

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.6

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-51-68

Метод гибридного моделирования критических состояний для анализа экспертно управляемых адаптивных процессов*

А.Ю. ПЕРЕВАРЮХА

РФ, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Национальный исследовательский университет ИТМО

madelf@rambler.ru

Статья посвящена методам гибридного моделирования резко трансформирующихся процессов в адаптивных биоинформационных системах. Отсутствие альтернативных методов регуляции и корректировки решений часто ведет к необратимому истощению ресурсов при систематической переоценке норм воздействия. Одной из проблем регулирования является ситуация с внезапным кризисом ранее внешне стабильных природных, социальных или экономических процессов. Переход к безвозвратной деградации развивается в форме внезапно обнаруженного сокращения ресурсов или капитализации акций. Важные сценарии кризисов не были выявлены в прогнозах экспертами, использующими для управления искаженную информационную проекцию реальной ситуации по усредненным оценкам репродуктивного потенциала запасов. В работе установлена причина ошибочных экспертных прогнозов и исследованы критические состояния с резким падением темпа восполнения. Для анализа системного коллапса рассмотрены методы моделирования пороговых явлений. Предложены уравнения с включением неустойчивого критического равновесия, но они не описывают ситуацию ложной стабилизации. Развивается метод с включением в гибридные структуры модели адаптивных функций, гибко изменяющих величину восполнения используемых активов в зависимости от их прошлого состояния. Метод с событийным переключением правой части уравнений и с включением факторов убыли при изменениях стадии процесса описывает пороговые эффекты, влияющие на принятие решений экспертами при управлении активами. Модификации гибридных структур показали широкие возможности по результатам метода сравнения в серии модельных сценарных экспериментов. Получены многообразные нелинейные формы зависимости запаса и воспроизводства, используемой как функциональные итерации. Исследован сценарий «кризис при регулировании» для ценных возобновляемых ресурсов с переходными режимами флуктуаций, сложными для оценки состояния экспертами и принятия решений. Нелинейные процессы в форме коллапса актуальны для кризисных ситуаций на фондовых рынках или всплеска ажиотажной активности в социальных сетях.

* Статья получена 11 февраля 2026 г.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИТМО № FSER-2025-0013.

Ключевые слова: гибридные структуры, предикативные формы правой части, иерархии дискретных событий, сценарии, эксперименты, критические неустойчивые точки, коллапс, логика экспертного управления, природопользование, биоресурсы, имитация выбора решений

ВВЕДЕНИЕ

Детерминистический вариант интерпретации Хью Эвереттом квантовой механики со множеством миров предполагает, что каждый возможный исход квантового события реально реализуется, но в своей отдельной версии вселенной и в такой модели вместо коллапса волновой функции процесс разделяется на множество ветвей. Это сложная теория, выходящая за рамки интуитивного восприятия и не имеющая экспериментального подтверждения. Схожая картина в социобиофизических процессах [1], которые возникают при вмешательстве хозяйственной деятельности на основе регулируемых социально-экономических отношений в циклы естественных живых систем. Разделение сценариев развития событий в исходно идентичных клетках на множество ветвей реально изучается. Более того, вариативность необходима для адаптивной эволюции. Во всех здоровых клетках копируется одинаковая ДНК, но в разных условиях и при спонтанно возникающих обстоятельствах эта информация реализуется по-разному. Алгоритм запуска работы гена или триггер для отключения регуляторного гена может быть нарушен. Несработавший ген детерминации пола приводит к развитию фенотипа самки при наличии Y-хромосомы, так как функция некоторых генов заключается в активации каскада работы цепочки других генов. Обстоятельства могут быть реакцией на фактор, часто называемый стрессом. Спонтанная активация регуляторного гена переключает использование энергии с глюкозы на расщепление жиров и позволяет регулировать расход энергии в особой ситуации, которую организм расценивает как кризисную. Например, кризисное переключение происходит во время острой вирусной инфекции [2]. Биофизические процессы по своей природе изменчивы, прерывисты, событийно трансформируются и часто имеют альтернативные варианты развития [3], у ряда инфекций есть разные нозологические формы. Коронавирус в клетке препятствует запуску альтернативной трансляции генов, которые отвечают за включение синтеза интерферонов и цитокинов. В итоге трансформаций процессов синтеза РНК в наших клетках даже близкие родственники по-разному переносят инфекцию, так как самый опасный эффект этой болезни, «цитокиновый шторм», опосредован альтернативными вариантами событий при дисрегуляции механизмов активации и торможения иммунного ответа. Обычно являясь передовым защитником, система комплемента может стать опасной при нарушении регуляции ответа, усиливая хроническое воспаление, и это будет отдельный сценарий процесса.

Математическое описание ряда стремительных биофизических явлений требует разработки оригинальных методов [4]. В отличие от физики теории струн с ее многомерными пространствами, для социальных и биотических моделей необходимо пользоваться легко интерпретируемым, простым и понятным математическим аппаратом. На рынке акций или в медицинской статистике привычное представление, «бесконечно малое приращение», уже достаточно абстрактно, а задачи биокибернетики оперируют дискретными единицами, и изучаемые в реальности множества событий не более чем счетные.

В статье рассматриваются методы моделирования важных нелинейных эффектов в регулируемых средой биофизических процессах на основе методов организации вычислительных структур из наборов уравнений, выборочно решаемых при выполнении указанных наборов условий. Метод формирования гибридных систем следует логике развития стадийных метаморфозов, удобен для получения широкого спектра сложных вариантов поведения у дискретной составляющей траектории итераций и применим для моделирования конкретно изучаемых ситуаций в формате серии сценариев.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Автор развивает сценарный подход к анализу процессов, где модель подстраивается под характер развития и свойства сложившейся ситуации как сценария. В сценарии включаем факторы управляемого воздействия путем изменений при истинности логических функций для условий возникновения событий. Метод не подразумевает получения обобщающей модели, но эпидемия COVID-19 из цепи смены штаммов показала и гетерогенность, и прерывистость эволюции в частично иммунной среде. Меняются и штаммы, и наша резистентность, не получится всё описать одной единой моделью.

Целью работы является развитие методов моделирования кризисных ситуаций в управляемом использовании возобновляемых ресурсов. Для расширения возможностей сценарных моделей необходимо включать описание проявления критических состояний экодинамики и последствия неустойчивых равновесий. Метод прямого включения пороговых значений в уравнения известен, но требует особых модификаций. Явно включенные в уравнения и априорно заданные положения точек равновесия L -порога и K -емкости не помогут при прогнозировании. Ставятся задачи разработки принципов и алгоритмической реализации адаптивного метода моделирования пороговых эффектов и переходных состояний в ключевых для популяционного процесса факторах взаимодействий. Суть развития методики на основе организации структуры из простых перестраиваемых дифференциальных уравнений и решения вариативной последовательности задач Коши на сопряженных отрезках времени заключается в получении сложных и трансформируемых зависимостей характеристик, в эффективности воспроизводства запасов. Метод позволит отписывать декретные сменяемые поколения популяций при воздействии, пользуясь непрерывными расчетами.

В итоге общей методологической проблемой статьи является обоснование неявного принципа моделирования ряда пороговых явлений (эффектов Олли, Либиха, Гидры) в экодинамике [5]. Эффекты существенно влияют на развитие кризисов в биосистемах. С одной стороны, они непосредственно изменяют параметры процессов, но дополнительно сложные формы зависимостей условий среды, состояния исходного запаса и получаемого поколения отражаются на принятии решений при управлении биоресурсами, хотя относительно природных популяций правильнее говорить только о регуляции воздействия. «Управляемость» процессами в водных биосистемах не достигнута. Решения по квотированию принимаются экспертами на основе оценки ситуации с запасами и анализа имеющихся данных, но это в любом случае оказывается частичная и искаженная информационная проекция реальных трендов.

Так логика решений на основе опыта экспертов, принципы их оценки ситуаций и прогнозы, которые правильнее называть ожиданиями, стали факторами развития самих ситуаций, что типично и для фондовых рынков.

1.1. ВАРИАТИВНОСТЬ СИТУАЦИЙ КРИЗИСОВ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ

Если бы все кризисные ситуации при регулировании биоресурсов развивались одинаково или хотя бы с обязательно повторяющимися признаками, то проблема рационального природопользования при больших затраченных усилиях была бы разрешена [6]. Работ по теме оптимального управления морскими запасами и моделей по максимально возможному изъятию известно много [7], но на самом деле модели теории оптимизации процессов обходят реальные сложные противоречия и «болевы точки» проблемы [8]. По результатам сопоставления реальных кризисов все модели максимизации допустимой эксплуатации входят в противоречие с методами оценки численности поколений. Нарушается критерий оценки точности прогнозов пополнения реальной доли убыли запасов, на основе которых происходит регуляция изъятия особей ответственными за принятие решений экспертами. Принятие решений отличается от классической задачи с оценками множеств альтернатив и сравниваемыми характеристиками (условно цена / качество / стоимость владения и др.) и проводится на основе оценки проекции наблюдаемой реальной ситуации и прогнозов ее дальнейшего развития. Лица, принимающие решения (ЛПР), знают о неточности своих методов (обычно это экспертные комиссии), но они не могут оценить их погрешность, как это можно сделать для случая искажающей площади проекции Г. Меркатора. Тут мотивы и ожидания ЛПР формируют прогноз и через него результат. Можно говорить о реализации активного принципа прогнозирования, если мнение и ожидания ЛПР могут регулировать свойства процесса, но они бывают для ЛПР непредвиденными.

Рассмотрим динамические особенности вариантов кризисов. На рис. 1, б показано развитие крупнейшего для отрасли коллапса лабрадорской трески.

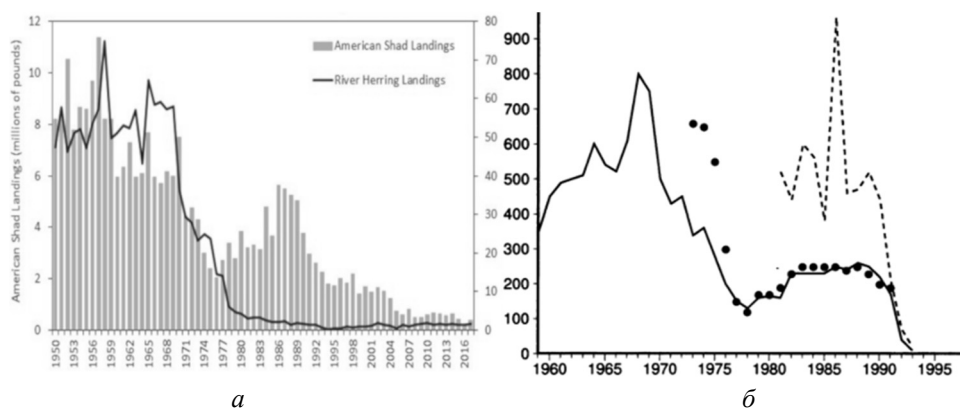


Рис. 1. Завышение прогнозов и переоценка показателей как важный фактор кризиса:
а – сравнение истощения и коллапса запасов, б – коллапс трески

Fig. 1. Overestimation of forecasts and overestimation of indicators is an important factor in the crisis:

a is a comparison of depletion and collapse of stock, b is cod collapse

Итоговый коллапс запасов мы представляем как сложный многоэтапный процесс, имеющий и биофизическую, и социально-экономическую природу. ЛПР оценивает общую благоприятность факторов и условий среды. На рис. 1, а показаны явные отличия динамики очевидного монотонного и длительного истощения биоресурсов при промысле от стремительного сценария резкого популяционного коллапса. Обе ситуации долго шли к краху промысла, но разными путями. Процесс истощения не был остановлен, хотя тренд запаса был ясен и итог ситуации очевиден. Потому важную роль для сценариев имеет исследование принципов и мотивов экспертных решений.

На графиках рис. 1, а, б видно, как из-за увеличения доли изъятия уловы после первичного падения на некоторое время стабилизировались и состояние запасов оценено как приемлемое для продолжения эксплуатации, но всё завершилось крахом в 1992 г. Эксперты Канады [10] ожидали восстановления запасов через 9 лет, но популяция трески и поныне не восстановилась. Точками на графике рис. 1, б показаны выданные квоты изъятия, которые были многократно завышены. При этом именно в Канаде основана научная школа моделирования динамики рыбных запасов. Коллапсу предшествовали стадии стремительного увеличения уловов и фаза стабилизации, которая оказалась ложной и кратковременной. Дальнейшая ситуация объясняется включением действия порогового эффекта сокращения воспроизводства, которое стало неожиданным, так как не оказалось резервных поколений у локальной популяции трески, крупного долгоживущего доминирующего хищника.

Существующие модели, основанные на методе оценки репродуктивного потенциала, для управления биоресурсами неэффективны. Незначительные ошибки в прогнозах оптимальной эксплуатации приводили к деградации популяций. Обсуждаемые аспекты связи прогнозов и решений реалистичны не только для моделей биоресурсов и кризисной экодинамики, когда популяция оказывается в состоянии «бутылочного горлышка». Аналогичный пример кризиса после фазы роста очень известен в истории экономики. После избрания Г. Гувера президентом США уже перегретый фондовый рынок на волне технологического оптимизма стремительно пошел вверх, цена акций значительно превышала реальную ценность активов, тогда как реальность показывала кризис сбыта важнейших технологических товаров (автомобилей и радиоприемников). Завышение ожиданий инвесторов привело к биржевому краху в «черный вторник» 29.10.1929. Ожидания заявленной Гувером эпохи процветания смела Великая депрессия. С тех пор были внедрены сложные механизмы регуляции для предотвращения эффектов паники и коллапса фондового рынка, но в природопользовании для предотвращения кризисов аналогичных мер после серии коллапсов не было. Очевидно, что квоты не являются достаточным средством регулирования, и их часто превышают. Динамика развития случаев коллапса разных запасов качественно отличается и единой моделью не описывается. Мы предлагаем адаптируемую структуру модели, которая будет способна описать многообразие форм зависимостей.

2. МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ С ЯВНЫМ КРИТИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ – *L*-ПОРОГОМ «БУТЫЛОЧНОГО ГОРЛЫШКА»

Ситуации показали, что существует точка невозврата, после прохождения которой истощенный запас не может восстановиться, что делает прогнозы неактуальными. Для разных запасов нет общих методов оценки этой точки. Очевидным на первый взгляд способом для учета критических состояния и действия пороговых эффектов при моделировании представляется включение порогового значения в уравнение, где будет оказывать действие мера отклонения от критической точки. В биосистемных моделях ранее вводили пороговые величины помимо предела роста популяции для данной среды. Для описания вспышки численности насекомых с резким переходом от малочисленного состояния к огромному разрушающему в модель с константами эффективности репродуктивного потенциала r и биотического противодействия χ включен порог активации адаптивного противодействия со стороны среды O при очень большом значении порога K :

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) - \chi \frac{N^2}{O + N^2}, \quad 0 < N(0) < O < K, \quad (1)$$

где второе включенное слагаемое в расширенной модели Ферхюльста отражает пороговую эффективность подавления вида [11] в специфических случаях для насекомых: если их популяция мала, то паразиты не реагируют на их личинок. Выражение (1) не описывает обратный эффект резкого завершения сценария вспышек. Наиболее известная модель с учетом минимально допустимой для вида численности L как явно включенной критической точки Bazykin equation [12] (1) аналогично расширению логистической модели:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) (N(t) - L), \quad \forall 0 < N < L, \quad \lim_{t \rightarrow \bar{t} \rightarrow \infty} N(t) = 0, \quad (2)$$

где K отражает различно трактуемую концепцию экологической ниши: это не априорное свойство вида, как и репродуктивный потенциал r . Не для всех ситуаций и сред имеет смысл фактор постоянства $r, K = \text{const}$, так как существуют сильно разрушающие свою среду популяции. Следовательно, $K = l(N(t))$, и возможен вариант коллапса при сдвиге $K(t) \rightarrow L$. Оценка K для человеческого социума – известная фундаментальная проблема. Примем трактовку порога K : это нейтральное значение для конкурентного внутривидового давления при заполнении видом среды и «неразрушающая численность». В микробиологии пороги ограничения роста колоний одноклеточных создает критическая концентрация их метаболитов.

Предложенная модель (2) как одно из многих расширений модели П. Ферхюльста описывает так называемый «сильный эффект Олли» с быстрым и неизбежным вымиранием ставшей малочисленной популяции, что случается редко. Треска после коллапса не исчезла совсем, и запас весьма медленно восстанавливается. Сомножитель $(N - L)$ оказывает слишком сильное действие на динамику, даже если запас исторически оптимальный. При значении $N = K$ теоретически никакого «эффекта Олли» не должно проявляться. Проблема прогнозирования в (2) в том, что этот нелинейный эффект проявляется внезапно.

Можно предложить модификации модели (2) с явным включением порога L -группы. С целью ослабить избыточное влияние пороговых значений представим сомножитель в адаптивной форме: $(N^m(t) - L)^{1/k}$. Тогда параметры как нечетный знаменатель степени k в обратной зависимости, а m – в прямой отразят выраженность «эффекта Олли» как ситуативного явления. Дополним модель с целью ограничить область проявления эффекта для случая нестабильной вновь образующейся популяции. В новом уравнении изменим форму саморегуляции при относительном влиянии емкости ниши K , когда оказывает влияние отклонение текущего $N(t)$ от оптимума численности в степени $1/3$:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left(\frac{K - N(t)}{K + \bar{c}N(t)/L} \right) \sqrt[3]{N(t) - L}, \quad 0 < L < N(0) < K. \quad (3)$$

Модель (3) с плавающей действующей регуляторной численностью при заполнении экологической ниши актуальна при инвазии агрессивного конкурента в противоборстве автохтонной популяции, так как инвазивные популяции неустойчивы и могут столь же внезапно исчезнуть из нового ареала. Модель актуальна для некоторых вариантов кризисных ситуаций и переходных режимов. Для получения свойства колебательных режимов в окрестности порога в модель можно включить запаздывание. Модель подходит для сценария окончания волн эпидемии, финала агрессивной инвазии без формирования устойчивой популяции или временного «отскока» рынка акций компании на бирже перед окончательным крахом.

Возможности дальнейших модификаций на основе уравнений (2) или (3) выглядят ограниченными. Варианты модификации (2) с явным критическим равновесием L не обладают необходимыми нам свойствами для анализа сценариев коллапса после долгой «псевдостабильзации» и разрушения стационарного режима. Предложим метод построения наглядной пороговой модели в разрывной форме. Идея – переходить при достижении порогового значения L к выбору иного для данной ситуации уравнения динамики численности или цены активов. При $0 < N < L$ сильнее действие вероятностных факторов среды на восполнение и вероятность вымирания не равна единице.

Методически перспективный вариант учесть диапазоны изменений репродуктивной активности «эффекта Олли» – сделать модели гибридными и составленными из разных форм уравнений для разного уровня численности (или для разного конкурентного противодействия). Для моделей типа (1) это решение из наборов функций роста не выглядит элегантным, но, по мнению автора, лучшего метода в задаче предложить нельзя. Изменять резко значение параметра r или K нет оснований. По сути, это эволюционно сложившиеся характеристики. Интересным видим вариант набора: при $0 < N < L$ описывается медленный рост с основанием логарифма $c > e$, а при $N > L$ актуален переход в режим колебаний. Амплитуда флуктуаций зависит от $r\tau$. Так как минимумы цикла $\lim_{r\tau \rightarrow \infty} \min N_*(t) = 0 + \varepsilon$, то возможен вновь переход к состоянию $N < L$:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} rN(t) \log_c \left(\frac{K}{N(t)} \right) - qN(t), & N(t) < L, \\ rN(t - \tau) \exp(-bN(t - \tau)), & N(t) > L. \end{cases} \quad (4)$$

Смысл модификации (4): при нестабильности биосистемы с увеличением амплитуды релаксационного цикла она переходит в режим медленного восстановления $N \rightarrow L$. Объединение в одну гибридную структуру устраняет недостатки этих двух уравнений. Проблема (4) в том, что неоправданно использовать емкость K для малочисленного запаса и $N < L$.

Можно вспомнить, что «мальтузианский параметр» r в (1) и (4) исходно отражает разность между мгновенными рождаемостью и смертностью, поэтому логично, что пороговый эффект изменяет одну из этих составляющих r . Будем развивать метод, позволяющий описать трансформации и без явного указания L . В новом методе следует перейти к дискретной итерационной динамике, сохранив внутреннюю структуру модели непрерывно-событийной.

3. МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ПЕРЕОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СТРУКТУР ВЫЧИСЛЕНИЙ

Рассмотрим альтернативный метод имитации в гибридной модели действия порогового эффекта. Так, ЛПР оценить заранее положение пороговой точки численности L как неустойчивого равновесия практически невозможно. Мы откажемся от идеи «мальтузианского параметра» r как искусственного понятия репродуктивного потенциала. Предлагаем перейти в моделях к естественным средней плодовитости взрослых особей λ и выживаемости возрастных групп. Плодовитость можно узнать, но на убыль ювенильных стадий может оказать влияние разнообразие факторов, которые не постоянны, но зависят от исходной плотности. Аналогично в экономике известно, что риск банкротства массы новых «стартапов» компаний выше.

Согласно экологической теории формирования пополнения запасов рыб [13] плотность исходного запаса S влияет на выживаемость [14] пополнения R , и зависимость $R = f(S)$ существенно нелинейная. Например, модель Морана – Рикера $f(S) = aS \exp(-bS)$ куполообразная, но в итерационной форме $R_{n+1} = f(R_n)$ не очень удачна из-за эффектов хаотизации, которые мы обсуждали ранее [15]. Применяемая для сценариев анализа кризисов модель зависимости $R = f(S)$ должна иметь по меньшей мере один максимум, но не должна иметь нулевую горизонтальную асимптоту и единственную точку перегиба, так как сценарий хаоса по пути М. Фейгенбаума не реалистичен в биосистеме по ряду причин.

Для большей обоснованности и реалистичности предлагаем сделать описания убыли численности стадийными и соответствующими свойствам онтогенеза видов. Целесообразно на интервале $[0, T]$ использовать достаточно простое обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка и получить куполообразную кривую, но с ненулевой горизонтальной асимптотой. Если записать модель уравнением убыли от исходной численности $N(0)$ на отрезке времени до фиксированного T либо связанного с весом $T(w)$, то будет больше возможностей для настройки и получения разных форм $f(S)$. В реальности оценки состояния биосистем дискретные, потому численные решения зададут зависимость, поведение которой изучаем как функциональные итерации.

Необходим метод определения гибридной модели жизни поколений, переопределяемой внутри интервала $[0, T]$ предикативно, отслеживая выполнение набора условий. Метод потребует включения событийности и правил для всех

переходов в формате гибридного автомата [16]. В современных вычислительных средах можно успешно решать подобные разрывные задачи Коши [17], и мы можем переходить от непрерывных расчетов к анализу дискретной итерационной траектории. Для формата событий используем расширение данного в работах Ю.Б. Сениченкова [18] гибридного времени как иерархический набор кортежей с прерываниями в непрерывных кадрах:

$$\Gamma = \bigcup_n \left\{ \text{Gap_Left}_n, \{t_0, \dots, t^i, t^{i+1}, \dots, t^I, T\}_n, \text{Gap_Right}_n \right\}. \quad (5a)$$

Внутри кадров жизни поколения зададим порядок из пронумерованных связанных каскадов событий разного генезиса t^i . В биофизических процессах и при экспертном регулировании теоретически возможна триггерная активация альтернативных каскадов событий. В данном контексте события внутри кадра относятся к одному каскаду. Вне границ кадров времени заданы левые Gap_Left и правые Gap_Right «щели» для реинициализации внутренних переменных, начальных условий $N(0)$, $w(0)$ для решения задач Коши и схемы сценария управления внешним воздействием q :

$$\text{Gap_Left}[N(0) = f(\lambda, q); w(0) = w_0], \text{Gap_Right}[t = 0]. \quad (56)$$

События переходов между формами ОДУ в правой части определяются в момент истинности предикатов. Они должны быть упорядочены и достижимы, а определяющие их логические функции должны обязательно изменять свое значение. В биофизике много причин изменений, потому все переходы в предложенном методе будут разделены на строго обязательные, «таймированные» по отсчетам кадрам времени и вычисляемые по заданным соотношениям. В первой версии модели использованы сложные логические конструкции проверки, но их состояние истинности легко контролировать.

Уравнения выживаемости от $N(0)$ с коэффициентами убыли α_i и β зададим с переходами на основе динамики роста особей $w(t)$, а пара A, Z предикатов определяет условия начала (кроме первой) и завершения расчетов уравнения для динамики на каждой стадии модельного развития генерации:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \beta)N(t), & Z_1(t), \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & A_2(t), Z_2(t, w(t)), \\ -\alpha_3 w(t)N(t - \eta) - \beta, & A_3(w(t)), Z_3(t). \end{cases} \quad (6)$$

Длительность первой стадии развития фиксируем как τ из биологических принципов. Для старшей стадии актуально действие запаздывающей регуляции убыли из-за исчерпания ресурсов. Это учитывается включением в уравнение отклоняющегося аргумента $N(t - \eta)$.

Начальные условия $N(0)$ в (6) определяем из плодовитости λ либо для многокомпонентного запаса учитываем в сумме вклад v каждого компонента:

$$N_{n+1}(0) = \lambda S_n, S_\Sigma = N(T)_n + \sum_{m=1}^k v_m N(T)_{n-m}.$$

Наглядно и удобнее включать предикаты первого порядка и задавать их парами «старт – финал», избегая сложных логических конструкций, где возможно возникновение неопределенности и противоречий. Переход на вторую стадию контролируется временем. Для предикатов в проверке условий переходов для старших стадий потребуются дополнительные показатели. Динамика размерного развития связана с выживаемостью и с плотностью поколения, с интенсивностью контактов, что можно описать отдельным (и дополняемым факторами среды с поправкой μ_C) уравнением темпа роста:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{g(t)}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}} + \mu_C, \quad w(0) = w_0. \quad (7)$$

Численно решая стадийные уравнения (6), (7) на отрезках времени предложенным методом, получим сложные формы моделирующей зависимости с несколькими экстремумами для начальной численности поколения и итоговой величины пополнения $f(S)$ – запаса, достигшего возраста зрелости.

4. МЕТОД НЕЯВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ РАВНОВЕСИЙ В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ

Исследуем в моделях социобиофизические процессы, возникающие в ситуации, когда в сформированные эволюцией биологические механизмы вмешивается обусловленный социально-экономическими причинами антропогенный фактор. Качественные изменения процессов в предложенном гибридном модельном представлении регулируются каскадом событий, опишем их при бифуркациях предельных множеств траектории, но бифуркации удвоения периода цикла не подходят для популяций [19]. Образования бесконечного периода цикла 2^p следует избегать в модельных сценариях. Для описания хода стремительных изменений необходим способ ситуативной целенаправленной трансформации инвариантных стационарных множеств итераций – как устойчивых, так и описывающих кризис неустойчивых.

Исходя из реальных свойств кризисной динамики дополним методику построения гибридных структур методом имитации критических состояний, что позволит получить адаптивную модель. По предлагаемому представлению уровень критического порога L складывается в ходе развития ситуации в среде, а не является априорной константой для вида. Существование устойчивого равновесия не будет априорным свойством, так что в зависимости от условий устойчивые равновесные состояния могут вдруг разрушаться, что вполне отвечает известным ситуациям кризисного развития. При этом для описания коллапса необходимо разделение фазовой плоскости на две альтернативные области притяжения – Ω_1 и Ω_2 . Одна «субкритическая область» Ω_1 имеет свойство $\forall R_0 \in \Omega_1 : \lim_{n \rightarrow d < \infty} f^n(R_0) = 0$, но при наличии точки-репеллера R_1^* необходим сценарий перехода траектории между областями Ω_1 и Ω_2 через порог R_1^* в обоих направлениях.

Дополним уравнение динамики выживаемости (6) для первой стадии функцией ограниченного и мягкого порогового действия, которая зависит

от численности запаса и действует, становясь больше единицы, только если запас уменьшается при изъятии, а часть икры не вступит в репродуктивный процесс. Пороговый экодинамический «эффект Олли» отразим функцией триггерного воздействия $\Psi(S)$. У функции ограничим область значений $E(\Psi) = (1, 2]$ с асимптотическим и фактически быстро достижимым конечным пределом 1 справа, достигающую наибольшего значения при $S = 0$:

$$\Psi(S) = 1 + \exp\left(-\zeta\sqrt[3]{S^2} + \varepsilon\right), \quad \lim_{S \rightarrow \infty} \Psi(S) = 1, \quad \Psi(0) = 2, \quad (8)$$

где $\zeta < 1$ отражает масштаб потерь из-за низкой плотности запаса неоплодотворенной икры. При оптимальном числе S и соответственно $\Psi(S) \approx 1$ включенное в уравнение значение триггерной функции у первой стадии развития $\Psi(S)$ не увеличит убыль пополнения в (6):

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha w(t)N^2(t) - \Psi[S]\beta N(t). \quad (9)$$

Если запас S велик, то такая функция будет быстро стремиться к единичному значению и не вмешиваться в расчеты численности поколений. С включением в структуру (6) функции (8) и варианта правой части в (9) модельная зависимость получит разнообразные и трансформируемые характеристики: положение и число экстремумов, расположение точек равновесий и разделение фазового пространства на две области притяжения. Зависимость при воздействии $q > 0,5$ сжимается относительно оси ординат. На рис. 2 показана трансформация после исчезновения двух стационарных точек. Одно из исчезнувших при опускании кривой ниже биссектрисы координатного угла равновесий было аттрактором. На рис. 2 у зависимости с двумя экстремумами остаются две точки R_1^* , R_2^* , обе неустойчивые, но точка тривиального равновесия 0,0 устойчива.



Рис. 2. Зависимость после реверсивной касательной бифуркации

Fig. 2. Dependence after a reversible tangent bifurcation

Точка R_1^* – критическое неустойчивое равновесие и аналог порога L ; R_2^* имеет точки-прообразы слева и справа (рис. 2). Это инвариантное множество

непритягивающихся точек разделяет область притяжения Ω_2 . В результате у $R_{n+1} = f(R_n) - q_n R_n$ реализуется переходный режим колебаний. Если воздействие q не изменено из-за переоценки избыточно благоприятных прогнозов при кратком увеличении величины пополнения, при дальнейшей трансформации выполняется $f(R_{\min} \pm \varepsilon) < R_1^*$, то следует переход в область Ω_1 , что означает коллапс за конечное число итераций. Модельный сценарий коллапса показан на рис. 3, а.

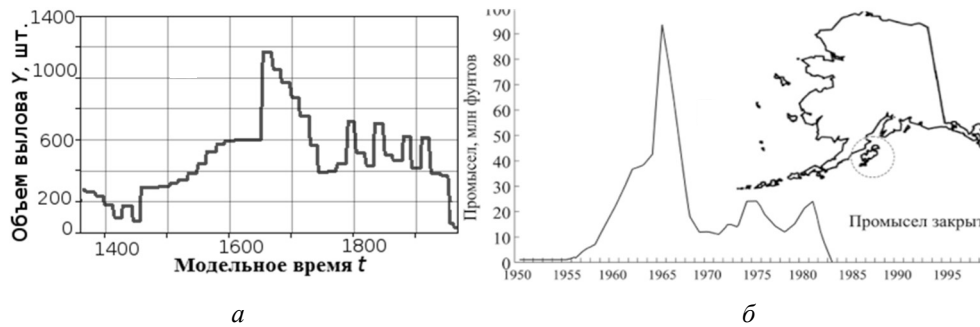


Рис. 3. Полученный модельный сценарий флуктуационного коллапса (а); реальный коллапс запасов камчатского краба у Алеутских островов (б)

Fig. 3. The obtained model scenario of fluctuation collapse (a); a real collapse of Kamchatka crab stocks near the Aleutian Islands (b)

Таким образом, в разработанной гибридной структуре с учетом метода описания действия пороговых эффектов можно анализировать различные сценарии деградации биоресурсов при регулируемом природопользовании. Модельная зависимость может получить при разной компоновке одно, два или четыре равновесия $R^* = f(R^*)$. Метод варьирования формы оператора эволюции итераций $R_{n+1} = f(R_n) - q_n R_n$ применим для описания ряда кризисных эффектов при экспертной регуляции воздействия в биоинформационных системах [20] на основе информационной проекции ситуации из разнородных сведений. Часто ЛПР ориентируются на искаженные данные и незначительно (до 5 %) [21], но при этом систематически завышают допустимую долю q_n .

Наличие экстремумов у кривой $f(R_n)$ существенно влияет на сложность изучаемой динамики поведения функциональных итераций $R_{n+1} = f(R_n) - q_n R_n$, как и расположение точек $R^* = f(R^*)$ нетривиальных равновесий. Варьируя стадии развития в гибридной структуре (6), можем изменять положения экстремумов, но для сценариев с экспертной регуляцией изъятия q_n необходим метод получения и редукции дополнительных стационарных точек зависимости, меняющих фазовый портрет итераций и ее траекторию.

В случае значительного превышения допустимой квоты q_n негативная динамика тренда сразу становится очевидной для ЛПР. В результате нашего анализа была выявлена важная проблема [22] при принятии регулирующих решений, так как при малом превышении развивается псевдостабильность

состояния биосистемы, что коренным образом влияет на формирование информационной проекции прогноза ситуации экспертом [23], оценивающим благополучие ресурсов по неактуальным данным и завышающим ожидания.

В результате использование биоресурсов по стратегии максимизации эффективности ведения промысла часто заканчивается временным кризисом либо окончательным коллапсом запасов. Формальных методологических основ прогнозирования трендов кризисной экодинамики недостаточно для оптимизационного управления в условиях нелинейности зависимостей, неопределенности среды при действии любого из двух пороговых эффектов.

Схожие аналогичные ситуации застоя наблюдаются и на финансовых рынках перед длительным падением курса акций. Далее происходит развитие коллапса либо срыв в режим переходных флуктуаций, как в полученном модельном сценарии. Оба варианта резко негативные и трудны для принятия решений, когда необходим срочный мораторий с $q_{n+1} = 0$. Вариант с развитием флуктуаций сложнее в управлении. Режим колебаний оставляет возможности ЛПР для принятия решения с целью предотвращения деградации, но правильная оценка ситуации и прогноз колебаний – нетривиальная задача.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен метод моделирования критических эффектов и способ формального описания неустойчивых состояний. Сложные ситуации с пороговыми эффектами при небольшом росте воздействия возникают при принятии решений в условиях искаженной информационной проекции реальной ситуации при оценке заведомо неполных, отрывочных и быстро стареющих статистических характеристик. Гибридные методы в рамках проекта ИТМО № FSER-2025-0013 применимы для описания нелинейных трансформаций и кризисов, часто возникающих при экспертной регуляции адаптивных биологических и социально-информационных систем (например, в форме волн ажиотажа в социальных сетях, всплеска паники на финансовых рынках).

При развитии концепции гибкой формализации пороговых состояний предложен метод модификации непрерывных моделей с явным включением в уравнение значения L как критического порога. Показано, что явный метод описания порогового состояния из уравнения А.Д. Базыкина для описания неустойчивого равновесия L не обладает прогностическими возможностями. Предложенная разрывная модификация (4) без включения в модель самого порога с двумя вариантами уравнения регулируемого роста имеет нетривиальные колебательные режимы, но требует указания точки перехода.

В рамках развития концепции анализа ситуаций была предложена методика формирования адаптивной гибридной структуры для модели выживаемости поколений с использованием предикативно переопределяемых правых частей из наборов простых основных и вспомогательных уравнений. Перестроение правой части предложено представлять в формате гибридного автомата с условными переходами по методике Ю.Б. Сениченкова, где определена дополнительная иерархия событийного модельного времени в кадрах. Метод учитывает, что в реальных биосистемах существуют разные по значимости и генезису каскады цепи событий. Для задач прогноза, где возникает необходимость описания рассмотренных пороговых эффектов, получена зависимость

с четырьмя нетривиальными равновесиями, которые претерпевают предсказуемые бифуркационные изменения при повышении воздействия. Модель описывает дескриптивный сценарий коллапса при традиционных методах регуляции.

В прескриптивных сценариях предложено описать и сравнить различные варианты нужных управляющих решений на основе альтернативной логики регуляции и формировать прогнозы развития. Модель с расширяемой компонентой, составленная из несложных для численного решения уравнений, демонстрирует нетривиальное поведение в дискретном времени при анализе зависимости как функциональных итераций. Возможно возникновение негладких границ областей притяжения аттракторов, которые влияют на появление режимов аperiodического поведения модели в окрестности R^* и опосредованно на оценку ситуации экспертами. Методы выбора решений при управлении воздействием и мер по восстановлению биоресурсов рассмотрим в дальнейших работах проекта ИТМО № FSER-2025-0013. Коллапса запасов можно избежать только совершенствованием инженерных биотехнологий аквакультуры в соответствии с «угольным парадоксом парового двигателя»: рост эффективности использования ресурса (КПД пара с 1 до 4 %) ведет не к уменьшению, а к увеличению потребления ресурса.

Идеи ситуативного и адаптивного формирования наборов уравнений модели и методы построения сценариев применимы при анализе многих процессов с резкими пороговыми переходами между разными режимами существования. Предикативные вычисления и условные схемы актуальны при развитии информационных волн и быстро затухающего ажиотажного интереса к агрессивному контенту в сетевых социальных коммуникациях.

Статья посвящена памяти профессора Ю.Б. Сениченкова и член-корреспондента РАН, директора СПИИРАН в 1991–2018 гг. Р.М. Юсупова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borisova T.Y., Perevaryukha A.Yu. On the physicochemical method of analysis of the formation of secondary immunodeficiency as a bioindicator of the state of ecosystems using the example of seabed biota of the Caspian Sea // Technical Physics Letters. – 2022. – Vol. 48. – P. 251–257. – DOI: 10.1134/S1063785022090012.
2. Sheeza M. Metabolic adaptation and fragility in healthy 3D in vitro skeletal muscle tissues exposed to chronic fatigue syndrome and Long COVID-19 sera // Biofabrication. – 2025. – Vol. 17. – P. 45–56. – DOI: 10.1088/1758-5090/adf66c.
3. Optimal control of sustainable development in the biological rehabilitation of the Azov Sea / A.V. Nikitina, A.I. Sukhinov, G.A. Ugolnitsky, A.B. Usov, A.E. Chistyakov, M.V. Puchkin, I.S. Semenov // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2017. – Vol. 9 (1). – P. 101–107. – DOI: 10.1134/S2070048217010112.
4. Topological data analysis for selection of machine learning models in cerebral stroke detection with limited resources / A. Vatan, N. Gusarova, I. Tomilov, P. Brunko, A. Zubanenko // IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems. – 2024. – Vol. 19 (2). – P. 72–86.
5. Ганжа К.А., Неверова Г.П. Модель Морана – Рикера с запаздыванием: управление динамикой популяции с неперекрывающимися поколениями // Математическая биология и биоинформатика. – 2025. – Т. 20, № 1. – С. 147–165. – DOI: 10.17537/2025.20.147.
6. Абакумов А.И., Израильский Ю.Г. Стабилизирующая роль структуры рыбной популяции в условиях промысла при случайных воздействиях среды обитания // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – № 4. – С. 609–620.

7. Ильичев В.Г. Оптимизация и пространственная адаптация в проблеме многолетнего вылова рыбных популяций // Проблемы управления. – 2014. – № 2. – С. 66–74.
8. Ильичев В.Г., Дашкевич Л.В. Оптимальный промысел и эволюция путей миграции рыбных популяций // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – № 5. – С. 879–893.
9. Holden M, Stephen E.P. Human judgment vs. quantitative models for the management of ecological resources // Ecological Applications. – 2016. – Vol. 26. – P. 1553–1565.
10. Roughgarden J., Smith F. Why fisheries collapse and what to do about it // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1996. – Vol. 93. – P. 5078–5083.
11. Ludwig D., Jones D.D., Holling C.S. Qualitative analysis of insect outbreak systems: the spruce budworm and forest // The Journal of Animal Ecology. – 1978. – Vol. 47 (1). – P. 315–332.
12. Bazykin A.D. Theoretical and mathematical ecology: dangerous boundaries and criteria of approach them // Mathematics and Modelling. – New York: Nova Science Publishers, 1993. – P. 321–328.
13. Kriksunov E.A. Theory of recruitment and interpretation of fish population dynamics // Journal of Ichthyology. – 1995. – Vol. 35 (7). – P. 10–37.
14. Соотношение роста и некоторых биохимических показателей рыб на примере микижи *Parasalmo mykiss* Walb. / М.В. Чурова, О.В. Мещерякова, Н.Н. Немова, М.И. Шатуновский // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2010. – № 3. – С. 289–299.
15. Perevaryukha A.Y. Modeling abrupt changes in population dynamics with two threshold states // Cybernetics and Systems Analysis. – 2016. – Vol. 52 (4). – P. 623–630.
16. Пороговые эффекты в управлении популяционной динамикой раковых клеток в организме / Е.В. Инжеваткин, В.А. Неговорова, А.А. Савченко, В.А. Слепков, Е.В. Слепов, В.Г. Суховольский, Р.Г. Хлебопрос // Проблемы управления. – 2008. – № 5. – С. 73–80.
17. Shornikov Yu.V., Timofeev K.A. Event-discrete traffic control models // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2024. – Vol. 60 (2). – P. 276–283.
18. Shornikov Yu.V., Senichenkov Yu.B., Ryzhov V.A. Comparative analysis of computer modeling and simulation environments under the inmotion project // Университетский научный журнал. – 2017. – № 30. – С. 58–65.
19. Детерминированный хаос и проблема предсказуемости динамики популяций / А.Б. Медвинский, Н.И. Нуриева, А.В. Русаков, Б.В. Адамович // Биофизика. – 2017. – Т. 62, № 1. – С. 107–126.
20. Дубровская В.А., Переварюха А.Ю., Трофимова И.В. Модель динамики структурированных субпопуляций осетровых рыб Каспия с учетом отклонений в темпах развития молоди // Журнал Белорусского государственного университета. Биология. – 2017. – № 3. – С. 76–86.
21. Борисова Т.Ю., Переварюха А.Ю., Соловьева И.В. Проблемные аспекты моделирования популяционных процессов и критерии их согласования // Математические машины и системы. – 2017. – № 1. – С. 71–81.
22. Михайлов В.В., Переварюха А.Ю. Моделирование динамики биогенной нагрузки при оценке эффективности восполнения биоресурсов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 4. – С. 103–110.
23. Соколов А.В. Моделирование эволюции популяций с возрастной структурой: связь рождаемости со скоростью изменения среды // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2014. – Т. 64, № 3. – С. 53–59.

Андрей Юрьевич Переварюха, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета ИТМО. Основное направление научных исследований – математическое моделирование, оптимизация экспертного управления, сценарный анализ. Имеет более 260 печатных работ. E-mail: madelf@rambler.ru

Perevaryukha Andrey Yu., PhD (Eng.), associate professor, ITMO University. His main research areas are mathematical modeling, optimization of expert control, and scenario analysis. He has more than 260 publications. E-mail: madelf@rambler.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-51-68

A hybrid modeling method for critical states to analyze expert-controlled adaptive processes*

A.YU. PEREVARYUKHA

ITMO University, 49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 199178, Russian Federation

madelf@rambler.ru

Abstract

The article focuses on methods of hybrid modeling for rapidly transforming processes in adaptive bioinformatics systems. The lack of alternative methods for regulation and decision adjustment often leads to irreversible resource depletion due to the systematic overestimation of impact standards. A key regulatory challenge is the crisis of previously stable natural, social, or economic processes. The transition to irreversible degradation manifests as a suddenly detected reduction in resources or capitalization of assets. Critical crisis scenarios were not identified in forecasts by experts, who relied for control on a distorted informational projection of the real situation based on average estimates of reproductive potential reserves. The study identifies the cause of erroneous expert forecasts and examines critical states characterized by a sharp decline in replenishment rates. To analyze a systemic collapse, methods for modeling threshold phenomena are considered. Equations incorporating unstable critical equilibrium have been proposed, but they fail to describe the situation of false stabilization. A method is being developed that integrates adaptive functions into hybrid model structures, flexibly adjusting the replenishment rate of utilized assets based on their past state. The method, featuring event-triggered switching of the right-hand sides of equations and incorporating loss factors during process stage changes, describes threshold effects that influence expert decision-making in asset management. Modifications of hybrid structures demonstrate broad capabilities, as evidenced by the results of a comparative method applied to a series of model-based scenario experiments. Diverse nonlinear forms of dependency between stock and reproduction were obtained, utilized as functional iterations. The "crisis during regulation" scenario is investigated for valuable renewable resources with transitional fluctuation regimes that are complex for experts to assess and base decisions on. Nonlinear processes in the form of collapse are relevant for crisis situations in stock markets or surges of frenzied activity in social networks.

Keywords: hybrid structures, predicative forms of the right-hand side, discrete event hierarchies, scenarios, experiments, critical unstable points, collapse, expert control logic, nature management, bioresources, decision-making simulation

REFERENCES

1. Borisova T.Y., Perevaryukha A.Yu. On the physicochemical method of analysis of the formation of secondary immunodeficiency as a bioindicator of the state of ecosystems using the example of seabed biota of the Caspian Sea. *Technical Physics Letters*, 2022, vol. 48, pp. 251–257. DOI: 10.1134/S1063785022090012.
2. Sheeza M. Metabolic adaptation and fragility in healthy 3D in vitro skeletal muscle tissues exposed to chronic fatigue syndrome and Long COVID-19 sera. *Biofabrication*, 2025, vol. 17, pp. 45–56. DOI: 10.1088/1758-5090/adf66c.
3. Nikitina A.V., Sukhinov A.I., Ugolnitsky G.A., Usov A.B., Chistyakov A.E., Puchkin M.V., Semenov I.S. Optimal control of sustainable development in the biological rehabilitation of the Azov

* Received 11 February 2026.

The study was carried out within framework of the State Assignment of ITMO University FSER-2025-0013.

Sea. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2017, vol. 9 (1), pp. 101–107. DOI: 10.1134/S2070048217010112.

4. Vatan A., Gusarova N., Tomilov I., Brunko P., Zubanenko A. Topological data analysis for selection of machine learning models in cerebral stroke detection with limited resources. *IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems*, 2024, vol. 19 (2), pp. 72–86.

5. Ganzha K.A., Neverova G.P. Model' Morana – Rikera s zapazdyvaniem: upravlenie dinamiko populyatsii s neperekryvayushchimisya pokoleniyami [The Moran-Ricker model with time delay: managing population dynamics in species with non-overlapping generations]. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika = Mathematical Biology and Bioinformatics*, 2025, vol. 20, no. 1, pp. 147–165. DOI: 10.17537/2025.20.147.

6. Abakumov A.I., Izrail'sky Yu.G. Stabiliziruyushchaya rol' struktury rybnoi populyatsii v usloviyakh promysla pri sluchainykh vozdeystviyakh sredy obitaniya [The stabilizing role of fish population structure under the influence of fishery and random environment variations]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye = Computer Research and Modeling*, 2017, no. 4, pp. 609–620.

7. Il'ichev V.G. Optimizatsiya i prostranstvennaya adaptatsiya v probleme mnogoletnego vylova rybnykh populyatsii [Optimization and spatial adaptation in a problem of a long-term harvesting of fish populations]. *Problemy upravleniya = Control Sciences*, 2014, no. 2, pp. 66–74.

8. Il'ichev V.G., Dashkevich L.V. Optimal'nyi promysel i evolyutsiya putei migratsii rybnykh populyatsii [Optimal fishing and evolution of migration routes of fish populations]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye = Computer Research and Modeling*, 2019, no. 5, pp. 879–893.

9. Holden M., Stephen E.P. Human judgment vs. quantitative models for the management of ecological resources. *Ecological Applications*, 2016, vol. 26, pp. 1553–1565.

10. Roughgarden J., Smith F. Why fisheries collapse and what to do about it. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1996, vol. 93, pp. 5078–5083.

11. Ludwig D., Jones D.D., Holling C.S. Qualitative analysis of insect outbreak systems: the spruce budworm and forest. *The Journal of Animal Ecology*, 1978, vol. 47 (1), pp. 315–332.

12. Bazykin A.D. Theoretical and mathematical ecology: dangerous boundaries and criteria of approach them. *Mathematics and Modelling*. New York, Nova Science Publishers, 1993, pp. 321–328.

13. Kriksunov E.A. Theory of recruitment and interpretation of fish population dynamics. *Journal of Ichthyology*, 1995, vol. 35 (7), pp. 10–37.

14. Churova M.V., Meshcheryakova O.V., Nemova N.N., Shatunovskii M.I. Sootnoshenie rosta i nekotorykh biokhimicheskikh pokazatelei ryb na primere mikizhi *Parasalmo mykiss* Walb. [The correlation between fish growth and several biochemical characteristics by the example of the steelhead *Parasalmo mykiss* Walb.]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya biologicheskaya = Biology Bulletin*, 2010, no. 3, pp. 289–299. (In Russian).

15. Perevaryukha A.Y. Modeling abrupt changes in population dynamics with two threshold states. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, vol. 52 (4), pp. 623–630.

16. Inzhevatkin E.V., Negovorova V.A., Savchenko A.A., Slepov V.A., Slepov E.V., Sukhovol'skii V.G., Khlebopros R.G. Porogovye efekty v upravlenii populyatsionnoi dinamiko rakovykh kletok v organizme [Threshold effects in the control of population dynamics of cancer cells in an organism]. *Problemy upravleniya = Control Sciences*, 2008, no. 5, pp. 73–80. (In Russian).

17. Shornikov Yu.V., Timofeev K.A. Event-discrete traffic control models. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2024, vol. 60 (2), pp. 276–283.

18. Shornikov Yu.V., Senichenkov Yu.B., Ryzhov V.A. comparative analysis of computer modeling and simulation environments under the InMotion project. *Universitetskii nauchnyi zhurnal = Humanities and Science University Journal*, 2017, no. 30, pp. 58–65.

19. Medvinsky A.B., Nurieva N.I., Rusakov A.V., Adamovich B.V. Determinirovannyi khaos i problema predskazuemosti dinamiki populyatsii [Deterministic chaos and the problem of predictability in population dynamics]. *Biofizika = Biophysics*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 107–126. (In Russian).

20. Dubrovskaya V.A., Perevaryukha A.Yu., Trofimova I.V. Model' dinamiki strukturirovannykh subpopulyatsii osetrovykh ryb Kaspiya s uchetom otklonenii v tempakh razvitiya molodi [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]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Journal of the Belarusian State University. Biology*, 2017, no. 3, pp. 76–86.

21. Borisova T.Yu., Perevaryukha A.Yu., Solov'eva I.V. Problemnye aspekty modelirovaniya populyatsionnykh protsessov i kriterii ikh soglasovaniya [Problematic aspects of modeling population

processes and criteria for their coordination]. *Matematicheskie mashiny i sistemy = Mathematical Machines and Systems*, 2017, no. 1, pp. 71–81.

22. Mikhailov V.V., Perevaryukha A.Yu. Modelirovanie dinamiki biogennoi nagruzki pri otsenke effektivnosti vospolneniya bioresursov [Modeling the dynamics of nutrient loading in assessing the effectiveness of replenishment of biological resources]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy = Information and Control Systems*, 2017, no. 4, pp. 103–110.

23. Sokolov A.V. Modelirovanie evolyutsii populyatsii s vozrastnoi strukturoi: svyaz' rozhdaemosti so skorost'yu izmeneniya sredy [Modeling the evolution of populations with the age structure: fertility and environment change rate relationship]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Institute of system analysis of the Russian academy of sciences*, 2014, vol. 64, no. 3, pp. 53–59.

Для цитирования:

Переварюха А.Ю. Метод гибридного моделирования критических состояний для анализа экспертно управляемых адаптивных процессов // Системы анализа и обработки данных. – 2026. – № 2 (102). – С. 51–68. – DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-51-68.

For citation:

Perevaryukha A.Yu. Metod gibridnogo modelirovaniya kriticheskikh sostoyanii dlya analiza ekspertno upravlyaemykh adaptivnykh protsessov [A hybrid modeling method for critical states to analyze expert-controlled adaptive processes]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2026, no. 2 (102), pp. 51–68. DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-51-68.