

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 639.215.2

КОЛЛАПС РЫБНЫХ ЗАПАСОВ И ЕГО ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

© 2016 г. А.Ю. Переварюха

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,  
Санкт-Петербург, 199178  
E-mail: temp\_elf@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2016 г.

Негативные для промысла сценарии часто реализуются схожим образом. Рассмотрена ситуация резкого сокращения промысловых запасов крупных рыб (озерного сига и трески), определяемая в современной литературе как «коллапс», отмечен ряд ее особенностей в терминах нелинейной динамики. Вычислительную модель подобного негладкого развития процесса удалось получить из принципов теории формирования пополнения исходя из формализации меняющейся выживаемости поколения, где неявно заданным фактором смертности предполагается каннибализм. Дискретно-непрерывная динамическая система описывает продолжительный переход благополучной популяции из стационарного состояния с высокой численностью после повышения промыслового изъятия к аperiodическим колебаниям — при малой. В дальнейшем флуктуации со сжимающейся амплитудой внезапно переходят в деградацию биоресурсов. Отсчет коллапса реализуется в сценарии как граничный кризис интервального притягивающего множества, так как граница области притяжения такого аттрактора, существующего для диапазона низкой численности, незначительно удалена от критической точки. После кризиса запасы не восстанавливаются. *Ключевые слова:* нелинейные модели промысловых популяций, истощение запасов рыб, сценарий коллапса.

ВВЕДЕНИЕ

Истощение рыбных запасов все сильнее отмечается в различных регионах, как показано в историческом обзоре международной группы гидробиологов (Jeremy et al., 2001) на основе применения методов палеоэкологии. В современной англоязычной научной литературе для значимых и непредвиденных последствий чрезмерной эксплуатации используется заимствованный из астрофизики термин «коллапс» (катастрофическое гравитационное сжатие массивного объекта), более образно передающий картину быстрого непреодолимого запустения промысла, чем просто перелов (overfishing) или растянутое истощение (depletion). Оказалось, что коллапс может угрожать ранее многочисленным ценным промысловым популяциям крупных морских рыб, способным, каза-

лось бы, десятилетиями выдерживать значительное изъятие.

Среди разнородной ретроспективной информации о причинах останова промысла можно выделить характерные особенности развития событий, интерпретируемые в терминах динамических систем. Пример динамики эксплуатируемых рыбных запасов с обоснованием итогового графика истощения в середине 1960-х гг. (когда стали внедряться более эффективные орудия лова) можно найти в работе Кристи (Christie, 1974) о промысле популяций сига *Coregonus clupeaformis* Великих озер.

Из рис. 1. можно заключить, что популяция сига озера Онтарио в 1964 г. после нерегулярных колебаний резко потеряла промысловое значение. С сокрушительными последствиями, казалось бы, незначительного перелова сталкиваются развитые

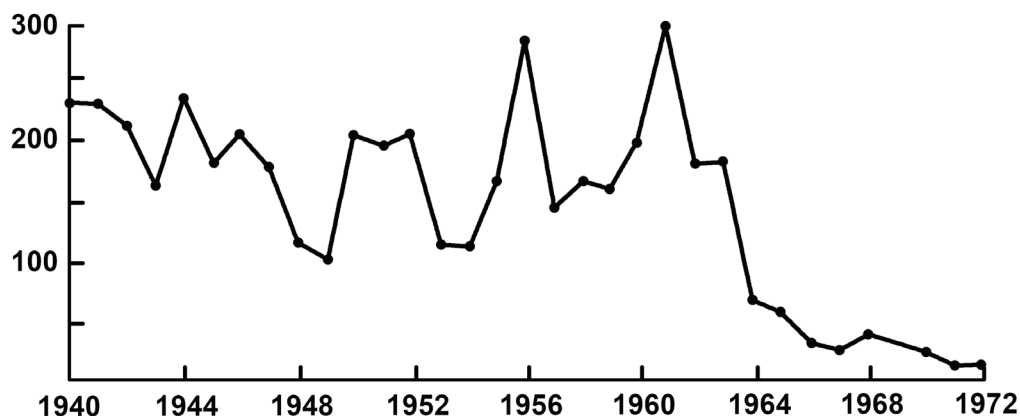


Рис. 1. Динамика вылова сига в оз. Онтарио, т (по: Christie, 1974).

страны с налаженной научной практикой регулирования промысла, такие как Норвегия и Канада. В 1992 г. произошел самый обсуждаемый в литературе и масштабный по последствиям коллапс из состояния, оцененного как благополучное, — прекращен промысел атлантической трески *Gadus morhua* побережья Ньюфаунленда (рис. 2) и в прилегающих водах. Кризису промысла трески посвящена большая статья в англоязычной Википедии, освящающая проблему в экономическом и социальном аспектах. Рыболовецкие ресурсы удалось частично перенаправить на добычу донных беспозвоночных, например быстро размножившейся

в отсутствие доминирующего хищника креветки *Pandalus borealis*.

Промысел трески показал максимальные результаты на рубеже 1970-х гг., но далее не удержался на среднемноголетнем уровне. Как мы видим, неотвратимое истощение последовало не сразу вслед за годами рекордных уловов. Первичное падение приостановилось. Перед крахом наблюдалось десятилетие (1981–1990) не столь обильных, но приемлемых колеблющихся объемов вылова и оптимистичных ожиданий по его дальнейшему наращиванию. В анализе Майерса (Myers, 1997) развитие событий объяснялось тем, что естественный тренд снижения численности трески мог совпасть с увеличением реальной промысловой смертности из-за системной переоценки ее запасов. В исследовании на примере минтая Охотского моря (Зверькова, 2015) показано, что известные модели часто завышают ожидаемое пополнение от переоцененного нерестового запаса, когда в реальности уже проявляется тенденция его убыли.

В октябре 2015 г. газета «The Telegram» (Монреаль) сообщает о растущей надежде на восстановление экономически важного промысла у Ньюфаундленда и Лабрадора, а почти одновременно в журнале «Science» выходит статья (Pershing et al., 2015) о явных признаках критического истощения запасов популяции трески залива Мэн. По мнению авторов журнала

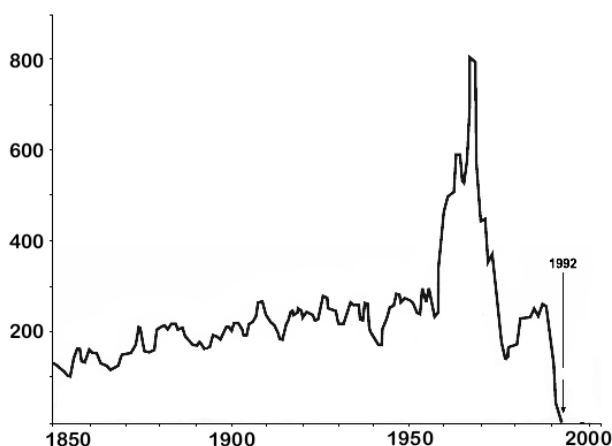


Рис. 2. Коллапс уловов атлантической трески *Gadus morhua* у побережья Канады, тыс. т, (по: Sarukhán, Whyte, 2005).

«Science», при определении промысловой нагрузки не были учтены изменения Гольфстрима. Из приведенных диаграмм следует, что численность южной трески у полуострова Кейп-Код исторически характеризовалась значительными по амплитуде флуктуациями. Задолго до первых признаков деградации в 1995 г. произошло значительной сокращение диапазона колебаний численности в меньшую сторону. В случае коллапса трески у побережья Ньюфаундленда и новых проблем промысла в заливе Мэн специалисты не смогли представить реалистичного прогноза о темпах регенерации истощенных запасов. В результате введенный изначально на два года мораторий на вылов неожиданно для ихтиологов превратился в 23-летнее вынужденное прекращение промысла трески, пагубное для экономики северного региона. Проблема коллапса не исчерпывается своевременным выявлением его признаков. Есть основания полагать, что за подобным развитием событий скрыты нетривиальные особенности репродуктивного процесса. Популяция после значительного перелома восстанавливается совсем не так быстро, как должно было бы следовать из полученной ранее статистики за благоприятный для популяции период наблюдений.

#### Методы расчета пополнения рыбных запасов

Сейчас предлагаются самые разные имитационные модели популяции, в том числе на основе нейронных сетей и теории игр (Меншуткин, Егорова, 2015), но классический аппарат динамических систем при грамотном расширении представления времени не исчерпал возможностей. Известно достаточно много моделей с включением внутренних механизмов регуляции численности популяций, в которых можно имитировать последствия организованного промысла. Из логистического уравнения Ферхюльста—Пирла (Pearl, 1927) строилась теория максимизации устойчивого вылова MSY (maximum sustainable yield), которая уже достаточно давно подвергается резкой критике со стороны экологов из-за последствий ее оптимизма

(Larkin, 1977), основанного на постоянстве прироста и предположении о стабильности природных воздействий. Одна из модификаций логистической модели (Базыкин, 1990) включила минимально допустимое для выживаемости состояние популяции. Оказалось, что это критическое состояние опасно близко к наиболее продуктивному, на наличии которого строилась концепция MSY, но при том развитие процесса выглядит вполне предсказуемым, если при определении допустимого изъятия нужно исходить не из общей численности запаса  $S$ , а из величины превышения численности над критической. Однако модели, применявшиеся для расчета уловов по стратегии MSY, подразумевают константный параметр репродуктивного потенциала. Если оценить этот параметр с минимальной погрешностью, то идеально управлять промыслом, не подвергая риску запасы и переводя популяцию в особое состояние  $S_{\max}$  наиболее интенсивного приращения.

В основе моделей эксплуатируемых популяций рыб должна содержаться нетривиальная формализация баланса воспроизводства и смертности от различных факторов. Естественная убыль на ранних этапах жизни особей очень велика, и ее изменения сказываются на благополучии популяций крупных хищников. В ихтиологии возникло направление исследований, объясняющее закономерности изменения эффективности воспроизводства. Построение кривых воспроизводства использовали при подборе оптимального промыслового режима с учетом особенностей нереста некоторых видов рыб. Определение вида эмпирической зависимости  $R = f(S)$  на основе данных наблюдений должно способствовать обоснованию прогнозов темпа восполнения промыслового запаса  $S$ . Наиболее полный обзор построения моделей теории формирования пополнения проведен в работе Криксунова (1995), где предложено использовать для подобных задач дифференциальные уравнения убыли численности на интервале уязвимости. Методика применения моделей пополнения описана Бабаяном (1988) в числе других формаль-

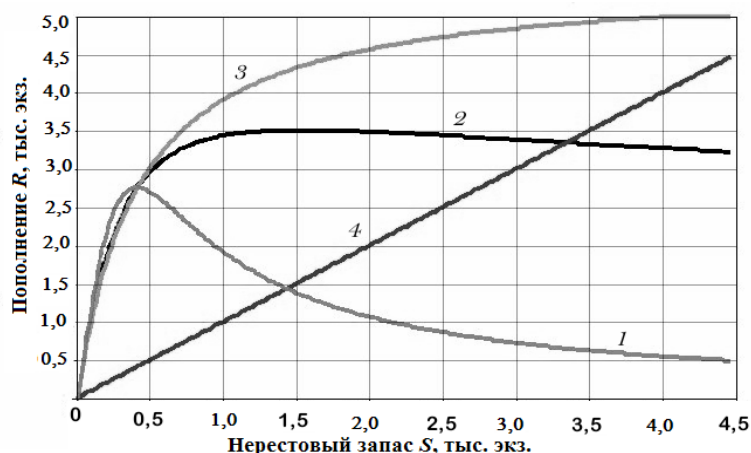
ных методов расчетов для прогнозирования в теории рыболовства.

Концепция моделей пополнения заключается в описании лимитирующих факторов  $v(S)$ , регулирующих величину пополнения  $R$  при повышении плотности рыб на нерестилищах с характеристикой фертильности  $a > 1$ :  $R = aS/v(S)$ . Рикер (Ricker, 1954) предложил экспоненциальный показатель влияния лимитирующих факторов:  $v(S) = e^{bS}$ , где  $0 < b < 1$ . Шепард (Shepherd, 1982) обобщил принцип применения степенного показателя для учета лимитированности среды в форме вариативной зависимости:  $v(S) = 1 + (S/K)^b$ , где показатель  $b > 0$  не ограничен сверху, а  $K$  — емкость среды обитания.

Если анализ моделей проводить в виде функциональных итераций  $R_{n+1} = \psi(R_n)$ , то в обзоре Криксунова (1995) не упомянуто, что при изменении параметра нелинейных кривых,  $a$  Рикера или  $b$  Шепарда, происходят бифуркации образования циклов увеличивающегося периода  $2^i$  с переходом к хаотическому режиму и аттрактору  $A$  в форме нигде не плотного множества, так как они удовлетворяют критериям теоремы Сингера (Singer, 1978). Из критериев Сингера важно, что количество точек перегиба кривой более значимо для динамических характеристик, чем положение ее асимптоты. Реализация каскада бифуркаций Фейгенбаума (Feigenbaum,

1983) при изменении некоторого параметра — не достоинство и не недостаток моделей, но просто математическое свойство, которым обладают и итерации тригонометрических зависимостей, не имевших никакого популяционного истолкования. Без установления условий всех метаморфозов поведения моделей популяций сложно обосновать любые выводы.

Качественные изменения поведения траектории двух моделей могут быть взаимно противоречивы при биологической интерпретации. 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. Простые модели могут обладать сложными динамическими режимами и неожиданными метаморфозами (перемежаемость, субдукция, три вида кризиса аттракторов). Независимо от способа учета факторов давления среды и плотности особей классические модели пополнения Рикера, Шепарда и Бивертон—Холта (сравнительные относительно положения биссектрисы координатного угла формы зависимости воспроизводства  $R = f(S)$  которых показаны на рис. 3) в модельном сценарии превышения критического уровня изъятия  $H > \bar{H}$  показывают монотонную кривую убыли запаса, различаясь наклоном и сменой направления выпуклости.



**Рис. 3.** Графики функций известных моделей пополнения: 1–3 — кривая воспроизводства соответственно Рикера, Шепарда, Бивертон—Холта, 4 — биссектриса координатного угла.

Обсуждались разнообразные методы определения характеристик зависимости запас—пополнение по реальным временным рядам наблюдений. Отметим, если популяция представляется как динамическая система  $\lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(R_0; a) = A$ , изменяющая начальное состояние под действием оператора эволюции  $\psi$ , то увидеть по данным об отнерестившихся производителях и мигрирующих к местам нагула сеголетках форму графика  $\psi$  сможем в случае сверхкритического значения доли промыслового изъятия  $H$  и если популяция при перелове существует достаточно долго. В других ситуациях из собранных в диаграммы данных мы будем делать выводы о метаморфозах притягивающего множества  $A$  или о количестве и расположении неустойчивых граничных стационарных состояний, однако для всего разнообразия подобных итераций математическая топология предполагает только три типа аттракторов (Guckenheimer, 1979).

#### Стадийная модель формирования поколений

Как мы отмечали ранее, коллапс — это не просто вялотекущий и монотонный процесс деградации, а неожиданный переход в состояние с минимальной за историю наблюдений численностью. Будем разрабатывать модель пополнения с использованием организации непрерывно-событийной вычислительной структуры с целью получить качественно другие свойства динамики итераций. Учтем, что кривая воспроизводства совсем не обязательно должна быть куполообразной унимодальной с единственным экстремумом функции, что отметил Рикер (Ricker, 1954). Дополнительно примем, что реальная зависимость эластична — способна масштабироваться вдоль оси ординат под действием внешних факторов.

У рыб выражена стадийность развития раннего онтогенеза: предличинки на питании из желточного мешка, активно питающиеся личинки, свободно мигрирующая к местам нагула молодь. Факторы смертности должны различаться по стадиям, при этом момент достижения перехода личика→молодь

может регулироваться вспомогательным показателем развития  $w(t)$ , замедление развития тоже становится значимым фактором.

Опишем убыль начальной численности поколения  $N(0)$  от момента вылупления из икринок дифференциальным уравнением на промежутке времени  $t \in [0 \dots \tau, \tau_1 \dots T]$ . Учтем два фактора смертности и изменение их действия по ходу прохождения стадий развития особей, а также реакцию хищников на обилие 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 агрегированного репродуктивного потенциала разумно перейти к естественному показателю средней плодовитости  $\lambda$ . Учет влияния кормовой базы производителей, который был предложен для моделей запас—пополнение Булгаковой (1978), лучше проводить при корректировке  $\lambda$ , потому что при нерестовых миграциях недостаток питания особей приводит к анемии и, как следствие, к резорбции икры. Начальные условия для уравнения (1) с дважды переопределяемой правой частью таковы:  $N(0) = \lambda S$ ;  $\tau$  — длительность первой стадии с эндогенным питанием для рыб, которая обычно постоянна;  $\tau_1$  зависима от  $w_d$  — условного уровня развития, при достижении которого ослабляется действие факторов смертности, что объясняется разными условиями обитания молоди до и после начала самостоятельной морской миграции. Вспомогательное уравнение —  $w'(t) = m / (N^{2/3}(t) + \zeta)$ . При низкой плотности уменьшается вероятность образования нерестовых пар, что сильно сокращает продуктивность нереста, особенно анадромных рыб и, как показывают современные данные (Stoner, Davis, 2012), влияет и на морских гидробионтов. Форму правой части при  $t < \tau$  дополним триггерным функционалом:



$U(S) = 1 + \exp(-cS^2)$ , (2)  
 где  $c < 1$  определяет степень выраженности фактора, называемого в экологии эффектом Оли. Согласно Гаскойну (Gascoigne, 2004), эффект способен проявляться в морских экосистемах. Функционал (2) быстро стремится к  $\lim_{S \rightarrow S^*} U(S) = 1$  и не влияет на расчеты при оптимальном состоянии запаса. Область значений (2) ограничена —  $E(U) = [2, 1)$ . Интервал ювенильной уязвимости  $[0, T]$  разделен на тройку кадров модельного времени. При смене смежных кадров происходит реинициализация начальных условий для правых частей (1).

В инструментальной среде алгоритмически формируется непрерывно-событийная переопределяемая вычислительная структура из трех форм правой части уравнения убыли и условий завершения их активности. Последовательность численных решений задач Коши для допустимых значений  $S \in Z^+$  определит итоговую интересующую нас зависимость (рис. 4).

Из модели (1), дополненной функционалом (2), мы получили зависимость, где диапазоны превышения  $\psi(S) > S$  чередуется с состояниями, в которых имеющийся нерестовый запас восполняется не полностью. Минимум  $N(T)$  соответствует локальному максимуму промежуточного  $N(\tau)$ . Волнообразные формы зависимости были описаны по реальным наблюдениям Петермана (Peterman, 1977) и обоснованы избирательной реакцией хищников в отноше-

нии наиболее массовой и доступной добычи, в частности, когда предпочитаемой добычей становится молодь своего вида. Как отмечено в статье о переизбытке трески (Борисов, 2012), действительно, повышение эффективности нереста влечет усиление внутривидового трофического взаимодействия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В отличие от гипотетической кривой воспроизводства тихоокеанской горбуши Петермана в новой модели не три, а 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 явному превышению наклона касательных  $\pi/4$ , в точках оказываются неустойчивы, в вычислительных моделях для установления устойчивости точек используется вычисление  $f(f(x))$ .

Так как в окрестности максимума модельная кривая немного превосходит третье 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 аperiодических флуктуаций достигается состояние высокой стабильной численности  $R_4^*$ . Гипотетический вариант устойчивости  $R_1^*$  или  $R_2^*$  не может объяснить самостоятельного восстановления популяций после не критического перелома. Аperiодическое движение чувствительно к выбору началь-



**Рис. 4.** График модели пополнения на основе уравнения (1): 1 — полученная кривая воспроизводства, 2 — биссектриса координатного угла.

го значения  $R_0$ , это означает принципиальную невозможность делать прогнозы при подобном характере популяционной динамики. Фундаментальное свойство появления хаотичности, пусть и в транзитивном варианте (Thunberg, 2011), означает уход за горизонт предсказуемости. Как бы точно ни настраивались параметры модели, вряд ли мы сможем узнать исходное состояние нерестового запаса с точностью до каждой самки. Асимптотическая неопределенность естественным образом возникает в моделях ряда процессов (Perevaryukha, 2011). С другой стороны, в малочисленном диапазоне популяции более подвержена влиянию неустойчивости среды, потому переходная хаотизация хорошо имитирует нечеткость представления об истинном состоянии запаса.

Наблюдаемый в вычислительных экспериментах аperiодический 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 среднесноголетней численности в режиме флуктуаций значительной амплитуды, которому отвечает интервальный аттрактор, относящийся к третьему топологическому типу (по: Guckenheimer, 1979). Продолжительность колебаний зависит от положения минимума кривой. Если  $\psi(R_{\min}) > R^*$ , то так описывается сценарий деградации, наблюдавшийся в примере промысла сига озера Онтарио, реализованный как граничный кризис ин-

тервального аттрактора по классификации эффектов математиков мэрилендской группы (Grebogi et al., 1982).

Интересна динамика в вычислительных экспериментах для полученной зависимости при резком повышении доли промыслового изъятия, какое проводится при уже благополучном состоянии запаса  $\bar{\psi}(R_n) \approx R_4^*$ . Задача регулирования вылова — не позволить редуцировать равновесие возмущенной системы  $\bar{\psi}$  выше  $R_3^*$ , сбросив запас в режим неблагоприятных для промысла и непредсказуемых колебаний. В негативном случае короткий мораторий может стать действенным решением по возвращению неустойчивых, но приемлемых уловов, а динамика популяции опишет характерный «ковш».

В 1967 г. случилось резкое падение уловов сельди в Британской Колумбии, был введен 4-летний мораторий, и промысел удалось восстановить, ограничив  $H \leq 0,2$ , но оценка реальной убыли существующими методами оказалась сложна. Ситуация с переловом сельди повторилась в худшем варианте, что признали в 2010 г. (Schweigert et al., 2010).

#### Вычислительный сценарий коллапса

Пусть популяция после долгой неустойчивости восстановилась до своего оптимума, уловы плавно пошли вверх, после чего принимается решение об интенсификации режима промысла, который, к несчастью, оказывается чрезмерным. Величина улова  $Y = HR_n$  сначала демонстрирует исторические максимумы, но затем уловы довольно очевидно снижаются, успешно проходят локальный минимум, не попадая сразу в окрестность точки критического состояния. Майерс (Myers, 1997) констатировал, что методика оценки запасов недостаточно чувствительна, чтобы сразу показать начавшееся сокращение. В промысловых прогнозах наверняка учли высокую эффективность воспроизводства в предыдущие годы и то, что уловы после спада немного возвращаются к былым объемам, но такое восстановление будет обманчиво (на рис. 5 мы видим временную  $t$ -диаграмму величины уловов,

где по оси абсцисс откладывается внутреннее представление модельного времени вычислительной среды). Численность запаса после интенсификации промысла возвращается в аperiodический малочисленный режим со сжимающейся амплитудой колебаний, но не задерживается там даже в случае запоздалого установления прежней неистощительной доли изъятия. После кратких колебаний следует второе, уже критическое, падение (рис. 6 — временная  $t$ -диаграмма изменения состояния промысловой популяции при перелове). Недолгий тренд повышения уловов непосредственно перед коллапсом следует из характера нелинейности модели кривой воспроизводства, связанного с существованием двух уровней численности популяции. Недолгий тренд повышения уловов непосредственно перед коллапсом следует из характера нелинейности модели кривой воспроизводства, связанного с существова-

нием двух уровней численности популяции. Достаточно превышения допустимой доли изъятия на 0,015 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 — это точка начала координат.

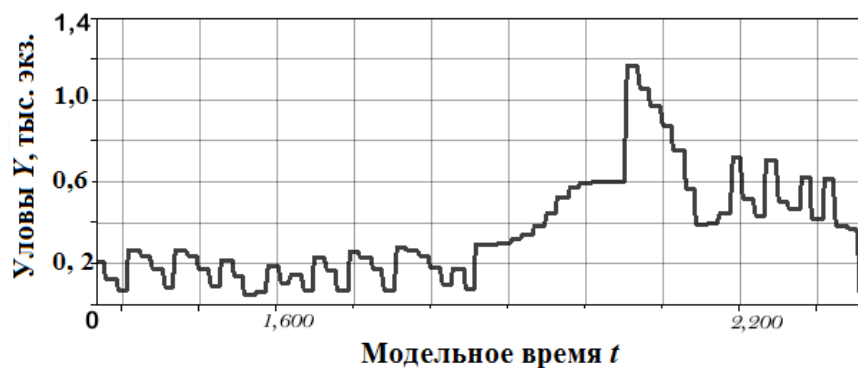


Рис. 5. Динамика уловов в вычислительном сценарии существенного перелова.

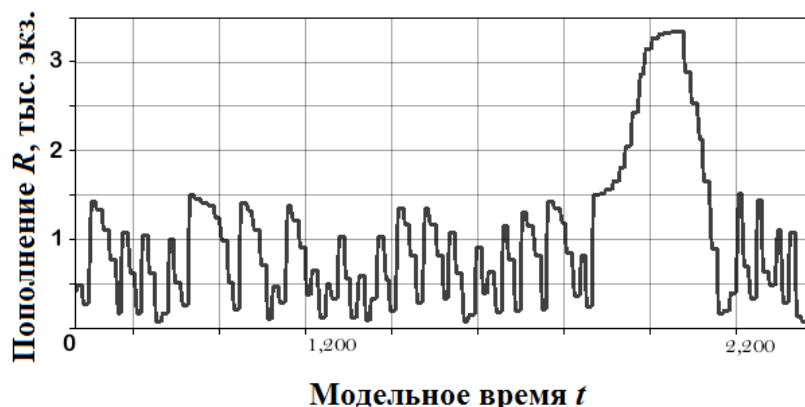


Рис. 6. Динамика численности популяции при коллапсе запасов по модели (1).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная модель подтверждает, что особые сценарии истощения биоресурсов, названные коллапсом, действительно сложны для прогнозирования и содержат ряд аспектов, которые в кибернетике саморегулируемых систем Форрестер (1971) называл контринтуитивными. Если происходят качественные изменения в механизмах регуляции, то решения по изменению стратегии эксплуатации запаздывают, так же как и прогнозы допустимых уловов делают на основе ретроспективных сведений о предшествующей динамике эксплуатируемой популяции, которая не обязательно сохранится при увеличении изъятия. Канныализм хищных видов далеко не единственный механизм проявления отрицательной обратной связи в ихтиоценозах, но более прямодействующий, чем конкуренция. Один из вероятных сопутствующих механизмов закрепляется тем, что при сокращении численности доминирующих хищников должна изменяться сложившаяся возрастная структура популяции жертв.

Интерес представляет дополнение или корректировка вычислительных сценариев в сопоставлении с рядом других нетривиальных примеров деградации обильных ранее промысловых запасов крупных рыб, о которых у автора не имеется достоверных данных и которые, как считалось, были способны выдерживать очень большое изъятие.

Исследования проведены в рамках проектов РФФИ (№15-07-01230, №14-07-00066).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабаян В.К. Математические методы теории рыболовства (модели изолированных популяций). М.: ЦНИИТЭИРХ, 1988. 76 с.

Базыкин А.Д. Теоретическая и математическая экология: проблема опасных границ и критериев приближения к ним // Математика и моделирование. Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1990. С. 232–237.

Борисов В.М. В Баренцевом море переизбыток трески // Рыб. хоз-во. 2012. № 4. С. 21–23.

Булгакова Т.И. Модель популяции типа «запас—пополнение», учитывающая влияние кормовой базы производителей на выживание молоди // Тр. ВНИРО. 1978. Т. 128. С. 16–22.

Зверькова Л.М. К вопросу оценки запаса североохотоморского минтая // Вопр. рыболовства. 2015. №4. С. 419–427.

Криксунов Е.А. Теория пополнения и интерпретация динамики популяции рыб // Вопр. ихтиологии. 1995. Т. 35. № 3. С. 302–321.

Менишуткин В.В., Егорова Н.А. Применение имитационного моделирования при оценке общего допустимого улова // Вопр. рыболовства. 2015. №3. С. 367–375.

Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика). М.: Прогресс, 1971. 340 с.

Christie W.J. Changes in the fish species composition of the Great Lakes // J. Fish. Res. Board Can. 1974. V. 31. № 5. P. 827–854.

Feigenbaum M.J. Universal behavior in nonlinear systems // Physica D. 1983. V. 7. № 1–3. P. 16–39.

Gascoigne J. Allee effects in marine systems // Marine Ecol. Progress Ser. 2004. V. 269. P. 49–59.

Grebogi C., Ott E., Yorke J. Chaotic attractors in crisis // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. № 22. P. 1507–1510.

Guckenheimer J. Sensitive dependence on initial conditions for one dimensional Maps // Comm. Mathem. Physics. 1979. V. 70. P. 133–160.

Jeremy B.C., Kirby X., Berger H. et al. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems // Science. 2001. V. 293. №. 5530. P. 629–637.

Larkin P.A. An epitaph for the concept of maximum sustained yield // Transac. Amer. Fish. Soc. 1977. V. 106. № 1. P. 1–11.

- Myers R.A.* Why do fish stocks collapse? The example of cod in Atlantic Canada // *Ecol. Appl.* 1997. V. 7. P. 91–106.
- Pearl R.* The biology of population growth // *Birth Control Rev.* 1927. V. 11. P. 236–263.
- Perevaryukha A.Y.* Uncertainty of asymptotic dynamics in bioresource management simulation // *J. Computer Syst. Sci. Intern.* 2011. V. 50. № 3. P. 491–498.
- Pershing A.J., Alexander M.A., Hernandez C.M. et al.* Slow adaptation in the face of rapid warming leads to collapse of the Gulf of Maine cod fishery // *Science*. 2015. V. 350. № 6262. P. 809–812.
- Peterman R.M.* A simple mechanism that causes collapsing stability regions in exploited salmonid populations // *J. Fish. Res. Board Can.* 1977. V. 34. P. 1130–1142.
- Ricker W.E.* Stock and recruitment // *Ibid.* 1954. V. 11. P. 559–623.
- Singer D.* Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval // *SIAM J. Appl. Math.* 1978. V. 35. P. 260–268.
- Schweigert J.F., Boldt J.L., Flostrand L. et al.* A review of factors limiting recovery of Pacific herring stocks in Canada // *ICES J. Marine Sci.* 2010. V. 67. Iss. 9. P. 1903–1913.
- Shepherd J.G.* A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries and construction of sustainable yield curves // *ICES J. Marine Sci.* 1982. V. 40. P. 67–75.
- Stoner A.W., Davis M.* Negative consequences of Allee effect are compounded by fishing pressure: Comparison of queen conch reproduction in fishing Grounds and a marine protected area // *Bull. Marine Sci.* 2012. V. 88. P. 89–104.
- Thunberg H.* Periodicity versus chaos in One-Dimensional dynamics // *SIAM Rev.* 2001. V. 43. P. 3–30.

## FISH STOCK COLLAPSE AND ITS DYNAMICAL MODEL

© 2016 г. А.Ю. Perevaryukha

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 199178*

The negative scenarios for fishing are often implemented in a similar way. We discussed the situation sharp reduction in commercial stocks of larger fish: Atlantic cod and whitefish of Lake Ontario. In modern literature, such phenomena are defined as a collapse of stocks. It identifies a number of features of the degradation of fish in terms of nonlinear dynamics. Computational model of the process, culminating in the collapse, based on the formalization of changing generations survival. In equation implicitly specified mortality factor relies a cannibalism of cod. A discrete-continuous dynamic system describes the long non-smooth transition prosperous population of the steady state with a high number of withdrawals after the increase in fishing for aperiodic fluctuations at low fish abundance. In the future, with considerable fluctuation amplitude pass quickly to the stage of biological resources degradation. The collapse is realized in the computing scenarios as a phenomenon of the boundary crisis interval attractor, since the boundary region of attraction slightly removed from the critical point.

*Keywords:* nonlinear model of populations, depletion of fish stocks, northern cod collapse.