как отмечал П.В. Вещев [35], иногда наблюдалось его нарушение до 6:4, как в сторону преобладания самцов, так и самок, и в случае такого соотношения вероятность деградации малочисленного запаса будет стремиться к единице.

### Заключение

В результате анализа этапов развития двух ситуаций длительной деградации ценных рыбных ресурсов с применением новых моделей формирования пополнения в качестве антикризисного варианта управления промыслом можно предложить — отказаться от определения общих допустимых уловов или биологически допустимых лимитов как основного способа регулирования. В Волго-Каспийском бассейне в 2000 г. неоднократно возникала коллизия: квота рассчитана, а рыбы нет, когда при всех усилиях промысел мог освоить около половины выделенных квот изъятия для некоторых карповых и окуневых видов рыб и особенно сельдей. Целесообразнее ограничивать технические характеристики рыболовных средств и судов и время их эксплуатации. При установленном оптимальном сокращении уловов по сравнению с предшествующими сезонами своевременно должен вводиться мораторий, не дожидаясь момента стремительного истощения биоресурсов. У промыслового бизнеса в условиях постсоветской экономики не должно быть мотивов занижать свой улов, а у экспертов завышать реальную численность запасов.

*А.Ю. Переварюха*

### ПОРІВНЯЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОХ ОСОБЛИВИХ СЦЕНАРІЄВ КОЛАПСІВ БІОРЕСУРСІВ: ТРИСКИ КАНАДИ ТА ОСЕТРОВИХ КАСПІЮ

Моделюються аспекти двох ситуацій швидкого виснаження численних раніше популяцій риб на початку 1990-х років: атлантичної тріски біля узбережжя Канади і осетрових риб Каспійського моря. З моменту колапсу обидві популяції, що піддавалися перелову, понад чверть століття всупереч очікуванням не відновлюють колишню чисельність, незважаючи на обмежувальні та рибоводні заходи. В динаміці популяцій з різною екологією нересту підкреслено ідентичні особливості, що викликають неочікувано різке скорочення ефективності ро-

змноження. Розроблено обчислювальну модель поповнення запасів на основі формалізації різних чинників виживання молоді в ранньому онтогенезі. Запропоновано пояснення появи складної форми залежності для морського активно-го хижака-канібала тріски і розмножуваних на Волзі осетрових риб різне. В ітераційній уяві модель ефективності відтворення визначить два різноякісних режими динаміки популяцій. Імітується сценарій стратегії експлуатації, коли після максимуму уловів різко редукується основна рівновага для середовища стану популяції і виникає псевдостохастичний режим коливань. При продовженні промислу альтернативна обмежена хаотично більшість теж втрачає асимптотичну стійкість, що пояснює раптовий перехід до деградації запасів через фазу релаксаційних флуктуацій, які спостерігалися при промислі тріски Ньюфаундленду до мораторію 1992 р.

*A.Yu. Perevaryukha*

## COMPARATIVE MODELING OF TWO ESPECIAL SCENARIOS OF BIORESOURCES COLLAPSES: CANADIAN ATLANTIC COD AND CASPIAN SEA STURGEON

Article discusses the modeling of the aspects of two situations of rapid depletion of numerous in the past fish populations in the early 1990s: Atlantic cod near the coast of Canada and sturgeons in the Caspian Sea. Since the collapse, both overfished populations for more than a quarter of a century, contrary to expectations, have not restored the existing pre-collapse fishing stock, despite restrictive measures and fish-breeding measures of salvation. In the dynamics of two populations with different spawning ecology, we underlined the identical features leading to a sudden sharp for fishery experts decrease in the efficiency of reproduction of fish. A computational model of stock replenishment based on the formalization of various factors of juvenile survival in early ontogeny was developed. The explanation offered in the article for the appearance of a very complex form of dependence for the marine active predator-cannibal cod *Gadus morhua* and the sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* breeding in the Volga River is different. In the iterative representation, this reproductive efficiency model will determine two different-quality regimes in the dynamics of populations. It was possible to simulate a scenario for an operational strategy, when, after a maximum of catches, the basic equilibrium for the environment of a population is sharply reduced and a pseudostochastic regime of oscillations arises. In the case of continued fishing, the alternative limited chaotic set also loses its asymptotic stability, which will describe a sudden transition to the degradation of fish stocks through the phase of relaxation fluctuations that were observed in the Newfoundland cod fishery immediately prior to the moratorium established in 1992.

1. *Pauly D.* Fishing down marine food webs // *Science*. — 1998. — **279**. — P. 860–863.
2. *Рубан Г.И., Ходоревская Р.П., Шатуновский М.И.* Динамика популяций белуги, русского осетра и севрюги в условиях запрета их коммерческого лова в Волго-Каспийском бассейне // *Вопросы рыболовства*. — 2015. — № 3. — С. 269–277.
3. *Мильштейн В.В.* Осетроводство. — М. : Пищевая промышленность, 1982. — 150 с.
4. *Вещев П.В.* Эколого-биологические основы сохранения и восстановления запасов севрюги в современных условиях Волго-Каспия: Автореф. дис. ... доктора биологических наук. — Астрахань : Астраханский государственный университет. — 2003. — 76 с.
5. *Гутенева Г.И., Фомин С.С.* Влияние волжского стока на естественное воспроизводство осетровых рыб // *Рыбное хозяйство*. — 2015. — № 3. — С. 103–105.
6. *Myers R.A.* Why do fish stocks collapse? The example of cod in Atlantic Canada // *Ecological Applications*. — 1997. — 7. — P. 91–106.
7. *Зверькова Л.М.* К вопросу оценки запаса североохотоморского минтая // *Вопросы рыболовства*. — 2015. — № 4. — С. 419–427.
8. *Pershing A.J.* Slow adaptation in the face of rapid warming leads to collapse of the Gulf of Maine cod fishery // *Science*. — 2015. — **350**, N 6262. — P. 809–812.
9. *Larkin P.A.* An epitaph for the concept of maximum sustained yield // *Transactions of the American Fisheries Society*. — 1977. — **106**, N 1. — P. 1–11.

10. *Kazanskij A.B., Mikhailov V.V.* An ecosystem model for rearing fish in lakes // *Polskie Archiwum Hydrobiologii*. — 1992. — **39**. — P. 751–760.
11. *Kriksunov E.A.* Theoty of recruitment and interpretation of fish population dynamics // *Journal of Ichthyology*. — 1995. — **35**, N 7. — P. 10–41.
12. *Shepherd J.G.* A family of general production models for exploited populations // *Math. Biosciences*. — 1982. — **59**. — P. 77–93.
13. *Singer D.* Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval // *SIAM Journal of Applied Math.* — 1978. — **35**. — P. 260–268.
14. *Feigenbaum M.J.* Universal behavior in nonlinear systems // *Physica D*. — 1983. — **7**, N 1. — P. 16–39.
15. *Sharkovskii A.N.* Coexistence cycles of continuous map of the line into itself // *International Journal of Bifurcation & Chaos*. — 1995. — **5**. — P. 1263–1273.
16. *Guckenheimer J.* Sensitive dependence on initial conditions for one dimensional maps // *Communications in Mathematical Physics*. — 1979. — **70**. — P. 133–160.
17. *Ricker W.E.* Stock and recruitment // *J. Fisheries research board of Canada*. — 1954. — **11**. — P. 559–623.
18. *Gascoigne J.* Allee effects in marine systems // *Marine Ecology Progress Series*. — 2004. — **269**. — P. 49–59.
19. *Dynamical properties of hybrid automata* // *IEEE Transactions on Automatic Control / J. Lygeros, K.H. Johansson, S.N. Simic, J. Zhang, S.S. Sastry*. — 2003. — N 1. — P. 2–17.
20. *Peterman R.M.* A simple mechanism that causes collapsing stability regions in exploited salmonid populations // *J. Fisheries research board of Canada*. — 1977. — **34**. — P. 1130–1142.
21. *Борисов В.М.* В Баренцевом море переизбыток трески // *Рыбное хозяйство*. — 2012. — № 4. — С. 21–23.
22. *Thunberg H.* Periodicity versus chaos in one-dimensional dynamics // *SIAM Review*. — 2001. — **43**. — P. 3–30.
23. *Perevaryukha A.Y.* Hybrid model of bioresources dynamics: equilibrium, cycle, and transitional chaos // *Automatic Control and Computer Sciences*. — 2011. — N 4. — P. 223–232.
24. *Grebogi C.* Chaotic attractors in crisis // *Physical Review Letters*. — 1982. — **48**. — P. 1507–1510.
25. *Schweigert J.F.* A review of factors limiting recovery of Pacific herring stocks in Canada // *ICES Journal of Marine Science*. — 2010. — **67**, N 9. — P. 1903–1913.
26. *Попова О.А.* Некоторые данные по питанию трески в Ньюфаундлендском районе Северо-Западной Атлантики // *Советские рыбохозяйственные исследования в северо-западной части Атлантического океана*. — М.: Изд-во ВНИРО, 1962. — С. 235–253.
27. *Khodorevskaya R.P., Ruban G.I.* Caspian sea sturgeon fishery: a historic overview // *Journal of Applied Ichthyology*. — 2011. — **27**, N 2. — P. 199–208.
28. *Сливка А.П.* Биологические основы изменения режима промысла осетровых (Acipenseridae) в дельте Волги // *Вопросы ихтиологии*. — 1982. — **22**, № 5. — С. 738–745.
29. *Дубровская В.А., Переварюха А.Ю., Соловьева И.В.* Кризис технологии моделирования популяционных процессов и варианты ее корректировки // *Технічні науки та технології*. — 2016. — № 1. — С. 248–259.
30. *Jeremy B.C.* Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems // *Science*. — 2001. — **293**, N 5530. — P. 629–637.
31. *Малкин Е.М.* Эволюционные аспекты репродуктивной изменчивости популяций рыб // *Вопросы ихтиологии*. — 1991. — **31**, № 4. — С. 606–614.
32. *Mukhin V.A., Filina E.A., Serba Yu.A., Mukhina I.N.* Physiological-biochemical aspects of omission of the spawning period in the Barents sea cod *Gadus morhua* // *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. — 2006. — **42**, N 3. — P. 292–298.
33. *Зыкова Г.Ф., Журавлева О.Л., Красиков Е.В.* Оценка неучтенного и браконьерского вылова русского осетра в р. Волге и Каспийском море // *Доклады Междунар. конф. «Осетровые на рубеже XXI века»*. — Астрахань: Изд-во КаспНИРХ. — 2000. — С. 54–56.
34. *Ковалев Ю.А., Клепцова Н.С.* Оценка уровней эксплуатации запаса северо-восточной арктической трески, соответствующих различным целям управления // *Труды ВНИРО*. — 2014. — **151**. — С. 184–191.
35. *Veshchev P.V., Guteneva G.I., Mukhanova R.S.* Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the lower Volga under current conditions // *Russian Journal of Ecology*. — 2012. — **43**, N 2. — P. 142–147.

Получено 12.01.2017