

Модель сценария истощения биоресурсов при экспертном управлении стратегией эксплуатации

А.Ю. ПЕРЕВАРЮХА¹

¹ Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья развивает сценарный подход к моделированию природных процессов при управляемом антропогенном воздействии. Определение рациональной стратегии эксплуатации для крупных хищников остается одной из противоречивых проблем, где применяются слабоформализованные экспертные методы управления промыслом. Успешно работавшие ранее для одних объектов методики определения квот изъятия, для других биоресурсов могут приводить к длительной деградации популяций. Разработана модель воспроизводства популяции с гибридным временем и алгоритмом, изменяющим функцию регуляции в зависимости от текущего состояния запаса. На основе предложенной вычислительной модели и типичной логики принятия решений при изменении промыслового воздействия рассмотрен осциллирующий сценарий коллапса на примере запасов камчатского краба. Динамика в модели с резкими флуктуациями численности приводит к краху промысла, когда эксперты могут ожидать восстановления запасов. Модель сценария использует трансформации фазового портрета: несвязные границы областей притяжения аттракторов и странный репеллер, прямую и обратную касательную бифуркации стационарных точек, аттрактор в форме множества несвязных интервалов. В детерминированной модели возникают стохастические эффекты.

Ключевые слова: *биокибернетика, формализация экспертного управления биоресурсами, логико-гибридные системы, иерархическое событийное время, сценарии коллапса, фрактальные границы, странный репеллер, неунимодальные итерации.*

DOI: 10.14357/20790279210304

Введение

Эксплуатируемые промыслом популяции – это развивающиеся системы в сложном окружении. Разные виды в составе сообществ конкурируют между собой и ведут борьбу за ресурсы и выживание по эволюционно сложившимся механизмам. Регулирующие механизмы биокибернетики достаточно гибкие, но в то же время приводят к тому, что какой-то один вид, даже самый эффективный потребитель, в конечном итоге не сможет стать вечно доминирующим в экосистеме. Вмешательство промысла не просто изымает биомассу коммерчески ценного вида, но может разрушать регулирующие факторы для других. Оптимальному управлению промыслом посвящено много работ [1]. Однако экосистемы нестабильны из-за климата и инвазий чужеродных видов, что определено как рациональный уровень изъятия 5 лет назад, сейчас может стать критическим. Построение универсальной модели для выработки оптимальной с точки зрения прибыли и априори безопасной стра-

тегии длительного промысла, безусловно, остается актуальной проблемой, но на практике такие попытки оптимизации в рамках концепции максимального поддерживаемого улова (MSY) несут риск и для популяций и для экономики регионов. Коллапс запасов означает длительную остановку промысла и кризис экономики [2]. Нередко регулируемый по квотам (массы) улова промысел ведет к неожиданной деградации биоресурсов [3]. Кризисные ситуации по динамике развития разнообразны в ключевых признаках. Можно перефразировать первые строки романа Льва Толстого – все удачные решения в стратегии эксплуатации похожи, каждая несчастливая ситуация с исходом в форме коллапса биоресурсов развивается по-своему. Осетровые рыбы Каспия, атлантическая треска у Лабрадора, арктический палтус и краб у Алеутских островов прошли свою динамику до отметки деградации на графиках промысловой статистики.

Цель исследования – разработка популяционно-вычислительной модели с учетом непо-

стоянства факторов выживаемости, событийно зависимых от скорости роста особей. Новизна заключается в формализации разных типов событий в непрерывных кадрах времени и развитии сценарного подхода к исследованию нелинейных режимов дискретной составляющей траектории системы, полученной с использованием перестраиваемых дифференциальных уравнений по принципам стадий развития особей. Ключевая идея анализа – оценка заданной ситуации с вариантами развития. Алгоритмически формализованная логика изменения воздействия совместно с набором параметров и определенными начальными условиями уравнений составят оригинальную трактовку рассматриваемой модельной ситуации.

Практическая часть работы включает анализ сценария по литературным данным и отчетам промысловой статистики для ситуации, которая привела к быстрой деградации промысловой популяции камчатского краба на Севере Тихого океана через 20 лет после пика уловов.

1. Формат иерархического непрерывно-событийного времени

Идея организации модели с перестроениями в расчетах уравнений востребована для многих специфических задач [4]. Для адаптации метода к процессу ключевым является представление модельного времени как последовательности кортежей и определение логики переключений. Точки во времени для событий, которые ведут к перестроениям в системе непрерывных уравнений можно определять различными способами, так как биологическая проблематика специфична, а процессы (например, иммунный ответ при COVID инфекции) развиваются вариативно. «Гибридные модели» – это достаточно общий термин, нам точнее говорить предикативная вычислительная структура с событийным временем. Много разных не похожих между собой структур для компьютерных расчетов разные авторы называют «гибридными». В контексте динамически переопределяемых систем можно говорить о разрывных нелинейностях или склеенных вычислениях. В предыдущей работе [5] нам удалось с использованием модели описать явление вспышки численности у насекомых – взрывообразного размножения вредителей, но которое быстро завершается. Этот описанный в [6] пороговый сценарий с единственным кратким пиком только один из многих вариантов развития процессов с резкими переходами в динамике биосистем. Возможны вспышки в форме серии затухающих пиков.

В экологические модели часто необходимо вводить дополнительные условия для начала и для завершения действия фактора, так как ход процессов может меняться скачкообразно при выполнении ряда условий. Например, очень резко изменяется при повышении температуры скорость разложения органики и темпы образования зон гипоксии в эвтрофированных озерах [7]. Иногда резкие изменения не выражаются просто сдвигом значений отдельных показателей по табличной функции, но затрагивают форму нелинейности в регуляции. Известные полностью непрерывные модели возрастной структуры популяций [8] не подходят для промысловых видов, у которых колебания ювенальной смертности очень значимы. В непрерывных моделях трофической цепи возникают каскады бифуркаций [9], но усложнение поведения не является нашей целью.

Идею последовательности из непрерывных интервалов времени алгоритмически можно реализовать в различном формате, и универсального метода для построения модели с динамическими перестроениями нет. «Гибридность» в биологических моделях требуется для описания и структурных и качественных изменений. В наших работах они были и строго обязательными, алгоритмически предопределенными во времени либо необязательными или случайными следствиями других процессов, как при презентации антигена в иммунном ответе. Перестроение и выбор альтернативного уравнения в модели может быть необходим нам только при особом соотношении рассчитываемых величин.

Для разных предметных областей мы используем несколько отличающихся форматов времени с непрерывной и с дискретной компонентой. Для данной задачи выберем именно ту трактовку, что более подходит для моделирования логики процесса и исследования модельной ситуации промысла в серии сравнительных вычислительных экспериментов с предикативно изменяемой формой воздействия. Жизненный цикл стандартной длины T водного организма (рыб и ракообразных) сопровождают метаморфозы, и потому мы зададим разбиение жизненного цикла. Используем кадрирование иерархии непрерывных отрезков времени. Внутри больших кадров оставим место для пронумерованных событий t^i . Гибридное событийное время для вычислительных экспериментов формализуем в форме мультимножества из упорядоченных элементов:

$$\bigcup_n \left\{ \partial L_n, \left\{ \bigcup_i [t_0, t^i, t^{i+1}, T] \right\}_n, \partial R_n \right\},$$

где i – номер для события в теле кадров перед T , а n – текущий номер кадра в порядке сменяемых поколений.

Запись времени с двумя дискретными компонентами оставляет грани $\{\partial L, \partial R\}$ справа и слева от основной единицы – кадра с номером n . Грани между кадрами времени, но не входящие в кадр в виде щелей $\{\partial L, \partial R\}$ понадобились для выполнения перестроений в выделенных условиями пунктах системных переходов к расчету развития уже следующего смежного поколения и установки величины воздействия. Цель формализации времени – точно вводить элементы событийности при управлении, так как точки t^1, t^2, t^i укажем из расчетов особых полностью непрерывных дополнительных переменных. Не всегда время с субинтервалами плавающей длины из-за вычисляемых событий нужно форматировать в фиксированные кадры. Можно вводить простую событийность без явного кадрирования.

Идея манипуляций со временем в том, что вычислительная модель популяционного процесса формируется на основе динамически переопределяемой системы. Факторы убыли численности существенно меняются между стадиями онтогенеза многих видов [10]. Вторая идея метода – из состояния множества предикатов устанавливать события, за которыми следуют изменения в процедуре расчета уравнений. Тогда управляющее воздействие удобно варьировать сценарной логикой вычислительного эксперимента.

2. Непрерывные интервалы времени и кортежи событий

Для модели, отражающей биологическую прерывистость, мы предлагаем логически изменяемую вычислительную структуру с тремя последовательными переопределяемыми формами. Значение $N(t)$ в каждом кадре проходит изменение от $N(0)=\lambda S$ и до $N(T)$. Система формализуется дифференциальным уравнением с набором возможных «сменных форм» для правой части и дополнительно с набором предикатов для смены режима расчетов, функций с множеством значений $\{0;1\}$. Предикат задан математическим отношением изменяющихся непрерывно аргументов (подчиняется правилам булевой алгебры). Предикаты по умолчанию при $t_0 P(x,y)=0$, но обязательно должны будут при t^i принимать значение истина $P(x,y)=1$ от состояния своих аргументов, иначе последует ошибка. Их аргументами будут переменные из вспомогательных, но связанных с динамикой $N(t)$ вычисляемых уравнений.

Набор интервалов до вступления в репродуктивный возраст каждого из поколений зададим

объединением кадров времени с кортежем вычисляемых событий:

$$t \in [0, T] \equiv \bigcup_i \{[t_0, t^i, t^{i+1}, T]\}, i = 1 \dots 3.$$

Пронумерованные события в кадре будут онтогенетическими прерываниями и сопоставим их с последовательными тремя формами правой части. Представим уравнения для уменьшения численности поколения от $N(0)$ с тремя стадиями онтогенетического развития:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \beta)N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t)N(t - \chi) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases} \quad (1)$$

Параметры $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$ и β – интерпретируемые коэффициенты ювенильной смертности в зависимости от численности самого поколения. В одно из уравнений включено запаздывание $t - \chi$ для учета истощения ресурсов. Предикатами P_1, P_2, P_3 зададим моменты останки расчетов каждой из трех форм правой части – условия завершения активности уравнения:

$$P_1(-t < \tau), P_2(t \geq \tau, t \neq T, -w_i < w_k), P_3(t = T, w_i > w_k).$$

Использован переходный уровень развития w_k для выхода поколения из квадратично определенного уровня смертности. Два предиката мы записали с логическим отрицанием, так как события станут возможными при нарушении соотношений. Расчет (1) происходит с алгоритмом цикла до тех пор, пока $P=1$. Предикаты должны однозначно всегда определить переходы, потому избыточность не мешает. Избегая неоднозначности можно воспользоваться дополнительными логическими переменными, меняющими состояние, когда переход совершен, но не может быть снова выбран алгоритмом. Запись непрерывно-событийного времени как мультимножества из элементов $\langle t_0, t^i, t^{i+1} \rangle$ означает, что в модели считается последовательность кадров для времени жизненного цикла отдельного поколения. Биологически кадр – стандартное время жизни поколения. Внутри каждого кадра с началом t_0 имеются «внутрикадровые» события, которые мы обозначили верхним индексом t^i . Для каждой формы правой части в момент события рассчитываются сопряженные с предшествующими расчетами начальные условия. Так как перестроения правой части (1) происходят предикативно, то важным элементом модели служат текущие значения P_1, P_2, P_3 . Классифицируем переходы: типа А – только по отсчетам времени t ; типа В – вызванные внутренними соотношениями у рассчитыва-

емых показателей. Для типа В смена формы в (1) происходит после сравнения соотношений значений у внутренних модельных переменных, которые связаны с расчетами вспомогательных показателей уравнений в модели для $w(t)$. Идея использовать сопутствующие характеристики позволит разнообразно расширять базовую модель, это необходимо, так как популяционные процессы даже без влияния промысла чрезвычайно вариативны. Предположим типичную зависимость между темпами роста молодежи и ее смертности [11]. Основная структура каркаса (1) должна решаться численно во взаимосвязи со вспомогательным показателем – индексом размерного развития $w(t)$ особей поколения:

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

где δ – корректирующий показатель, σ – фиксировано отражает обилие пищевых ресурсов.

Будем использовать вычисления с $R=N(T)=\varphi(N(0))$ для численного анализа итераций $R_{n+1}=\varphi(R_n)$. Математическую основу анализа модели составит теория динамики неунимодельных итераций с незнакопостоянным шварцианом, а биологическое обоснование строится на теории формирования пополнения популяций [12], нескольких типов зависимости между величинами запаса и эффективностью его воспроизводства.

3. Жесткие и мягкие структурные трансформации

Получив функциональную зависимость $N(0) \rightarrow N(T) = \varphi(N(0))$ после численного решения уравнений с $N(0) = \lambda S$ в (1) вместе с (2) для всех биологически допустимых значений $N(0) \in \mathbb{N}$, можно оценить динамические свойства итераций $\varphi(\dots\varphi(x_0))$ этой зависимости. S – численность готовый к размножению части популяции со средней плодовитостью λ . Не все изменения в регуляции бывают жесткими и пороговыми. Биологически недостоверно изменять скачком базовые популяционные характеристики. При малой численности велика роль неблагоприятных факторов в воспроизводстве популяций [13]. Мы разработали метод учета непостоянства факторов в форме точечного внедрения в базовую предикативно переопределяемую динамическую систему триггерных функций – варьирующихся коэффициентов $\Psi(n) \neq \text{const}$ для итераций $\varphi^n(x_{n-1}, \Psi(n))$, но только с ограниченным диапазоном их значений. Функции «триггеры» должны быть постоянны на всем кадре непрерывного модельного времени и менять свое значение функции-триггеры в расчетах будут при смене но-

мера кадра $n := n+1$. Модель в вычислительной среде Rand Model Designer можно адаптировать для нескольких совместно живущих и даже конкурирующих поколений.

В уравнении убыви численности поколения разделены коэффициенты смертности: квадратичный αN^2 и линейный βN . Величина $w(t)$ при параметре α учитывает быстрое исчерпание необходимых для развития ресурсов по мере повышения общей биомассы личинок. Важно учитывать потери воспроизводства на стадии с t_0 . Эффект потерь может резко проявиться именно низкой плотности $S \rightarrow \min \varphi$ половозрелых особей [14]. Эффект потерь репродуктивной активности реализован в модели динамическим коэффициентом вместе с βN . Влияние его зависит от величины родительской популяции S , из которого мы рассчитывали начальные условия $N(0)$. Уровень влияния Ψ нужно ограничивать. Область значений «функции-триггера» $E(\Psi)$ справа имеет конечный предел и далее Ψ «не вмешивается» в расчеты, что позволит реализовать выключение действия фактора гладко:

$$\Psi(S) = 1 + \exp(-\zeta S^2), \lim_{S \rightarrow \infty} \Psi(S) = 1, \Psi(0) = 2, \quad (3)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha w(t) N^2(t) - \Psi[S] \beta N(t),$$

где параметр $\zeta < 1$ отражает уровень экспрессивности порогового эффекта потерь.

Таким способом мы учли мягкие и гладкие изменения регуляции, тогда как в гибридной системе описали жесткие и пороговые изменения динамики убыви численности молодежи.

4. Сценарий коллапса промысловой популяции краба

Деграция биоресурсов происходит либо постепенно, либо в форме коллапса. Резкий коллапс запасов принципиально отличен от затянутого и монотонного их истощения. Исчезновение промысловых запасов трески у берегов Северной Америки – сокрушительный коллапс по экономическим последствиям от мгновенного прекращения промысла начиная с 1992 г. и без его восстановления [15]. Многие авторы обсуждали ситуацию с деграцией трески, рассматривались ошибки в регуляции рыболовства, недостоверность оценки запаса, погрешность методов, селективность изъятия, сопутствующие природные факторы. Ихтиологические комиссии не выработали консенсуса о причинах коллапса. Так всегда бывает, когда есть среди экспертов несколько материально заинтересованных сторон. Мы предложили модель для коллапса трески [16], где ситуация развивалась после потери неустойчивого

равновесия, а главным неучтенным фактором являлось усиление каннибализма трески при обилии собственной молоди.

Несколько иных по динамике ситуаций краха промысла случались ранее, просто те события коллапса не привлекли всеобщего внимания. Канадский тресковый кризис долго рассматривался как уникальный, потому мы приведем другой интересный с точки зрения моделирования и не очень известный пример динамики деградации ценных запасов. На рис. 1 данные о коллапсе запаса камчатского краба в 1985 г. у Алеутского полуострова и прилегающих островов в Тихом океане при ведении регулируемого квотами и селективного по размерам особей промысла [17]. Пик вылова краба был достигнут в 1966 г., и до момента коллапса прошло гораздо больше времени, чем в случае трески Канады, где путь от пика до коллапса и моратория на промысел занял 14 лет.



Рис. 1. Динамика промысла краба у берегов Аляски с коллапсом в 1985 г. из [17]

На графике, где показана динамика массы уловов M млн фунтов краба Аляски, видны два резких падения, связанные со снижением величины запаса S . Между кризисами прошло 18 лет активного вылова краба. В сценарной модели удобнее рассчитывать вместо массы численность особей Y_n , изымаемых из запаса S в сезон промысла. Случай коллапса краба математически интересен, так как явный колебательный режим у численности запаса очевиден между первым и окончательным кризисом промысла. Сценарий локальной гибели популяции камчатского краба отличается от динамики трескового кризиса именно осциллирующим переходом. Для трески наблюдалась псевдостабильзация. Предвидеть быстрый коллапс и понять его причины статистикам оказалось сложно, ведь для вариативности сценариев модели оказывается треска *Gadus morhua* и краб *Paralithodes camtschaticus* – это живущие долго крупные хищники, и считалось, они не смогут коллапсировать как анчоус.

5. Анализ вычислительной структуры

Численное решение предикативной модели с вычислением $N(T)$ используем для расчета функциональных итераций: $R_{n+1} = \varphi(R_n) - q_n R_n$, где $q \in [0,1)$ – доля промыслового изъятия. При регулируемом промысле q устанавливается экспертами на каждый сезон n . Важнейшим параметром модели для изменения сценариев поведения оказывается плодovitость λ .

В итерациях мы получим разделение множества доступных начальных точек R_0 траекторий неустойчивой «репеллерной» точкой. Так, итерации получают две области притяжения у двух конкурирующих аттракторов. Зависимость φ будет обладать более чем одним максимумом, но для нас важно положение первого от начала координат максимума R_{max} и локального минимума R_{min} , что $R_{min} > R_{max}$, но значимо $\varphi(R_{max}) > R_{min}$. Таким образом, для неунимодальной функции не выполняются два условия теоремы Синджера [18], которые необходимы для реализации сценария перехода к глобальному хаотическому аттрактору через каскад бифуркаций удвоения периода цикла (сценарий Фейгенбаума, Шарковского, Манницкого), так как в некоторый момент при плавном изменении параметра λ у такой модели возникнут два альтернативных цикла четного периода $p = 2$.

Арсенал описательных средств динамики итераций широк, но ограничен. Для итераций $R_{n+1} = \varphi(R_n)$ доступны три топологические формы аттракторов: цикл конечного периода или точка равновесия $x^* = \varphi(x^*)$, аттрактор подобный канторовскому множеству и интервальный аттрактор, в виде конъюгации бесконечного множества отрезков. Для итераций (с учетом изменяющегося внешнего возмущения) $x_n = f(x_{n-1}) \pm \Theta(n)$ есть три типа бифуркаций – перестроений типа и числа аттракторов, которые бывают прямыми и обратными. Аттракторы, отличные от циклов, могут моментально терять свойство инвариантности $f(\Lambda) \in \Lambda$, что зависит от положения у границы $\partial\Omega$ их области притяжения Ω . Аттрактор может разбиться на части или пересечься с границей $\partial\Omega \notin \Omega$ своей области притяжения $\Omega: \forall x_0 \in \Omega, \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi^n(x_0) = \Lambda$ и в этом момент фиксируется ситуация кризиса. Так топология пересеклась с биокибернетикой.

6. Анализ сценария управления при коллапсе с флуктуациями

Рассмотрим динамику сценария коллапса в эксперименте с логикой управления промысловым изъятием. Для математической реализации подобного сценария деградации как на рис. 1 из двух

этапов мы предлагаем сценарий с двумя метаморфозами в динамике итераций. Для чего необходимо получить зависимость при решении трех склеенных задач Коши с четырьмя возрастающими $R_1^* < R_2^* < R_3^* < R_4^*$ нетривиальными стационарными $\varphi(R_i^*) = R_i^*$ состояниями. Первый метаморфоз мы получим, системно увеличивая q долю изъятия, что вызовет обратную касательную бифуркацию у R_4^* – слияния устойчивого с неустойчивым равновесием и в результате потерю притягивающего наибольшего состояния равновесия. Для нужного перестроения фазового портрета необходимо иметь три неустойчивые стационарные точки при сохранении устойчивости нулевого равновесия. Гибридная система уравнений в вычислительных сценариях масштабирует итоговую зависимость вдоль оси S . Нам актуально целенаправленно изменять положения экстремумов $\varphi(R)$, как показано на рис 2 (кривые модельной зависимости относительно биссектрисы координатного угла) из-за внешних условий. Функция-триггер Ψ не меняет относительное положение у четвертого устойчивого равновесия R_4^* , но действует на положение $\min\varphi(R)$ относительно предкритического неустойчивого репеллера R_2^* . Важное свойство для проекций точек экстремумов локального максимума и минимума: $\varphi(R_{max}) > R_{min}$, максимум отображается всегда правее минимума.

Второй метаморфоз фазового портрета модели – пограничный кризис интервального аттрактора, который остается после слияния устойчивого и неустойчивого равновесий. Эффект происходит при соприкосновении Λ с границей его области притяжения. Пусть существует окрестность локального максимума, где φ немного превосходит значение φ в точке третьего репеллера $\varphi(\max\varphi(N(0)) \pm \varepsilon) > R_3^*$. Когда начальное положение точки траектории $R_0 < R_3^*$ еще и соответствует подмножеству из интервала $R_0 \in (R_1^*, R_3^*) \cap \{\varphi^{-n}(R_2^*)\}$, то через режим псевдостохастических флуктуаций популяция краба

достигнет уровня высокой устойчивой численности за конечное число шагов: $\varphi^{\vartheta}(R_0) = R_4^*$, $\vartheta < \infty$. Как $\{\varphi^{-n}(R_2^*)\}$ обозначим совокупное множество точек-прообразов у второго репеллера R_2^* . Эти прообразы исключены из области притяжения, и они никогда не притягиваются к аттракторам. Если для R_2^* есть прямые прообразы и справа и слева от точки, это сделает несвязной Ω_2 – область притяжения R_4^* . Репеллер R_2^* существует во всех модельных сценариях и всегда имеет прообразы и справа, и слева. Точки R_3^*, R_4^* могут исчезать после обратной касательной бифуркации. Точка R_1^* у φ аналогично существует во всех сценариях, но наличие прообраза у первого репеллера зависит от действия Ψ .

Составим набор параметров вычислительно-эксперимента для ситуации, когда промысловая популяция краба после нестабильного существования восстановилась – до устойчивого равновесия и оптимального для своей кормовой базы. Основой для оценки станет модельный сезон из 12 модельных месяцев. Уловы краба $Y = R_n q_n$ без форсирования мощностей промысла увеличиваются. После спонтанного роста $Y \rightarrow \max$ эксперты принимают обоснованное решение о поднятии $\bar{q}_n = 0,62$ годовой квоты. Совершенно логично, что уловы краба четыре первых сезона после увеличения изъятия показывают исторически рекордные для промысла значения. После трех удачных сезонов уловы резко падают. Объемы промысловых запасов краба минуют локальный минимум кривой воспроизводства φ , избегая попадания в ε -окрестность R_1^* критического состояния.

Прогнозы экспертов согласно действующей статистической методике приняли во внимание высокую эффективность воспроизводства краба в предыдущие пять лет. Уловы после первого падения достоверно начинают возвращать былые объемы. У экспертов нет причин для корректировки управления промыслом с целью понижения доли изъятия q .

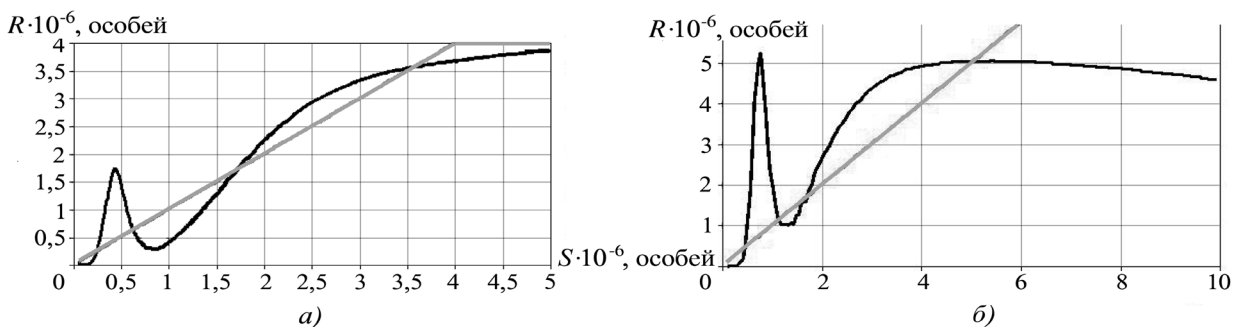


Рис. 2. Трансформация экстремумов и нетривиальных равновесий у функциональной зависимости $\varphi(\lambda S)$, а – при $\min\varphi(R) < R_2^*$, $\max\varphi(R) > R_3^*$; б – $\min\varphi(R) > R_2^*$, $\max\varphi(R) > R_4^*$

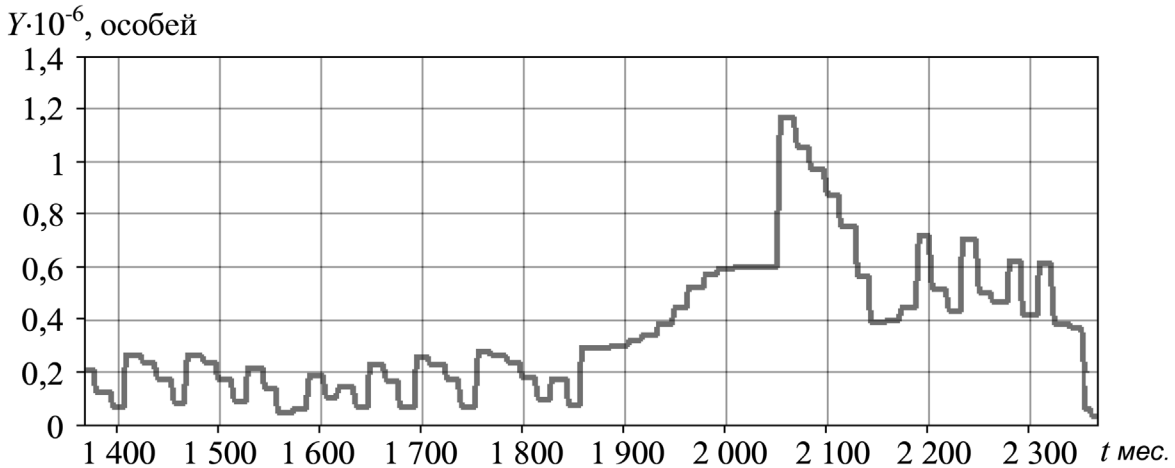


Рис. 3. Вычислительный сценарий динамики уловов в ситуации коллапсирования запасов

Продолжительность роста величины уловов Y после минимума связана со волатильными факторами. Величина запаса после усиления промышленного давления срывается в аperiodический режим, но в ограниченной области значений. Эксперты увидят колебания не около точки покоя, но более похожие на обычные стохастические, вызванные нестабильностью условий среды. Решение о минимизации доли изъятия до $q=0,12$ после интенсивных колебаний отвергается. В при установленном $q=0,3$ после прохождения минимума в сценарии мы наблюдаем безвозвратное падение уловов (рис. 3).

Второе падение уловов краба и получило название «коллапса», тогда как на первое сокращение уловов мало обращали внимания, хотя в процентном выражении первое падение уловов явно больше. При первом кризисе уловы резко сократились в 4 раза, что не повлекло сезонный мораторий на промысел. Промысел был продолжен при нестабильных флуктуациях запаса краба с неизменным промысловым усилием и умеренно благоприятном прогнозе. По принципам нелинейной динамики такое поведение расценивается как признак наличия критических точек, но методы статистики не могут установить точки для запаса, где функция связывающая «запас-пополнение» негладкая, более походит на ступенчатую.

Моделирование показало, что путь к финальному кризису состоит из двух переходных режимов. В вычислительном эксперименте сценарий коллапса промысловых запасов камчатского краба в 1985 г. развивается из двух фаз, и их продолжительность зависит от повышения \bar{q}_n при интенсификации вылова. Если не введен своевременный мораторий, вторая фаза деградации произойдет решительным образом через 10 модельных сезонов в формате модельного времени вычислительной

среды с переходом через порог критического неустойчивого равновесия. Воспроизводство популяции краба после фазы деградации $R_1^* > \min \varphi(\lambda S)$ не восполняет даже естественную убыль родительских поколений, необходим приток особей из других ареалов вида и интродукция взрослых крабов.

Заключение

Коллапсы камчатского краба в 1985 г. и трески спровоцированы представлениями о слишком благополучном состоянии данных биоресурсов, и главное – завышением оценки эффективности восполнения запасов. Перед критическим порогом эффективность воспроизводства согласно нашей модели достаточно высока, что вносит обманчивые ожидания. Сценарии коллапса в модели подтверждают, что идеи организации оптимальной, наиболее выгодной стратегии эксплуатации биоресурсов в реальности несостоятельны и опасны. Оптимальное для промысла состояние будет близко к критическому порогу, достаточно небольшой ошибки в оценках для обрушения промысла. Рациональной тактикой для регуляции мы полагаем жесткое ограничение для физических возможностей промысла (тоннаж судов, запасы горючего, размеры ячеи и площадь тралов), но не лимитирование объема добычи Y . Оригинальность нашего моделирования коллапса в том, что явление в сценарии развивается по внутренней логике обычного экспертного управления рыболовством.

Свойства нерегулярных колебаний – следствие формы кривой с экстремумами. В том числе нестабильность промежуточных результатов при разном положении начальной точки траектории R_0 связаны с изрешеченной областью I в фазо-

вом пространстве. Отрезок включает рассеянное континуальное множество субинтервалов из областей притяжения Ω_1, Ω_2 двух аттракторов Λ_1, Λ_2 , но границы всех субинтервалов не принадлежат к этим областям притяжения и формируют отдельное множество, инвариантный «странный репеллер». Известен ряд хаотических режимов в динамике итераций [19] и не связанных с замкнутыми притягивающими множествами, в англоязычных работах говорят о «horseshoe dynamics» или об явлении «chaotic scattering».

Границы области I определяют отображения точек $R_{min} > R_{max}$, что $I = [\varphi(R_{min}), \varphi(R_{max})]$ двух экстремумов модельной зависимости, но не фиксированный интервал $[R_1^*, R_3^*]$, так как существование R_3^* зависит от q . Изрешеченной называют потому, что начальные точки $R_0 \in [\varphi(R_{min}), \varphi(R_{max})]$, которые могут притягиваться к аттрактору, всюду соседствуют с непритягивающимися к R_4^* . Из интервала I исключены объединение множеств тех точек, которые под действием итераций отображаются в неустойчивые репеллерные положения равновесия. Когда неустойчивые стационарные точки на графике у зависимости эффективности пополнения φ имеют более одного прямого прообраза, такой точки R_2^{-1*} которая при первой итерации отобразится в репеллер $\varphi(R_2^{-1*}) = R_2^*$. Тогда возникает апериодический режим. Как $\varphi^{-1}(R_2^*) = R_2^{-1*}$ обозначим обратную итерацию функции φ в правый прообраз точки R_2^* .

Когда происходит обращенная касательная бифуркация, то неустойчивая и устойчивая точки R_3^*, R_4^* сливаются в одну критическую $R_N^*, \varphi'(R_N^*) = 1$, которая исчезает. Так, опишем первое падение уловов краба. Интервал I между отображениями экстремумов функции φ будет включать внутри себя и интервальный аттрактор $\Lambda \subset [\varphi(R_{min}), \varphi(R_{max})]$. В порядке перечисления теоремы Гукенхэймера [20] этот топологический тип ω -предельных множеств итераций третий из трех возможных типов аттракторов. I именно содержит в интервального типа аттрактор $\Lambda \subset I$, где Λ – замкнутое инвариантное подмножество I , но Λ несвязно, так как любая ε -окрестность точки $\forall R_0 \in \Lambda$ тут содержит не притягивающиеся точки из инвариантного и континуального множества Y , минимально состоящего из всех прообразов R_2^* , имеющей и правый и левый прямые прообразы: $\{\varphi^{-n}(R_2^{-1*}), \varphi^{-n}(R_2^{-1*})\}$. Подмножество «странный» репеллера составит все объединение рассеянных в I точек R_0

без притяжения: $Y = \bigcup_n \varphi^{-n}(R_2^*), \varphi^{-n}(R_1^*), \varphi^{-n}(R_3^*)$.

Дискретная составляющая траектории начальной точки $\{\varphi^n(R_0)\}, R_0 \notin \{\varphi^{-n}(R_2^*)\}$ обладает возмож-

ностью попадания в ε -окрестность хаотического репеллера Y , состоящего из множества всех непритягивающихся точек и возникающего при изменении положения экстремумов зависимости $\varphi(R)$. Далее при выполнении $\exists R_0, R_0 \in I, R_0 \notin Y$ и $\varphi(R_0) < R_1^*$ уже интервалы в Λ не будут более замкнутым и инвариантным подмножеством, где выполняется условие $\varphi(\Lambda) \in \Lambda$. В I наблюдаем хаотическое движение в конечном числе итераций $\varphi^k, 0 < k < \infty$ с одним вариантом завершения режима хаотизации $\lim_{n \rightarrow d} \varphi^n(R_0) = 0, k < d < \infty$.

После первого падения численности для популяции эти перестроения означают резкий переход в состояние сильных нерегулярных флуктуаций с выраженными пиками, но это обратимое состояние. Популяция может восстановиться, если немедленно принять управленческое решение и значительно уменьшить изъятие до $0,4q$. Коллапсы запасов рыб случаются не только из-за действия плохо регулируемого промысла [22].

Помимо положения репеллеров, длительность нерегулярных колебаний при интенсивном промысловом воздействии зависит от положения кривой φ в ее минимуме. Когда происходит смещение значения $\varphi(R)$ в экстремуме R_{min} вниз по оси ординат и $\varphi(R_{min}) < R_1^*$, то реализуется граничный кризис для аттрактора Λ , составленного из множества интервалов, тогда появляются точки $\exists x_0 \in \Lambda, \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi^n(x_0) = 0$. В англоязычной литературе есть термин «leaky», когда аттрактор становится «испещренным». Точка R_1^* – неустойчивое равновесие для популяции при критической численности, если $R_0 < R_1^* - \varepsilon$, то реализуется необратимая деградация запаса за конечное число итераций $\varphi^k(R_0) = 0$. Сценарий отражается в простой форме $R_0 \notin Y, \varphi^k(R_0) = 0, k < \infty$. Длительность апериодических режимов непостоянная из-за чувствительности к возмущениям $R_0 \pm \varepsilon$ у точки, которую мы выберем как начальную в вычислительном эксперименте, но это воспроизводит естественную неопределенность для любого объекта промысла в северных широтах.

В теории функциональных итераций известны три нелинейных явления, называемые кризисами [21]. Помимо кризиса столкновения с границей «basin-boundary crisis» выделен внутренний кризис и кризис слияния «merging crisis», специфичный для сценария удвоения периода $p=2^i, i \rightarrow \infty$ у циклов. Кризисы не обусловлены трансформациями топологических типов аттракторов, но связаны с перестроениями положения аттрактора и соседних с ним неустойчивых инвариантных множеств. При эффекте граничного кризиса аттрактор Λ , в нашем случае состоящий из континуума неупорядоченных и не-

связных между собой интервалов, приходит в соприкосновение с левой гранью области Ω . Фрактальные подмножества у итераций часто трудно интерпретировать в биологии. Мы не сравниваем известные методы построения компьютерных моделей (гибридные, дискретно-непрерывные, итерационные, графовые, логико-событийные и др. [23]) между собой по качествам и недостаткам, так как это инструменты для моделирования различных систем и явлений.

Литература

1. *Абакумов А.И., Бочаров Л.Н., Решетняк Т.М.* Оптимальное распределение квот для многовидовых промыслов на примере карагинского промыслового района // Вопросы рыболовства. 2009. Т. 10. № 2 (38). С. 352-363.
2. *Costello C.* The Economic Value of Rebuilding Fisheries // OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers. 2012. № 55. P. 1-69.
3. *Pinsky M.L., Jensen O.P., Ricard D.* Unexpected patterns of fisheries collapse in the world's oceans // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2011. Vol. 108. P. 8317-8322.
4. *Борисова Т.Ю., Соловьева И.В.* Проблемные аспекты моделирования популяционных процессов и критерии их согласования // Математические машины и системы. 2017. № 1. С. 71-81.
5. *Переварюха А.Ю.* Гибридная модель развития локально взрывообразного популяционного процесса насекомого // Труды ИСА РАН. 2015. Т. 65. № 2. С. 94-104.
6. *Clark L.R.* The population dynamics of *Cardiaspina albitextura* (Psyllidae) // Australian Journal of Zoology. 1964. Vol. 12. № 3. P. 362-380.
7. *Михайлов В.В.* Моделирование динамики биогенной нагрузки при оценке эффективности восполнения биоресурсов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 4. С. 103-110.
8. *Соколов А.В.* Моделирование эволюции популяций с возрастной структурой: связь рождаемости со скоростью изменения среды // Труды ИСА РАН. 2014. Т. 64. № 3. С. 53-59.
9. *Магницкий Н.А.* О переходе к хаосу в одной модели динамики популяций // Труды ИСА РАН. 2020. Т. 70. № 2. С. 71-74.
10. *Dubrovskaya V.A., Trofimova I.V.* Model of dynamics of structured subpopulations of sturgeon fish in the Caspian Sea takes into account deviations in the rate of development of immature fish // Journal of the Belarusian State University. Biology. 2017. № 3. P. 76-86.
11. *Чурова М.В., Мецзякова О.В., Немова Н.Н., Шатуновский М.И.* Соотношение роста и некоторых биохимических показателей рыб на примере микижи *Parasalmo mykiss* Walb // Известия РАН. Серия биологическая. 2010. № 3. С. 289-299.
12. *Kriksunov E.A.* Theory of recruitment and interpretation of fish population dynamics // Journal of Ichthyology. 1995. Vol. 35. № 7. P. 10-37.
13. *Veshchev P.V., Guteneva G.I.* Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the lower Volga under current conditions // Russian Journal of Ecology. 2012. Vol. 43, № 2. P. 142-147.
14. *Борисов В.М., Елизаров А.А., Нестеров В.Д.* Роль нерестового запаса в формировании пополнения северо-восточной атлантической трески *Gadus morhua* // Вопросы ихтиологии. 2006. Т. 46. № 1. С. 77-86.
15. *Roughgarden J., Smith F.* Why fisheries collapse and what to do about it // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1996. Vol. 93. P. 5078-5083.
16. *Переварюха А.Ю.* Comparative modeling of two especial scenarios of bioresources collapses: Canadian Atlantic cod and Caspian Sea sturgeon // Journal of Automation and Information Sciences. 2017. Vol. 49. № 6. P. 22-34.
17. *Dew B., McConnaughey R.* Did trawling on the brood stock contribute to the collapse of Alaska's king crab? // Ecological Applications. 2005. Vol. 15. P. 919-941.
18. *Singer D.* Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval // SIAM Journal of Applied Math. 1978. Vol. 35. P. 260-268.
19. *Гонченко С.В., Гонченко А.С., Малкин М.И.* О классификации классических и полуориентируемых подков в терминах граничных точек // Нелинейная динамика. 2010. Т. 6. № 3. С. 549-566.
20. *Guckenheimer J.* Sensitive dependence on initial conditions for one dimensional maps // Comm. Math. Physics. 1979. Vol. 70. P. 133-160.
21. *Grebowicz C., Ott E., Yorke J.A.* Crises, sudden changes in chaotic attractors, and transient chaos // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1983. Vol. 7, Iss. 1-3. P. 181-200.
22. *Никитина А.В., Сухинов А.И., Угольницкий Г.А., Усов А.Б.* Оптимальное управление устойчивым развитием при биологической реабилитации Азовского моря // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 7. С. 96-106.
23. *Дубровская В.А.* О критериях обоснованности для анализа нелинейных эффектов в моделях эксплуатируемых популяций // Проблемы механики и управления: Нелинейные динамические системы. 2016. № 48. С. 74-83.

Переварюха Андрей Юрьевич. Федеральное государственное учреждение Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия. Старший научный сотрудник лаборатории Прикладной информатики. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: 81. Область научных интересов: вычислительная математика, моделирование биологических процессов, сравнительная экодинамика, анализ гибридных систем управления. E-mail: temp_elf@mail.ru.

Model for the scenario of bioresources depletion under expert management of exploitation strategy

A.Y. Perevaryukha¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract. We have developed a scenario approach for modeling natural processes under controlled anthropogenic impact. Determining a rational exploitation strategy for large predator species remains one of the controversial problems, and weakly formalized expert methods of fishery management are used for this task. Methods for determining commercial withdrawal quotas for other biological resources, which have previously worked successfully for some objects, can lead to long-term degradation of populations. We have developed a model of population reproduction with a hybrid time and with an algorithm that changes the regulation function depending on the current state of the stock. On the basis of the proposed computational model and typical logic of decision-making when changing the fishing impact, an oscillating scenario of collapse is considered on the example of red king crab *Paralithodes camtschaticus*. The dynamics of the new model with sharp fluctuations in abundance leads to the collapse of the fishery, when experts can expect a recovery of these stocks. The scenario model uses transformations of the phase portrait: disconnected boundaries of the attraction basins of attractors and a strange repeller, direct and inverse tangent bifurcations of stationary points, an attractor in the form of a set of disconnected intervals. Stochastic effects arise in this deterministic population model.

Keywords: *biocybernetics, formalization of expert management of biological resources, logical-hybrid systems, event hierarchical time, collapse scenarios, fractal boundaries, strange repeller, nonunimodal iterations, singular points.*

DOI: 10.14357/20790279210304

References

1. *Abakumov A.I., Bocharov L.N., Reshetnyak T.M.* 2009. Optimal'noye raspredeleniye kvot dlya mnogovidovyykh promyslov na primere karaginskogo promyslovogo rayona [Optimal allocation of quotas for multi-species fisheries on the example of the Karagin fishing area]. *Voprosy rybolovstva* [Issues of fishing] 10 (2): 352-363.
2. *Costello C.* 2012. The Economic Value of Rebuilding Fisheries. *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers* 55: 1-69.
3. *Pinsky M.L., Jensen O.P., Ricard D.* 2011. Unexpected patterns of fisheries collapse in the world's oceans // *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 8317-8322.
4. *Borisova T.Y., Solov'yeva I.V.* 2017. Problemnyye aspekty modelirovaniya populyatsionnykh protsessov i kriterii ikh soglasovaniya [Problematic aspects of modeling population processes and criteria for their agreement]. *Matematicheskiye mashiny i sistemy* [Mathematical machines and systems] 1: 71-81.
5. *Perevaryukha A.Yu.* 2015. Gibridnaya model' razvitiya lokal'no vzryvoobraznogo populyatsionnogo protsessa nasekomogo [A hybrid model of the development of a locally explosive population process of an insect]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 65 (2): 94-104.
6. *Clark L.R.* 1964. The population dynamics of *Cardiaspina albitextura* (Psyllidae). *Australian Journal of Zoology* 12(3): 362-380.
7. *Mikhaylov V.V.* 2017. Modelirovaniye dinamiki biogennoy nagruzki pri otsenke effektivnosti vospolneniya bioresursov [Simulation of the dynamics of biogenic load in assessing the efficiency of replenishment of biological resources]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Information and control systems] 4: 103-110.
8. *Sokolov A.V.* 2014. Modelirovaniye evolyutsii populyatsiy s vozrastnoy strukturoy: svyaz' rozhdayemosti so skorost'yu izmeneniya sredi [Modeling of evolution of populations with age structure: relationship of birth rate to the rate of change in the environment].

- ling the evolution of populations with age structure: the relationship between fertility and the rate of environmental change]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 64 (3): 53-59.
9. *Magnitskiy N.A.* 2020. O perekhode k khaosu v odnoy modeli dinamiki populyatsiy [On the transition to chaos in one model of population dynamics]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 70 (2): 71-74.
 10. *Dubrovskaya V.A., Trofimova I.V.* 2017. Model of dynamics of structured subpopulations of sturgeon fish in the Caspian Sea takes into account deviations in the rate of development of immature fish. *Journal of the Belarusian State University. Biology* 3: 76–86.
 11. *Churova M.V., Meshcheryakova O.V., Nemova N.N., Shatunovskiy M.I.* 2010. Sootnosheniye rosta i nekotorykh biokhimicheskikh pokazateley ryb na primere mikizhi *Parasalmo mykiss* Walb [he ratio of growth and some biochemical parameters of fish on the example of *mykiss Parasalmo mykiss* Walb]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya* [Herald of the Russian Academy of Sciences. Biological series] 3: 289-299.
 12. *Kriksunov E.A.* 1995. Theory of recruitment and interpretation of fish population dynamics. *Journal of Ichthyology* 35 (7): 10-37.
 13. *Veshchev P.V., Guteneva G.I.* 2012. Efficiency of natural reproduction of sturgeons in the lower Volga under current conditions. *Russian Journal of Ecology* 43 (2): 142-147.
 14. *Borisov V.M., Yelizarov A.A., Nesterov V.D.* 2006. Rol' nerestovogo zapasa v formirovaniy popoleniya severo-vostochnoy atlanticheskoy treski *Gadus morhua* [The role of the spawning stock in the formation of recruitment of the northeastern Atlantic cod *Gadus morhua*]. *Voprosy ikhtologii* [Issues of ichthyology] 46 (1): 77-86.
 15. *Roughgarden J., Smith F.* 1996. Why fisheries collapse and what to do about it. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93: 5078-5083.
 16. *Perevaryukha A.Yu.* 2017. Comparative modeling of two especial scenarios of bioresources collapses: Canadian Atlantic cod and Caspian Sea sturgeon. *Journal of Automation and Information Sciences* 49 (6) 22-34.
 17. *Dew B., McConnaughey R.* 2005. Did trawling on the brood stock contribute to the collapse of Alaska's king crab? *Ecological Applications* 15: 919–941.
 18. *Singer D.* 1978. Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval. *SIAM Journal of Applied Math.* 35: 260-268.
 19. *Gonchenko S.V., Gonchenko A.S., Malkin M.I.* 2010. O klassifikatsii klassicheskikh i poluorientiruyemykh podkov v terminakh granichnykh tochek [On the classification of classical and semi-orientable horseshoes in terms of boundary points]. *Nelineynaya dinamika* [Nonlinear Dynamics] 6 (3): 549-566.
 20. *Guckenheimer J.* 1979. Sensitive dependence on initial conditions for one dimensional maps. *Comm. Mathem. Physics* 70: 133-160.
 21. *Grebogi C., Ott E., Yorke J.A.* 1983. Crises, sudden changes in chaotic attractors, and transient chaos. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 7 (1–3): 181-200.
 22. *Nikitina A.V., Sukhinov A.I., Ugol'nitskiy G.A., Usov A.B.* 2016. Optimal'noye upravleniye ustoychivym razvitiyem pri biologicheskoy reabilitatsii Azovskogo morya [Optimal management of sustainable development in biological rehabilitation of the Sea of Azov]. *Matematicheskoye modelirovaniye* [Mathematical modeling] 28 (7): 96-106.
 23. *Dubrovskaya V.A.* 2016. O kriteriyakh obosnovannosti dlya analiza nelineynykh effektov v modelyakh ekspluatiruyemykh populyatsiy [On the validity criteria for analysis of nonlinear effects in models of exploited populations]. *Problemy mekhaniki i upravleniya: Nelineynyye dinamicheskoye sistemy* [Problems of Mechanics and Control: Nonlinear Dynamical Systems] 48: 74-83.

Perevaryukha Andrey Yurievich. St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia. Senior Researcher, laboratory of Applied Informatics, candidate of technical sciences. Number of publications: 81. Research interests: computational mathematics, modeling of biological processes, comparative methods in ecodynamics, analysis of hybrid control systems. E-mail: temp_elf@mail.ru.