



Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)

Переварюха Андрей Юрьевич

**Нелинейные процессы экодинамики:
системный анализ и сценарное моделирование**

Москва
2023

УДК 57.087, 004.942
ББК 22.18
П 27

Научный редактор:
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ Юсупов Р.М., научный руководитель
направления СПИИРАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук
(СПб ФИЦ РАН).

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор Осипов В.Ю.,
директор СПИИРАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук
(СПб ФИЦ РАН).

Рецензенты:
доктор технических наук, профессор Михайлов В.В.,
ведущий научный сотрудник СПб ФИЦ РАН;

доктор технических наук, профессор Марлей В.Е.,
профессор кафедры Вычислительных систем и информатики
Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова;

доктор технических наук, профессор Сениченков Ю.Б.,
профессор высшей школы программной инженерии института компьютерных наук и
кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

П 27 **Нелинейные процессы экодинамики: системный анализ и сценарное моделирование.** / А.Ю. Переварюха. – М.: РАН, 2023. – 300 с.

ISBN 978–5–907645–22–6

В монографии на основе результатов выполнения проектов РНФ изложен взгляд автора на системный анализ нелинейных биофизических процессов и опыт разработки оригинальных методов сценарного моделирования в рамках развиваемой теории гибридных систем. Рассмотрены актуальные примеры неожиданно возникавших проблем и описаны принципы модельного анализа трендов развития кризисных ситуаций в биосистемах. Главы книги интересуют биофизиков, экологов и экспертов по экономике природопользования

УДК 57.087, 004.942
ББК 22.18

ISBN 978–5–907645–22–6

© Переварюха А.Ю., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Вступительное слово научного редактора	9
Предисловие Ю.Б. Сениченкова	11
Введение	13
Глава 1. Обзор актуальных методов имитационного моделирования биосистемных процессов и путей их совершенствования	18
1.1. Многообразие методов вычислительного моделирования биосистемных процессов и проблемы их применимости	18
1.1.1. Роль и средства системного анализа в исследованиях экосистемных процессов и рационального природопользования	19
1.1.2. Междисциплинарность направления исследований в биофизике сложных систем	20
1.2. Анализ методов формализации качественных изменений в биосистемных процессах и перспектив их улучшения	22
1.2.1. Опасные последствия выбора стратегии максимизации прибыли от использования биоресурсов	23
1.2.2. Новые задачи для совершенствования методов сценарного моделирования стремительных биофизических процессов.	24
1.2.3. Новые направления развития известных методов сценарного и ситуативного моделирования процессов в экосистемах.	25
1.2.4. Проблемы прогнозирования многокомпонентной динамики крупномасштабных экосистем	26
1.2.5. Необходимые критерии для математического аппарата в задаче прогнозирования при экспертной регуляции природопользования	29
1.3. Практическая интерпретируемость поведения нелинейных моделей динамики популяций.	31
1.3.1. Нелинейные режимы итерационных моделей популяций и критерии их возникновения	32
1.3.2. Адекватность интерпретации циклических и хаотических изменений в моделях прогнозирования состояния биоресурсов	36
1.3.3. Интерпретация сопутствующих циклическим режимам нелинейных эффектов при анализе воздействия на биосистемы	39
1.3.4. Обоснованность поведения популяционных моделей при нескольких бифуркационных параметрах для имитации ситуаций	41
1.3.5. Прогнозирование природопользования при появлении пороговых эффектов и неустойчивых равновесий в экодинамике	43
1.3.6. Вариативность трактовки возникновения нелинейных эффектов при принятии решений в природопользовании.	45
1.3.7. Нелинейные эффекты как арсенал описательных средств и прогнозирования ситуаций в экодинамике.	47
1.4. Определение критериев интерпретируемости для поведения нелинейных динамических моделей биосистем	48
1.4.1. Предложения по подтверждению наличия сущностной интерпретации поведения моделей.	51
1.4.2. Предложения по использованию интервально заданных параметров.	53
1.5. Метод анализа динамических режимов при интерпретации данных мониторинга экономически используемых популяций	55
1.6. Многофакторный анализ экодинамики кризисных ситуаций методом когнитивной графовой структуризации	59

1.7. Общность проблем формального описания разных экологических ситуаций с регулируемым воздействием	62
1.8. Роль средств имитационного моделирования в анализе регулируемых биологических процессов.	63
1.9. Постановка решаемой проблемы и логическая схема исследования	64
Выводы по главе I	66
Глава 2. Методологические основы построения переопределяемой моделирующей структуры и классификация изменений в биологических процессах	69
2.1. Цели гибридных вычислительных средств при формализации экстремальных процессов экодинамики	70
2.1.1. Возможности описательных средств гибридных систем.	72
2.2. Формализация непрерывно-событийного модельного времени для анализа жизненного цикла и регулируемого воздействия	73
2.2.1. Теоретические основы использования дифференциальных уравнений с переопределяемой правой частью в моделировании биосистем.	74
2.2.2. Средства представления гибридного времени для моделирования регулируемых биосистем	77
2.2.3. Обоснование разработки расширенного непрерывно-событийного формата гибридного времени модельных сценариев	79
2.2.4. Формализация оригинальной структуры иерархического непрерывно-событийного времени для модельных сценариев	81
2.3. Формализация стадийности развития популяционных процессов на основе гибридных структур	82
2.3.1. Модель динамики численности поколений в условиях конкуренции на последовательности непрерывных интервалов	84
2.3.2. Непрерывно-дискретная модель воспроизводства при взаимосвязи выживаемости поколений с показателем размерного развития.	86
2.4. Моделирование динамики смены поколений популяций предикативно переопределяемой вычислительной структурой.	89
2.4.1. Критерии выбора форм правой части уравнений для описания динамики поколений.	90
2.4.2. Формирование базовой переопределяемой вычислительной структуры с гибридным временем	91
2.5. Формализм гибридного автомата применительно к анализу событийных изменений в популяционных процессах	92
2.5.1. Структура набора предикатов для переопределения правых частей уравнений.	99
2.5.2. Определение начальных условий для расчета динамики поколений и их корректировка для учета факторов среды.	100
2.5.3. Включение вспомогательных уравнений для ситуативного расширения переопределяемой модели воспроизводства.	102
2.5.4. Система уравнений для стадийного процесса с предикатами переопределения правых частей	104
2.5.5. Включение циклически изменяющихся характеристик в базовую модель репродуктивного процесса	106
2.5.6. Особенности постановки задач моделирования и вариативность базовой гибридной структуры	108
2.6. Метод включения триггерных функций в предикативно переопределяемые вычислительные структуры	109

2.6.1. Анализ влияния порогового эффекта сокращения эффективности воспроизводства методом триггерных функций	111
2.6.2. Включение триггерной функции действия пороговых эффектов в непрерывные модели	114
2.6.3. Особенности экспертного регулирования эксплуатации биоресурсов с критическим неустойчивым равновесием в экодинамике.	115
2.7. Моделирование взаимосвязанных процессов на основе взаимодействия предикативно-переопределяемых структур	119
2.7.1. Вспомогательная переопределяемая вычислительная структура	121
2.7.2. Динамические свойства и нелинейные эффекты модели с двумя переопределяемыми структурами	122
2.7.3. Бифуркационная диаграмма итераций разработанной зависимости с двумя экстремумами	127
Выводы по главе 2	129
Глава 3. Преимущества и применимость предикативно переопределяемых моделирующих структур для анализа и прогнозирования биосистемных процессов	133
3.1. Анализ примеров нелинейных и пороговых зависимостей в эффективности воспроизводства популяций.	135
3.1.1. О роли неточности в исходных оценках состояния биоресурсов	135
3.1.2. Особенности зависимостей воспроизводства с тремя экстремумами	137
3.1.3. Куполообразная форма с пороговым эффектом в эффективности воспроизводства	140
3.2. Системный анализ роли и влияния плотностных факторов на выживаемость в раннем онтогенезе (по экспериментальным данным)	145
3.3. Анализ зависящих от плотности факторов динамики численности при развитии вспышек насекомых вредителей	147
3.4. Формализация взаимосвязи темпов роста ювенильных стадий рыб и динамики численности поколения	149
3.4.1. Экспериментальные подтверждения зависимости динамики убыли численности, плотности поколения и темпов роста.	150
3.4.2. Гибридная структура с переопределяемой правой частью для связи выживаемости стадий развития и темпов роста организмов	151
Выводы по главе 3	152
Глава 4. Системный анализ развития экстремальных и кризисных ситуаций в экодинамике при регулируемом воздействии	154
4.1. Анализ развития эффекта коллапса биоресурсов – факторы, общность и различия динамики.	156
4.1.1. Понятие запаса стабильности для популяции под регулируемым воздействием	158
4.1.2. Систематически наблюдаемые аспекты длительного процесса деградации биоресурсов при регулируемом воздействии.	158
4.1.3. Эффект стремительного коллапса запасов и его общие повторяющиеся особенности для разных биоресурсов	161
4.2. Моделирование в ситуации внутривидовой дифференциации при образовании субпопуляционных репродуктивных групп	167
4.2.1. Структуры уравнений для случая двух репродуктивных групп	168
4.3. О реальной достижимости стабильного максимально эффективного режима ведения промысла биоресурсов	171
4.3.1. Аспект выбора оптимизационной модели для данных биоресурсов	173

4.3.2. Альтернативный подход регуляции с фиксированным минимально сохраняемым уровнем репродуктивного запаса	175
4.3.3. Роль методов моделирования биосистемных процессов в формировании нормативной базы регулирования природопользования.	176
4.4. Коллапс запасов трески Северо-Запада Атлантики и анализ динамических стадий процесса	178
4.4.1. Обоснование регулирующих воздействие решений при неполной информации о состоянии биоресурсов	181
4.4.2. Экономические и экологические последствия коллапса трески.	183
4.4.3. Выявление действия порогового эффекта в воспроизводстве при снижении биомассы нерестового запаса	186
4.4.4. Сравнение аспектов динамики коллапса запасов трески с другими ситуациями деградации промысловых биоресурсов	188
4.4.5. Роль алгоритма принятия регулирующих решений в возникновении коллапса при экономическом использовании популяций.	190
4.4.6. Псевдостабильзация популяции и квазиоптимальный уровень изъятия в оценках состояния биоресурсов.	193
4.4.7. Предложения о принципах регуляции экономического использования популяций на основе анализа коллапсов	194
4.5. Анализ флуктуационного сценария коллапса на примере деградации популяции краба Кадьякского архипелага	194
4.5.1. Влияние популяционной цикличности на определение регулируемого воздействия	195
4.5.2. Качественные отличия сценариев динамики коллапсов биоресурсов влияющие на выбор стратегии регуляции	196
4.5.3. О необходимых и достаточных факторах для развития ситуаций коллапса биоресурсов	199
4.6. Основы регулирования эксплуатации биоресурсов в Российской Федерации и для трансграничных популяций	200
4.6.1. Нормативные основы работы экспертных комиссий РФ по биоресурсам.	201
4.6.2. Разработка и унификация в РФ стандартов принятия решений в природопользовании (ГОСТ Р 56828.34–2017)	203
4.7. Роль применявшихся методов оценки состояния биосистемы и допустимого уровня воздействия в кризисных случаях.	204
4.7.1. Критерии адекватности для принимаемых решений при регуляции природопользования	205
4.7.2. Особенности биостатистического метода прогнозирования состояния биоресурсов и оценки допустимых уловов.	209
4.7.3. Принципы регуляции на основе концепции репродуктивной изменчивости и логика предосторожного подхода к воздействию	214
4.7.4. Отличительные особенности анализа сведений о биоресурсах в разработанном подходе сценарного анализа ситуаций	215
4.7.5. Применимость известных методов теории принятия решений в задачах регуляции использования биоресурсов	216
4.7.6. О формализации экспертного опыта при выборе регулируемого воздействия	220
Выводы по главе 4	221
Глава 5. Анализ сценариев коллапсов биоресурсов при вычислительном моделировании процессов с регулируемым воздействием	224

5.1. Состав и новизна методологии построения и анализа модельных сценариев	224
5.2. Технология сценарного подхода к модельному анализу кризисных ситуаций в экодинамике и ее преимущества	225
5.2.1. Определение сценария развития кризисной ситуации с регуляцией воздействия	227
5.2.2. Параметрическая настройка гибридной вычислительной структуры	228
5.3. Сценарий коллапса запасов на основе итераций неунимодальной зависимости с равновесием-репеллером	229
5.3.1. Модельный сценарий стремительного истощения биоресурсов при эффекте касательных бифуркаций состояний равновесия	230
5.3.2. Определение способствующих сценариям коллапса характеристик зависимости эффективности воспроизводства	233
5.4. Сравнительные имитационные сценарии развития кризисных ситуаций с вариативной логикой регуляции воздействия	236
5.4.1. Формализованная логика экспертных оценок ситуации в сценариях	236
5.5. Сценарий предотвращения коллапса истощенных биоресурсов при предосторожном регулировании	238
5.6. Вычислительный сценарий коллапса биоресурсов с возникновением флуктуационного режима	240
5.6.1. Адаптация гибридной структуры для репродуктивных особенностей популяции камчатского краба	241
5.6.2. Критерии выбора свойств функций для сценарных итерационных моделей с регуляцией воздействия	245
5.6.3. Реализация функции с четырьмя нетривиальными равновесиями для анализа перехода к флуктуациям	247
5.6.4. Целенаправленная трансформация свойств модельной зависимости в имитационном сценарии	250
5.6.6. Формализация логики принятия экспертных решений для сравнительного анализа флуктуационных сценариев	255
5.6.7. Динамические особенности сценарной модели с аperiodической динамикой для коллапса популяции краба	257
5.6.8. Характеристики инвариантных множеств траектории в сценарии коллапса	261
5.7. Прогнозирование кризисных ситуаций при эксплуатации запасов с пороговыми явлениями	263
5.7.1. Прогностические возможности сценариев в нелинейной динамике с бистабильной траекторией	264
5.8. Рефлексия и мотивация при принятии решений о регуляции эксплуатации биоресурсов в сценарных моделях	266
5.8.1. Альтернативные принципы регуляции природопользования	266
5.8.2. Ограничение влияния рефлексии при выработке регулирующих природопользования мер	267
5.9. Адаптивные принципы регулирования и альтернативные стратегии организации природопользования	270
5.9.1. Сценарий с альтернативными мерами ограничения природопользования	270
5.9.2. Роль адаптации биосистем к чрезмерному воздействию в последствиях коллапса	271
5.10. Закономерности развития ситуаций коллапсов биоресурсов при экспертном регулировании промысла	273

5.10.1. Выводы о причинах и факторах развития сценария коллапса биоресурсов	274
5.10.2. Роль квазиоптимального уровня эксплуатации в механизмах развития сценария коллапса биоресурсов	274
5.10.3. Общность динамических аспектов коллапса для биоресурсов с разной возрастной структурой	275
Выводы по главе 5	277
Глава 6. Моделирование сценария развития стремительной вспышки численности насекомых	281
6.1. Сценарий развития экстремальной инвазионной вспышки	283
Заключение	285
Список литературы	286

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Применение информационных технологий, вычислительных методов и средств компьютерного моделирования для целей прогнозирования в проблемах экологии и науках о Земле имеет длительную историю становления собственной методологии. Развиваться методики построения моделей отдельных популяций стали с появлением первых доступных для расчетов еще несовершенных ЭВМ как перспективный подход в области рационализации природопользования. Вместе с методами вычислительного моделирования, которые спустя полвека работ уже нельзя считать новыми, накопились и предрассудки в отношении их возможностей, и образовалась шаблонность мышления при применении результатов расчетов в практических задачах. Важная особенность настоящей монографии в том, что автор изначально не только не пытается абсолютизировать результаты моделирования (в том числе полученные им самим), но ищет и указывает конкурентные ограничения в виде формализованных правил на биологическую обоснованность любых результатов моделирования. Автор монографии показывает, в каких условиях поведение математической модели ускользает от принципов и законов той области, для которой эта модель была предназначена и выходит за рамки обсуждения с точки зрения экологии. Необычный для математической работы взгляд на проблему интерпретации моделирования и её естественных границах вызван тем, что сам автор начинал научную работу в аспирантуре СПИИРАН именно с анализа экологических данных о многих характеристиках жизненного цикла видов. Только на заключительном этапе кандидатской работы автор переходил к построению оригинальной модели для ситуации деградации популяции осетровых Каспия и новые модели были подтверждены сравнением богатого фактического материала и диаграммами с реальными данными. В последующих работах методы построения гибридных моделей были обобщены и развиты автором для ситуационного подхода и многих других биологических объектов. В центре внимания автора всегда ситуация и её восприятие с точки зрения анализа данных ответственным специалистом.

На вычислительные методы возлагались надежды в построении прогнозов для оценки состояния биосистем при вмешательстве и планировании наиболее эффективного использования биологических ресурсов. Надежды на долгосрочное повышение результатов природопользования при решении оптимизационной задачи во многих случаях становились неоправданными. Выводы об эффективности показателей стратегии природопользования, сформированной в результате модельных расчетов, часто оказывались преждевременными. Кризисные явления, которые автор выделяет в особый динамический случай «коллапса запасов» происходили во многих экономически развитых странах, имевших и научную базу оценки запасов, и принципы ограничения их эксплуатации согласно нормативным актам.

Перед исследователями, работающими с экомоделями на ЭВМ, ставились задачи оптимизации квотирования – получения максимально возмож-

ной экономической выгоды, при этом поддержание должного безопасного состояния биообъекта было второстепенным. Господствовала концепция безусловного восстановления популяции, но оказалось, что существует сценарий безвозвратной деградации. Работы по оптимизации решались многими и разными учеными математическими методами, но минимально надежного метода получения оптимального изъятия без риска на практике не реализовано. Автор после анализа множества реальных примеров кризисов уходит от задачи оптимальности и рассматривает ситуацию с точки зрения нелинейных эффектов. В моделях гибридно-логического типа показывает в ряде сценариев, что стремление к оптимуму изъятия первостепенная причина алчности ведущей к страданиям. В центре внимание автора логика принятия экспертных решений, которые формируются у ЛПП при оценке динамики ситуации на основе прошлого опыта и обработки статистическими методами некоторой неполной информации. На нескольких примерах приведен пошаговый анализ принятия запаздывающих решений экспертами, которые приводили к кризису. Логика на основе мотивации ЛПП имитируется в модельных экспериментах, что составляет основную практическую значимость работы. Теоретическую значимость исследования составит метод формирования модельной системы из структуры переопределяемых уравнений, где факторы ситуации отражаются расширением модели, а описательные возможности гибридной модели зависят от бифуркаций и аттракторов. Монография сосредоточена в большей степени в области системного анализа эксплуатации биоресурсов, но интересы автора шире. При выполнении проекта РФФ 23-21-00339 успешно применены методы для анализа других нелинейных процессов: иммунного ответа, эпидемических волн, всплеск активности насекомых после агрессивных инвазий.

*Член-корреспондент РАН, доктор технических наук,
профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ,
руководитель научного направления Санкт-Петербургского
института информатики и автоматизации Российской академии наук
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук
Юсунов Р.М.*

ПРЕДИСЛОВИЕ Ю.Б. СЕНИЧЕНКОВА

Компьютерные среды моделирования сложных динамических систем активно развивались в начале XXI в. и сейчас превратились в повседневный инструмент ученых, работающих в области биокибернетики. Интуитивно понятные языки моделирования современных сред совершенствуются и привлекают все больше пользователей из различных областей, позволяя им строить и исследовать с помощью вычислительных экспериментов все более сложные модели реальных биосистем.

Одна из привлекательных возможностей современных языков моделирования – это возможность использовать машины состояний для описания моделей, поведение которых меняется в зависимости от произошедших событий, событийно-управляемых систем. Биосистемы чрезвычайно сложны, и биофизика – дисциплина, изучающая биосистемы с помощью математических моделей, также может, как показал автор предлагаемой читателю монографии, эффективно использовать машины состояний для построения моделей и для проведения компьютерных экспериментов, позволяющих предсказывать и управлять поведением сложных природных систем.

Машины состояний – это графическая нотация для описания особого класса математических моделей, событийно-управляемых динамических систем. Предложены они были Д. Харелом для конечных автоматов «Narel Statechart» и получили широкое распространение, в частности благодаря языку моделирования Unified Modelling Language (UML). Под воздействием управляющих сигналов событийно-управляемая система – диаграммы состояний языка UML меняет свое состояние и начинает жить по новым законам. Состояние или локальное поведение системы можно связать с системой обыкновенных дифференциальных уравнений, динамической системой, и тем самым построить сложную динамическую систему, реагирующую на события сменой локальных поведений. Такая трактовка машин состояний была впервые использована в созданных в Санкт-Петербургском политехническом университете средах AnyLogic и AnyDynamics (карты поведения) в середине 1990 гг. Схожий подход лежит в основе компоненты StateFlow (Matlab), используется в языке Modelica, среде Ptolemy II и многих других.

В своей монографии, автор, опираясь на опыт использования машин состояний для моделирования технических систем, предлагает свой, оригинальный подход к конструированию моделей экодинамики. Во второй главе автор обосновывает методологию проблемно ориентированной организации гибридных предикативно-переопределяемых вычислительных структур. В результате подход позволил для моделирования экологических систем оригинально использовать гибридные системы, математическую модель и их компьютерную реализацию как машины состояний.

Математическая модель «гибридные или событийно-управляемые системы» хорошо известна математикам, заметим, что отечественные ученые внесли большой вклад в их изучение, и успешно используется для решения технических задач. Постепенно гибридные системы начинают проникать в другие области, и данная монография, хочется надеяться, поможет биоло-

гам оценить их возможности для решения экологических проблем, так как автор не только построил новые модели, но подробно объяснил, что такое гибридные системы, в чем их преимущества для описания изменчивости поведения перед другими математическими моделями.

К числу достоинств монографии можно отнести и то, что помимо введения в теорию гибридных систем, помогающего читателю лучше оценить новизну и оригинальность авторского подхода, книга содержит много конкретных примеров на основе выполненных проектов РФФИ и РФФИ, позволяющих специалистам составить свое мнение о достоинствах и недостатках предлагаемого подхода. Приятно отметить, что автор монографии остановил свой выбор на отечественных разработках Санкт-Петербургского политехнического университета, средах AnyLogic и AnyDynamics.

*Профессор высшей школы программной инженерии
института компьютерных наук и кибербезопасности
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого
Сениченков Ю.Б.*

ВВЕДЕНИЕ

Монография отражает основные результаты исследований автора в теоретической математической биофизике и в междисциплинарной области системного анализа развития реальных практически важных экстремальных и специфических кризисных процессов в биосистемах. Арсенал математических методов биофизики постоянно требует целенаправленного совершенствования для прогнозирования вновь возникающих и уникальных ситуаций. Для прогнозов стремительно развивающихся и адаптивных процессов нет универсальных решений даже у экспертов. Пандемия COVID-19 показала, что критический тезис Стивена Хокинга «иллюзия знаний хуже невежества» актуален для прогнозирования сложных вариативных процессов. При наличии многих известных методов моделирования эпидемий оценка ближайших перспектив для не полностью детерминированного и необычного эпидемического процесса на основе знания прошлых ситуаций о динамике завершений пандемий гриппа после создания «коллективного иммунитета» не подготовила общество к вновь возникающим проблемам. Прогнозы региональных эпидемий в 2020 г. не учли необычно быстрой эволюции коронавируса с созданием разнообразия штаммов в форме эволюционных ветвей. Эпидемическая ситуация в 2023 г. меняется в форме региональных COVID волн после генерации новых прорывающих иммунитет штаммов на фоне симптома постковидного иммунодефицита у ранее болевших. Известные модели эпидемий не учитывали многие новые факторы.

Изученный опыт моделей эпидемий показал, что ключевая идея нового метода в том, что модель должна трансформироваться вслед за эволюцией объектов моделирования и представляться не как априорный закон изменений процесса, но как набор из заданных предикатами сценариев, выполняющихся при фиксации ряда определенных условий. При управлении биосистемами и необходимости выработки реакции на складывающуюся обстановку происходит изменение оценки состояния биосистем и далее на основе качества оценки трендов изменений корректируется антропогенное воздействие.

Автор проводит обзор многообразия методов моделирования биосистем и основных проблем для практического применения результатов расчётов. Важнейшая причина противоречий с реальностью в отсутствии сущностной биологической интерпретации у ряда режимов поведения траектории моделей и сопутствующих им нелинейных эффектов. Поведение решений уравнений моделей (непрерывных и дискретных) подчиняются фундаментальным теоремам теории бифуркаций динамических систем. Потому за появлением одного из нелинейных эффектов последует другой (за усложняющейся цикличностью возникает хаос), но некоторые оказываются избыточными с точки зрения их интерпретации в контексте биосистем. Автор предлагает избегать сценариев хаотизации и целенаправленно проводить только нужные трансформации.

В название монографии вынесен современный термин «экодинамика», который применяется в различных областях, часто в далеких от биологи-

ческих задач описаниях технических проектов – «экодинамика общественного производства». В данной работе под экодинамикой понимается совокупность изменяющихся при взаимодействии и коадаптации компонентов реальных живых систем, сложившихся в результате естественной эволюции и в настоящее время испытывающих антропогенное воздействие. Именно давление нашего социума становится важнейшим фактором трансформации экосистем и фактором эволюционного отбора, ведь промысел не только изымает биомассу, но и изменяет шансы оставить потомство у различных генетических групп.

В главах 2 и 4 монографии изложены основы разработанной автором методологии проблемно ориентированной организации гибридных предиктивно-переопределяемых вычислительных структур. Гибкие расширяемые структуры разрывных уравнений являются развитием известного формализма гибридных автоматов. Цель разработки оригинальной структуры в адаптации базовой непрерывно-дискретной модели для динамики различных экологических систем. Способ практического применения моделей с событийностью – сценарный анализ с учетом алгоритма формирования внешнего воздействия для исследуемой ситуации, что продемонстрировано на ряде примеров. Все примеры сопровождаются экологическим обзором факторов.

Средствами формализации особенностей жизненного цикла при формировании новых поколений популяций в дифференциальных уравнениях и включения логически заданных правил принятия управляющих экспертных решений удалось перейти к сценарному анализу, приближенному к особенностям изучаемых реальных кризисных ситуаций в разных биосистемах. Можно было бы назвать это построение «моделирование с множественной импликацией принципов выработки решений», но еще Ричард Фейнман заметил, что сложность терминологии и специфический жаргон часто используют для маскировки отсутствия глубокого понимания. Не будем без нужды вводить сложные термины, но по мере их необходимости с пояснениями.

При обосновании моделей использованы фактические материалы изученных автором реальных кризисных ситуаций при регулируемой эксплуатации биоресурсов. Процессы отличались возникновением нелинейных эффектов, трудно прогнозируемых для определяющих уровень промышленного давления экспертов. В результате сравнительного анализа модельных сценариев показан систематический характер ошибок в оценках состояния биоресурсов. Ошибки отражаются в завышении промышленных прогнозов и стремительному коллапсу в момент, когда эксперты оценивают состояние биоресурсов как стабильное. Причина явлений промышленной деградации при квотировании добычи часто кроется в скрытых пороговых эффектах – резком и непропорциональном сокращении эффективности воспроизводства ценных популяций. Действие принципа агрегированной группы «эффект Олли» отражено автором оригинальным методом – особыми динамическими триггерными функциями, встроенными в уравнения гибридной системы. В функции-триггеры можно удобно вводить стохастическую компоненту и получать интервально действующее возмущение для дискретной составляющей траектории модели динамики биоресурсов.

Для обоснования методики представления уравнений модели проведен по опубликованным в промышленных отчетах данным мониторинга обзор ряда реальных примеров возникновения эффекта популяционного коллапса. Отмечено, что эффект коллапса происходит часто при научно регулируемом промысле биоресурсов. Комплексное исследование динамики истощения запасов трески у берегов Ньюфаундленда, камчатского краба в водах Алеутского полуострова, анчоуса Перу, сига озера Онтарио и осетровых видов рыб Каспийского моря позволило сопоставить роль и типы нелинейных эффектов и определить необходимые для описания метаморфозы для режимов поведения дискретной составляющей траектории гибридной системы.

При алгоритмической реализации рассмотрены сценарные вычислительные эксперименты, где согласно включаемой в сценарий алгоритму логики принятия управляющих решений с учетом мотивации рассмотрена последовательность стадий развития процесса, финал которого определен как коллапс запасов. Подтверждено, что стремление к оптимизации к прибыли от природопользования и мотивация откладывания необходимых нежелательных для экономики решений, непосредственная причина проблем. Сравнение стадий деградации ценных популяций определяются и далее классифицируются характерные признаки ситуации, которая скоро приведет к необратимому истощению запасов. В ситуации популяции камчатского краба и сига оз. Онтарио коллапс был констатирован после режима флуктуаций, тогда как для осетровых рыб Каспия и трески у берегов Канады после периода стабильных уловов. Показано в разных модельных сценариях, – квотирование изъятия не является надежным методом регуляции при природопользовании. Предлагаются меры ограничения технической возможности для промысла, направленных на снижения экономической рентабельности, если численность, плотность популяции акватории ниже критической, и остановки эксплуатации.

В главе 1 проводится обзор развития научного направления математической биофизики и анализ практики применения методов моделирования биосистемных процессов. Сравняются нелинейные режимы итерационных моделей эксплуатируемых популяций и критерии их возникновения. Обсуждается общность проблем формального описания разных экологических ситуаций с регулируемым воздействием. Дано определение критериев интерпретируемости поведения нелинейных динамических моделей биосистем.

В главе 2 описан метод построения переопределяемой моделирующей структуры для анализа изменений в биологических процессах и формализовано непрерывно-событийное модельное время для анализа жизненного цикла рыб. Для учета пороговых эффектов предложены встроенные функции-триггеры. Сформирована базовая гибридная структура на основе гибридного автомата.

В главе 3 дано обоснование метода построения гибридных предикативно переопределяемых структур с точки зрения современной экологической теории и анализ условий его применимости. Полученные формы модельных зависимостей эффективности воспроизводства и графики убыли численно-

сти поколений подтверждены реальными примерами из ряда классических работ по анализу воспроизводства и современных отчетов промышленной статистики.

В главе 4 проведен анализ развития ряда важнейших для экономики кризисных ситуаций в биосистемах при регулируемом природопользовании. Определены сходства и различия реальных сценариев коллапсов биоресурсов.

В главе 5 реализован сравнительный сценарный анализ коллапсов биоресурсов при вычислительном моделировании процессов с формализованной логикой регулируемого воздействия при принятии решений. Выявлены особенности прогнозирования кризисных ситуаций при эксплуатации запасов с пороговыми явлениями и экспертным управлением. Выработан принцип адаптивного регулирования уровня изъятия и альтернативные квотированию стратегии организации рационального природопользования. Квотирование изъятия – это всегда компромисс сторон. Показано, что не существует метода квотирования, который бы устраивал все стороны и устранял риск коллапса.

В главе 6 показано применение разработанной методологии для моделирования другого актуального биофизического процесса – представлен вычислительный имитационный сценарий развития краткой вспышки численности насекомых вредителей, способных к разрушению среды обитания. Подобные переходные процессы взрывообразного роста численности часто сопровождают инвазии и следуют после проникновения агрессивных чужеродных видов в новый ареал, когда автохтонное биотическое окружение не успевает вырабатывать механизмы адапционного противодействия вселенцу. Инвазионные процессы чрезвычайно разнообразны по свойствам своей динамики и представляют в современном мире отдельную проблему для экосистемного прогнозирования и выработки мер противодействия вредным новым видам в изолированных ранее сообществах, таких как Каспийское море.

Гибкие гибридные структуры обладают возможностью ситуативной адаптации и перспективой расширения для модельного описания других актуальных задач биофизики. Модифицированная вычислительная структура была дополнена с включением дополнительных триггерных функций, что позволило имитационно описать сценарий экстремального развития популяционного процесса. В сценарной модели рассмотрен вариант порогового развития кратковременной вспышки численности с пороговым развитием на примере динамики опасных насекомых вредителей, разрешающих собственную среду. В полученном сценарии популяционная динамика стремительно меняется при достижении популяцией порогового значения, когда биотические факторы-регуляторы не могут более контролировать стремительное размножение насекомых вредителей, которое продолжается вплоть до потери листвы и гибели лесных массивов. Далее вспышка столь же стремительно завершается, а популяция, особенно если это новый для среды инвазионный вид, оказывается на грани выживания – кризиса «бутылочного горлышка». Финальная стадия ситуации – после резкого снижения численности и завершения

вспышки имитируется переходом в режим спорадических флуктуаций, зависящих от случайных факторов изменчивой среды и климата. Согласно сценарию именно в момент снижения численности после исчерпания ресурсов инвазивная популяция наиболее уязвима для мер химического или наиболее перспективного биотического противоборства с вселенцами – интродукции видов-антагонистов.

В заключении монографии рассмотрен сценарий гибели агрессивной инвазивной популяции с чрезмерным репродуктивным потенциалом – обратная сторона одного синергетического эффекта, действовавшего и для явления коллапса промысловых биоресурсов.

ГЛАВА 1. ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОСИСТЕМНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПУТЕЙ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Цель главы – на основе систематизации современного опыта исследований оценить направление расширения формальных методов, необходимых для описания трансформирующихся биосистемных процессов и актуальных при анализе вариантов развития специфических кризисных ситуаций для выработки решений при непосредственном управлении эксплуатацией запасов. В обзоре очертим аспекты современных проблем, интересных с точки зрения обобщения возникающих изменений, проявлений пороговых состояний и нелинейных эффектов. В результате обсуждения актуальной проблематики сформулируем предложения, позволяющие, оценивая свойства ситуаций, выбрать адекватный данной задаче способ формализации (непрерывные, итерационные, гибридные, графовые модели) и обходить специфические сложности при анализе моделей реальных биосистем, устраняя противоречия при их практическом обосновании.

Обсуждение применявшихся в биологической трактовке с перечислением формальных динамических моделей в виде перечня заняло бы много томов, потому в обзорной части работы сосредоточим внимание на классификации проблем применимости и обоснованности известных прогностических моделей эксплуатируемых популяций. Установление соответствия свойств разных методов построения моделей и реальных популяционных явлений значимый аспект для систематической и непротиворечивой интерпретации сценариев изменений режимов существования биосистем при регулируемом воздействии. Методы системного анализа в наших работах по биофизике используют критерии адекватности поведения модели и возможности его сущностного обоснования.

Конфигурацию вычислительной модели в развиваемом нами подходе будут определять полученные в результате анализа динамики развития исследуемой ситуации представления о необходимых для их описания нелинейных эффектах.

1.1. МНОГООБРАЗИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОСИСТЕМНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ПРИМЕНИМОСТИ

Научное направление, в рамках которого в работе развиваются методологические подходы для анализа происходящих в современных нестабильных живых системах изменчивых процессов, прошло длительный путь развития. Математические методы и концепции системного анализа еще не стали общепринятыми, но уже используются в задачах

популяционной экологии и организации природопользования. Работы по развитию формальных методов для исследования свойств биосистем и происходящих в них изменений получили признание их важности после многих случаев кризисов ценных биоресурсов из-за избыточного давления промысла. Формальные методы при регулировании природопользования требуют совершенствования из-за стремительно развивающихся инвазий чужеродных видов и изменений границ ареалов.

При появлении новых задач для формальных методов системного анализа сохраняют актуальность и традиционные проблемы биокибернетики промысла. Универсальный алгоритм для выбора регуляторами рациональной стратегии использования биоресурсов не выработан. Опыт на ранее уже истощенных ценных популяциях не помогает при прогнозировании возникновения новых кризисов в современной ситуации из-за продолжающегося роста населения и, соответственно, потребностей. Для обоснованного сценарного моделирования необходим фактический сравнительный анализ реальных проблемных ситуаций.

1.1.1. Роль и средства системного анализа в исследованиях экосистемных процессов и рационального природопользования

Сравнительный обзор методов моделирования в экологии приведен в работе Дж Джефферса [1], который одним из первых назвал свой подход «системным анализом» (СА) и определил его задачи в экологии следующим образом: «СА организует наши знания об объекте так, чтобы помочь выбрать нужную стратегию или предсказать результаты нескольких стратегий, которые представляются целесообразными для тех, кто должен принимать решения». Под термином «системный анализ» автор [1] понимает: «упорядоченную организацию данных в виде моделей, сопровождающуюся строгой проверкой и анализом самих моделей, необходимыми для их верификации и совершенствования». В таком представлении системный анализ фигурирует (по отношению к моделированию) как некоторая ключевая ассистивная технология, повышающая функциональные возможности модели для прогнозирования поведения систем при управлении.

В определении системного анализа у Джефферса есть упрощение, – о том, что используемые данные кто-то до нас уже собрал и подготовил, преобразовал в знания об объекте. Теперь мы сможем построить модель, её верифицировать и получить новые знания об объекте в виде прогноза развития ситуации. В реальных исследованиях автору модели приходится добывать нужные знания в архивах, сопоставляя схожие экологические ситуации и складывая картину причин и их следствий из отдельных фрагментов. Следовательно, при моделировании мы как теоретики используем методы структуризации информации о влиянии факторов, пусть и неявные – в форме рассуждений и импликаций. Логично предположить, если у экспертов есть достаточные знания обо всех факторах и данные мониторинга, то кризисные ситуации при управлении не возникнут или они будут своевременно разрешены.

Различным математическим методам в общей биологии и связанным с ней частным областям (эпидемиологии, иммунологии, генетики и др.) посвящены многие фундаментальные монографии, подробно охватывающие современное состояние: Д. Мюррея [2], М. Дж. Смита [3]. Нелинейным явлениям в экологии посвящены работы отечественных авторов Ю.М. Свирижева [4], [5], А.Д. Базыкина, Р.А. Полуэктова и Ю.А. Пыха [6], А.С. Братусь и А.С. Новожилова [7]. Матричные модели популяционной структуры развивались в работах Д.О. Логофета [8]. Моделированием общих принципов теории эволюции успешно занималась группа В.Ф. Левченко в ИЭФБ РАН [9]. Алгоритмические методы в моделях биосистем продолжает развивать патриарх отечественной школы эко-моделирования В.В. Меншуткин [10]. В.В. Михайлов, В.Е. Марлей совместно с Ю.С. Решетниковым (участником межведомственной ихтиологической комиссии) разработали модель рыбного сообщества озера Севан [11] и эвтрофирования озера Чао (КНР) на основе формализма алгоритмических сетей.

Работ, направленных на модельное описание определенной популяции в составе ихтиоценозов, достаточно много (отметим монографию В.В. Конторина по возрастной структуре байкальского омуля как наиболее детализированную [12]). Такие работы, как и когортный анализ, основываются на некоторой базовой зависимости в эффективности воспроизводства – оценке численности нового поколения. Парадоксально, но связанная с исследованием действия промысла детализация не увеличивает прогностических возможностей моделей при появлении нелинейных эффектов.

Исследованием колебаний в моделях популяций промысловых рыб успешно продолжают заниматься Бобырев А.Е., Бурменский В.А., Криксунов Е.А. [13]. Математические методы в теории рыболовства как «Формальная теория жизни рыб» заложены Ф.И. Барановым [14] и Г.В. Никольским [15].

Свойства странных аттракторов в дискретных моделях динамики популяций изучает научная школа Е.Я. Фрисмана [16]. Моделированию углеродного баланса экосистем посвящены работы Г.С. Розенберга [17]. Анализ влияния гидрологических факторов на экосистему Азовского моря проводится А.И. Сухиновым [18] и А.В. Никитиной [19]. Замечательные лекционные курсы о математических методах в биологии и экологии созданы Г.Ю. Ризниченко [20].

1.1.2. Междисциплинарность направления исследований в биофизике сложных систем

Исторически в развитии научного подхода первой оказалась практическая проблема – необходимость исследования принципов демографии и построения формальной теории роста народонаселения стран [21]. Актуальной для XVIII века задаче прогнозирования роста населения посвящены работы Леонарда Эйлера [22], выдающегося математика своего времени. Эйлер использовал построение геометрических прогрессий, но возникла проблема, которую великий математик не смог разрешить. Полученные им

результаты по оценке скорости роста населения не соответствовали базовой гипотезе, принятой в то время о том, что все современное население происходит от трех пар, которые выжили после Всемирного потопа. В XVIII в. Эйлер не мог опубликовать свои математические результаты по расчету темпов прироста населения, как противоречащие общепринятым воззрениям и оценкам библейской хронологии времени от начала существования человеческой популяции. Приведенный пример поучительный исторический научный казус, но характеризует и особенности практического применения математики для получения новых знаний о живых системах, развивающихся по внутренним изменчивым принципам эволюции.

Полученные с применением формализованных методов результаты требуется согласовывать с принятой биологической теорией, хоть и несравненно более развитой, чем представления о происхождении человеческой популяции в XVIII в. Необходимость подтверждения модельных решений анализом ряда примеров и данными наблюдений одно из отличий проблематики наших длительных исследований в области системного анализа разных процессов в живых системах от задач математического моделирования технических систем.

В настоящее время область математической биологии разделилась на много взаимодействующих специальных направлений. В сфере интересов работ автора анализ динамики экологических сообществ (экодинамика) – междисциплинарное исследование процессов взаимодействия компонентов биосистем. Задачи Экодинамики включают изучение трендов и факторов изменения численности популяций в изменчивой среде обитания – экологических системах, испытывающих различные по генезису воздействия [23]. Мы можем оперировать подобным синтетическим понятием по примеру Германа Минковского, который ввел термин «геометродинамика» для геометрической интерпретации теории относительности в четырехмерном пространстве-времени. Понятие экодинамики расширяет область популяционной экологии и исследования принципов регулирования численности в комплексной взаимосвязи с изменяющимися факторами среды и регулируемого воздействия.

Очевидная междисциплинарность исследований в этой области проявляется при обосновании выбора правил регулирования антропогенного воздействия на живую адаптивную систему и формализации прогнозов развития ситуации.

В большинстве обзорных работ рассказывают о создании различных систем уравнений как о достижениях в развитии математических методов для описания живых систем. Иногда непросто в условиях неопределенности выбирать наиболее подходящие решения моделей. Классические методы моделирования сформированы к середине 1980 годов, в том числе и теория оптимального изъятия биоресурсов. К ранее известным подходам были добавлены результаты исследования хаотической динамики траекторий [24]. Хаотические режимы моделей активно, но не системно применяются для описания разных явлений в экологии. В данной работе отдельно обсудим хаотизацию как специфическую особенность сценариев при анализе воздействия. Систематизируем применение хаотических режимов (они могут

быть различных типов), сравнивая их свойства с реальными ситуациями при управлении стратегией эксплуатации биоресурсов.

1.2. Анализ методов формализации качественных изменений в биосистемных процессах и перспектив их улучшения

Много исследований [25] посвящены стратегии оптимизации эксплуатации биоресурсов. Проблемный аспект направления в том, что часто переносится математический аппарат, развивавшийся изначально для технических задач. Критериями оптимальности в таком случае оперируют для объекта, являющегося частью большой адаптивной системы в конкурентном и нестабильном окружении. При большом наборе математических методов теории оптимального управления, сложности при их практическом применении в областях, относящихся к взаимодействию с биосистемами, не только сохраняют актуальность, но и возрастают. Задача организации рационального природопользования и выбора не истощающего биоресурсы режима промысла, который при этом максимизировал экономический эффект от использования объекта, усложняется со временем [26].

Успешность долгосрочного природопользования базируется на оценке состояния биосистемы, которая находится под воздействием и своевременности необходимых решений по корректировке воздействия. Стратегию регуляции воздействия в природопользовании (в большинстве стран ведущих регулирующую эксплуатацию) устанавливают компетентные «лица, принимающие решения» (ЛПР) [27]. Проводятся работы по стандартизации процедуры принятия решений [28], что будет обсуждаться в отдельном разделе.

Обычно в составе экспертных комиссий при уполномоченных организациях ЛПР действуют на основе сопоставления информации о состоянии объекта эксплуатации и среде обитания, прогнозов и ожиданий, рекомендаций ГОСТ, имеющегося у ЛПР предыдущего опыта и экономической мотивации, расстановки приоритетности целей в данной хозяйственной деятельности и достигнутых компромиссов, если используются трансграничные биоресурсы.

Задача ЛПР в природопользовании – оценить состояние биологического объекта, его способность к самовосстановлению, и установить неразрушающее воздействие, обеспечивающее рентабельность [29]. Идеи теории принятия решений о сравнении альтернатив и выбора оптимальной не применимы в таких задачах, так работы строятся на точности оценок и анализе трендов экодинамики.

Формализованный анализ кризисных ситуаций в экодинамике в работе целесообразно рассматривать и с внутренними изменениями, и с учетом логики выработки регулирующих решений ЛПР. Концепция, ориентированная на логику изменений и вариативность трендов развития ситуаций, позволит развивать средства имитационного моделирования на основе заданных логико-динамических сценариев как инструмент системного анализа сложных ситуаций.

1.2.1. Опасные последствия выбора стратегии максимизации прибыли от использования биоресурсов

Биоресурсы истощаются из-за эксплуатации, выработанной и регулируемой согласно концепции максимального устойчивого вылова [30], но оказывающейся чрезмерной после краткого времени получения стабильных уловов. В результате происходит резкое падение объемов добычи. Экономические потери из-за деградации популяций превосходят ожидаемую прибыль от оптимизации.

Сейчас все больше специалистов по морской экологии вместо не оправдавших надежды методик оптимизации (их разрабатывали многие страны) предлагают включить в нормативные документы альтернативный принцип – предосторожной эксплуатации [31]. Для теории оптимального управления задача нетрадиционная. Развиваются модели с формализацией задачи о предосторожной стратегии, но решение требуется не на уровне теоретических математических результатов. Необходимы правила и алгоритмы регуляции воздействия, применимые для специфических ситуаций и уже истощенных ранее биоресурсов.

В [32] рассмотрена стратегия «превентивного подхода» к регулированию на специфическом примере охоты инуитов на гренландских китов. Ученые смогли организовать учет их численности, восстановившихся после долгой деградации.

Ситуации деградации популяций учащаются во многих регионах [33]. Теория оптимизации эксплуатации биоресурсов в настоящее время не учитывает много сопутствующих факторов. Многими специалистами на основе их опыта применение стратегии «Максимальный уравновешенный улов» (MSY) считается контрпродуктивным. Стратегия предполагала постоянство репродуктивного потенциала вида в данной среде. В MSY ускользает ряд факторов. Промысел изымает не только биомассу, но и генофонд – опасно влияет на генетическую структуру популяции [34]. Изъятие ведет к уменьшению средней плодовитости у крупных и долгоживущих видов рыб, преобладанию короткоцикловых форм в популяции, повышению смертности рано созревающих рыб после нереста.

По опыту ЛПР знают явные признаки истощения популяции (измельчание, раннее созревание и др.), но это последствия. Проявления изменений размерно-возрастной структуры фиксируют эксперты после статистической обработки предоставляемых данных от промысла немного позже, чем необходимо для прогнозирования кризиса. Регуляция воздействия ведется по *запаздывающей информации* о состоянии объекта и это будем учитывать в анализе сценариев.

Математическая задача об оптимальном режиме промысла решалась в моделях Абакумова А.И. [35], Ильичева В.Г., Дашкевича Л.В. [36] и др. авторов, В рамках настоящих исследований сосредоточимся на других задачах анализа ведения природопользования. Если описанная проблема при больших усилиях исследователей в области математического и компьютерного моделирования не была окончательно разрешена в доступной ЛПР форме, то нам целесообразно развивать гибкие подходы к объяснению кризисных ситуаций.

Предлагаемые сценарные модели приблизят вычислительный эксперимент к тем выводам и суждениям, на которых основывают решения в реальности.

1.2.2. Новые задачи для совершенствования методов сценарного моделирования стремительных биофизических процессов

Необходимость совершенствования и неполнота существующих методик проявились при попытках прогнозирования завершения современной пандемии. Имеющиеся средства конструирования моделей оказываются недостаточно гибкими для обоснования времени начала и завершения эпидемических волн и прогнозирования появления новых штаммов вируса. Задача прогностического изучения запуска волн пандемии в современных условиях глобализации не была решена за два года даже с задействованием больших научных ресурсов, хотя математические модели в области эпидемиологии предлагались достаточно давно [37]. Известные эпидемические SIRS-системы уравнений хорошо описывали развитие локальных скоро завершающихся случаев, описанных ранее вспышек инфекционных заболеваний и эпидемий гриппа. Прежние методы не учли необходимость рассматривать направление коэволюции нового для популяции мутирующего вируса и популяционного иммунитета.

Живые системы, реагируя на изменения в среде, сами естественным образом создают постоянно новые проблемы, с которыми ученые ранее не сталкивались в математических исследованиях. Многие изученные на первый взгляд проблемы дополняются неожиданными современными аспектами, новыми факторами или поступившими данными экспериментальных исследований. Сейчас ученым известно гораздо больше фактов о функционировании адаптивной иммунной системы, чем исследователи знали в 2000-е гг., и использовали в работах по моделированию иммунного ответа. Механизмы взаимной активации иммунных клеток и алгоритмы формирования репертуара их рецепторов оказались существенно сложнее, чем предполагалось ранее, например, формулировалось в системах уравнений для математического моделирования в иммунологии Г.И. Марчуком [38]. Многие живые системы, как работа комплекса иммунных клеток, не полностью предопределены, включают чрезвычайно сложные событийные алгоритмы, потому трудно поддаются непосредственной математической формализации. Количественные показатели иммунного ответа (титры антител) не всегда определяют успех подавления инфекции, если эффективность связывания антител с вирусом последовательно снижается.

Для процессов со сложной конфигурацией составляющих разрабатываются феноменологические модели, которые описывают «внешнее» поведение, и последовательно улучшаются с рассмотрением новых специфических случаев.

Новые проблемы для исследования функционирования биосистем создаются сейчас регулярно при непосредственном вмешательстве – участии антропогенного фактора. Для многих многочисленных ранее популяций

антропогенное изменение среды обитания стало критическим, так гидро-строительство разрушило сложившуюся у вида эволюционную стратегию адаптации, сократив пути миграции в реки у осетровых рыб из Каспийского моря.

1.2.3. Новые направления развития известных методов сценарного и ситуативного моделирования процессов в экосистемах

Сложности применения традиционных математических методов (на основе численного решения систем дифференциально-разностных уравнений) обнаруживаются не только при вновь возникающих задачах в анализе динамики изменений биосистем. Проблемы интерпретации результатов расчетов для получения новых знаний о биосистемах возникают в областях, где давно, казалось бы, накоплен арсенал методов прогнозирования развития ситуаций. При математической формализации уже используют существующие знания о процессах, но в отличие от моделей физики, для экологии это не гарантирует возможности получения новых сведений о функционировании процессов.

Прежде всего к такой старой проблемной области относится задача оптимизации эксплуатации биоресурсов. У разных методов формализации процессов, как показал наш опыт работ в области моделирования природных процессов, оказывают свои недостатки и ограничения при применимости их к реальным ситуациям. Потому, несмотря на многочисленные успешные работы, развитие методов системного анализа процессов в живых системах и их оптимального использования остается актуальным с использованием новых строгих математических результатов, полученных при исследовании нелинейной динамики не унимодальных функциональных итераций.

В современных условиях глобализации и климатической нестабильности острой проблемой существующих методов является описание нескольких резких и структурных изменений в характере развития биологических процессов. Подобные изменения связаны с экстремальными состояниями вспышками численности либо демографическими кризисами популяций. Основным средством математического представления наблюдаемых метаморфозов в развитии биосистем являются результаты теории бифуркаций о возникновении топологически неэквивалентных притягивающих множеств для траектории.

Чаще всего интерпретировалось для популяций появление циклических решений систем уравнений [39]. Расширением методов трансформаций фазовой плоскости стало применение теории катастроф как обобщающей концепции [40], описывающей качественные перемены для динамических систем с особенностями. Основная «особенность», которую исследуют методы теории катастроф, в том, что устойчивое равновесие при непрерывном изменении параметров среды может стать неустойчивым, а непрерывный процесс соответственно при этом может стать прерывистым (разрывным). ЛПР нужно постоянно адаптировать правила принятия решений к этим вариантам.

Разнообразные ситуации изменения видового состава при инвазиях и/или целенаправленной интродукции видов отражаются на состоянии экосистем часто непредсказуемым образом для принимавших решения экспертов. Динамика инвазивных популяций в новой биотической среде существенно отличается от ситуаций в сложившихся экосистемах, что мы отдельно рассмотрим в моделях ситуации всплеск. Основная проблема наблюдения нелинейных эффектов в популяционной динамике в том, что эти экстремальные явления описываются с разнообразными свойствами [41], часто противоречивыми с точки зрения критериев возникновения бифуркаций в пространстве параметров.

Аналогично, заметно различаются по динамическим свойствам процессы развития популяционных кризисов из-за чрезмерной эксплуатации (говорят о перелове или о коллапсе и деградации биоресурсов). Важной проблемой остается модельный анализ последствий прямого антропогенного фактора – эксплуатации биоресурсов. Кризисы возникают и при контролируемом вмешательстве, и при заданном алгоритме управления воздействием [42]. Оптимизация эксплуатации с точки зрения максимизации прибыли от объекта промысла не считается уже многими авторами актуальной задачей [43], так как по многочисленным примерам промысла приводит к неустойчивому [44] состоянию популяций, которая может далее перейти в ситуацию деградации, иногда стремительно.

1.2.4. Проблемы прогнозирования многокомпонентной динамики крупномасштабных экосистем

Интересно анализировать многогранный опыт в области экосистемного моделирования. В СССР предпринимались проекты по построению моделей не только динамики отдельных взаимодействующих популяций, но и целых водных экосистем начиная с 1972 г. В масштабных проектах в СССР как моделирование Финского залива и экосистемы озера Севан были задействованы как ученые математики, так и естественнонаучные институты. Сейчас нет такой практики.

В области разработки имитационных вычислительных экологических моделей отечественные разработки на рубеже 1970–80 гг. по основам теории не отставали от европейских аналогичных исследований. Сложности возникали из-за ограниченных возможностей аналоговой вычислительной техники и несовершенства численных алгоритмов решения уравнений. Отметим, что на том момент еще не была разработана строгая теория каскадов бифуркаций и образования хаотических аттракторов (работы Фейнгенбаума, Коллета, Экмана и Синая), потому получаемые в сценариях результаты еще не могли бы получить сущностную интерпретацию и сравнительного сопоставления, что подразумевает современная концепция системного анализа в качестве расширения методики моделирования процессов на основе систем уравнений.

Особенно интересно отметить монографию А.Б. Горстко [45] о проекте математического моделирования экосистемы Азовского моря, как ин-

струменте стратегического долгосрочного планирования деятельности по рациональному природопользованию на десятилетия. Разрабатываемая с 1979 г. экосистемная модель была призвана решать задачи СА до развития доступных IT-технологий.

Разработка ИС «Азовское море», полагаемой «сложным интегративным инструментом поддержки инициатив по управлению рациональным использованием морских ресурсов» (работа отмечена в 1983 г. Государственной премией СССР) была предпринята в тесном сотрудничестве гидробиологов АзНИРХ и Института механики и прикладной математики под руководством академика И.И. Воровича. Имитационная система с дискретным шагом времени задействовала сто двадцать переменных состояния в каждом из структурно выделенных пространственных разбиений водоема – семи модельных взаимосвязанных блоков «компартов» [46]. Практической целью имитационной системы Азовского моря представлялось прогнозирование влияния антропогенного воздействия на экосистему с целью поиска возможностей корректировки данного влияния. Несмотря на наличие модельных прогнозов, значимые меры (строительство гидротехнических объектов, дамб и каналов) по поддержанию оптимального баланса пресного и соленого притока в Азовское море не были реализованы. Объем речного стока зависит от погодно-климатических факторов (баланса осадков и испарения), но долговременно прогнозировать погодные изменения на десятилетия недостаточно возможностей даже при использовании современных многопроцессорных ЭВМ. Следовательно, многокомпонентная экосистемная модель будет повышать уровень неопределенности, заложенный в ее самом базовом компоненте.

Потребность моделирования исходно была обоснована авторами модели усиливающимися кризисными явлениями в экосистеме. В 1930 годы Азовское море было рекордным по биопродуктивности водоемом мира, но в дальнейшем получаемая продукция на единицу площади акватории моря неуклонно снижалась. Негативной тенденции способствовали ряд очевидных факторов. Моделирование сценариев последствий осолонения моря и снижения стока биогенных элементов из рек никак не смогло переломить динамику изменения гидрологического режима. В настоящее время множество ценных азовских промысловых популяций рыб находятся в состоянии длительной деградации.

Трудно сейчас уверенно сказать, помогли бы обсуждаемые тогда меры по переброске стока северных рек и строительству дамбы в Керченском проливе. Скорее всего, подобные меры вмешательства создали бы другие непредвиденные моделью проблемы в экосистеме, как, например, это произошло в Каспийском заливе Кара-Богаз-Гол, или в Финском заливе после введения защитной дамбы в эксплуатацию обмен воды с морем снизился, потому резко усилилось «цветение воды» и возросла биомасса вредных синезеленых водорослей. Ожидания от математического моделирования, по нашему мнению, были исходно завышены. Модели не смогли предсказать быстрое повышение уровня Каспия в 1980-х годах.

В настоящее время [47] моделирование компонентов экосистемы Азовского бассейна продолжается в работах: Бердникова С.В., Суркова Ф.А.,

Тютюнова Ю.В., Селютина В.В., Сухинова А.И., Никитиной А.В. и А.Е. Чистякова.

Предложить принципиально новый математический метод для экосистемных моделей предложить, по нашему мнению, уже невозможно. Самые разные факторы, как таксис, агрегация, аллелопатия [48] модели уже рассматривали.

Со времени работ И.И. Воровича и ЭВМ и их ПО улучшились несравнимо, быстрые расчеты моделей на многопроцесных ЭВМ привели к получению качественно новых знаний о гидродинамике моря, но не об эволюции экосистем.

Большой опыт накоплен лабораторией математического моделирования биофизических процессов ИАПУ ДВО РАН под руководством Абакумова А.И. в области анализа устойчивости многовидовых рыбных промыслов [49].

С середины 1990-х годов активные работы по многокомпонентному моделированию морских экосистем ведутся в Норвегии в Институте морских исследований г. Берген [50] (модели Ecorath и Ecosim). Комплексные модели последовательных звеньев экосистемы считаются наиболее перспективными, такие системы разрабатываются более 20 лет, но проблема стабильного оптимального использования биоресурсов не была окончательно разрешена. Создатели многовидовых моделей, имеющие в своем распоряжении необходимые вычислительные мощности, сталкиваются с аналогичными фундаментальными сложностями при долгосрочных прогнозах, так как влияние климатической нестабильности на воспроизводство водных биоресурсов в северных акваториях Баренцева моря значительно более сильно выражено, чем для регионов Азова и Каспия. Подобные комплексные работы по созданию и анализу обобщающих моделей для всей водной трофической цепи от уровня зоопланктона до верхнего уровня морских важных, но требуют больших капиталовложений, потому не могут выполняться небольшим научным коллективом. Наибольший практический интерес представляет прогноз запасов трех основных промыслов видов региона: мойвы, сельди и трески, и получения ответа на вопрос: как перелов одного из промысловых видов отразится на других запасах. Затраты машинного времени на оценку значений всего необходимого набора параметров, их последующую корректировку и отладку, превысят усилия на выписывание собственно систем уравнений для блоков модели.

Составление моделирующей системы уравнений для экосистемы и её алгоритмическая реализация в вычислительной среде составляет только половину задач исследования с целью прогнозирования развития ситуации. Значительно больше временных затрат машинного времени уходит на отладку и корректировку набора параметров в соответствии с экологической реальностью и дальнейший сущностный анализ адекватности результатов расчетов. Новые работы зарубежных специалистов обращают внимание на эту проблему. Выявлению узких мест (которые не решаются применением суперкомпьютеров и параллельных алгоритмов) при создании моделей в области экологии и ограничений при их применении для прогнозирования посвящена книга [51].

При последующем расширении набора параметров комплексной модели из взаимодействующих функциональных блоков, доступных для воздействия в имитационных вычислительных экспериментах, будет сложно определить, какие из них являются бифуркационными. Более сложная задача – установить все точки бифуркаций в пространстве параметров. Если в модели не возникает бифуркаций и сложных переходных режимов поведения, то и *описательные возможности* такой модели будут незначительными по интерпретации резких изменений популяционных процессов. Для стационарных процессов и гомеостатических биосистем вряд ли оправдано строить трудозатратную комплексную модель, можно использовать корреляционные закономерности факторов и регрессионные зависимости величин. В интересных примерах построения многокомпонентных моделей нелинейные эффекты (бифуркации и хаотизация), являющиеся следствием фундаментальных свойств их математического аппарата, возникают неожиданно для создателей при изменении вектора параметров или воздействия, как в дискретной модели популяции рыб в [52]. Такие модели плохо подходят для помощи ЛПР при оценке развития ситуаций.

Согласно развиваемой нами концепции системного анализа на основе заданных модельных ситуаций целесообразно заранее на этапе проектирования вычислительной структуры предопределить набор нелинейных эффектов, которые должны или способны возникать в модельных сценариях при некотором заданном логикой воздействии. Перечень значимых трансформаций фазового портрета априори ограничен, а критерии их возникновения мы способны известными методами установить для дискретных функциональных итераций.

1.2.5. Необходимые критерии для математического аппарата в задаче прогнозирования при экспертной регуляции природопользования

После исследования модели В. Вольтерра и обсуждения идей его книги [53] развивались непрерывные модели (В.А. Костицыным, Розенцвейгом и МакАртуром, А.Н. Колмогоровым, А.Д. Базыкиным, Л.В. Недрезовым, А.В. Шабуниним) и многими другими отечественными авторами для описания популяционных процессов противоборствующих видов и влияния эксплуатации.

Модели Вольтерра нашли применение за пределами задачи о колебаниях противоборствующих популяций [54]. В дальнейших практических работах по управлению промыслом популярность получили итерационные методы, обладающие значительно большим арсеналом нелинейных эффектов, которые можно применить для отражения многообразия популяционной динамики, что показал опыт совместных работ при построении и дискретных и непрерывных и событийных моделей биологических объектов. В дискретных и непрерывных моделях бифуркации с появлением циклов имеют различные аспекты, так как помимо устойчивых многообразий важно учитывать и положение неустойчивых инвариантных многообразий (сепаратрис, теряющих устойчивость равновесий, несвязных границ областей

притяжения аттракторов и странных репеллеров). Потому требуется глубокое понимание теории и топологии фазового портрета.

Выбор метода для организации вычислений целесообразно соотносить с аспектами каждой исследуемой нами задачи в области биосистемных процессов. Разрабатываемые нами методы рассчитаны на применение обычных персональных ЭВМ. Размерность фазового пространства моделей и сложность поведения траектории основных рассчитываемых показателей независимы друг от друга понятия. Не обязательно сложность поведения с возникновением нестационарных переходных циклических и хаотических режимов возрастет с увеличением размерности, хотя и это может происходить. Понятия «сложности» и «нелинейности» интуитивные, не имеющие независимого определения, и не связанные непосредственно с количеством уравнений модели. «Сложное» хаотическое поведение и каскады бифуркаций можно получить уже в двумерном фазовом пространстве с использованием свойств функциональных итераций.

На I этапе разработки немаловажно оценить описательные возможности модели – тот набор изменений поведения траектории решения, который мы теоретически можем интерпретировать для исследуемого объекта. Например, модель на основе популярной зависимости Бивертон-Холта априори не сможет демонстрировать циклическое поведение и имеет единственный аттрактор.

Описательные возможности любых моделей ограничены априори, что приводит к необходимости их дополнения, например, периодическими функциями. Автором поддерживается принцип обоснованного использования для описания всех доступных в теории метаморфозов фазового портрета: трансформации и устойчивых и, что составит новизну работы, неустойчивых инвариантных множеств траектории, которые не притягиваются к аттракторам.

Считать сам по себе результат вычислительного эксперимента основным для объяснения экологической проблемы рано. Расчеты, как и первичные данные наблюдений, представляют материал для дальнейшего анализа причинно-следственных взаимосвязей. Получение траектории решения разработанной модели при заданных начальных условиях и величинах бифуркационных параметрах промежуточное звено в методологии анализа ситуаций и гипотез.

Формальных методов оценки биоресурсов и их оптимальных уловов было предложено много, но как показали сравнительные оценки их современных результатов [55], достоверно непротиворечивого метода для широкого перечня запасов не существует. Особенности популярного биостатистического метода оценки промыслового запаса, когортного анализа и метода анализа виртуальной популяции VPA обсудим в разделе об обосновании экспертных решений по изменению режима эксплуатации биоресурсов на конкретных примерах.

Работы автора по развитию методов системного анализа в области сравнения модельных сценариев кризисов и прогнозирования развития ситуаций для экодинамики эксплуатируемых водных биоресурсов, принципиально отличается по методическим основам от длительных исследований,

проводимых в филиалах ВНИРО, ГосНИРХ и биологических институтов по мониторингу и оценке состояния промысловых запасов, статистической обработке данных.

1.3. Практическая интерпретируемость поведения нелинейных моделей динамики популяций

Сложности моделирования реальных живых систем давно и хорошо понимаются специалистами. В разделе обсудим противоречия формирования итоговых выводов на основе моделирования, о которых мало говорили, но они критически важны именно для системного анализа реальных ситуаций.

Анализ поведения моделей при прогнозировании поведения живых систем является самостоятельной научной проблемой системного анализа. Применяемые при моделировании любых живых систем математические вычислительные структуры подчиняются фундаментальным принципам и их свойства формулируются в виде утверждений. Значимые эффекты нелинейной дискретной динамики, которые сформируют описательные задействованные возможности наших сценарных моделей, в настоящее время описаны достаточно строго и согласованы с фундаментальными теоремами. Для биологических систем существуют собственные принципы функционирования, некоторые могут быть заметны на большом временном масштабе – адаптации и эволюционных изменений. Адаптация может отражаться в варьировании параметрическими диапазонами наших вычислительных структур. Оказывается, что сложность интерпретируемого поведения для моделей биосистем часто заключается не только в дискретности приемлемых параметрических диапазонов, как показал опыт автора при работе с моделью накопления биогенных элементов для прогнозирования этерификации оз. Чао [56]. Сложность в стыковке приемлемых узких диапазонов с недопустимыми интервалами значений из набора параметров. При моделировании последствий накопления биогенных веществ в озере Чао рассматривалось влияние изменения уровня озера из-за водозабора, потому нами было решено рассматривать несколько возможных вариантов изменений [57].

Чаще всего опытные специалисты эмпирически выбирают такие режимы поведения, где поведение траектории остается биологически объяснимо и согласовано с наблюдениями. Однако, мы продемонстрируем примеры, когда в расчетах известных уравнений могут резко возникать (или исчезать) эффекты, где поведение модели вдруг выходит за рамки интерпретации. Параметризация модели, калибровка набора не устанавливаемых эмпирически коэффициентов может стать неопределимой сложностью из-за близости разных режимов поведения в пространстве параметров модели. Под выходом из границ существенной интерпретации мы понимаем поведение, не согласующиеся с принятыми представлениями об эволюции изучаемой биологической системы. Удобнее ориентироваться на данные наблюдений, но часто на данном этапе исследования подходящих данных еще нет в нашем распоряжении, например, если строятся модели для гипотетического прогнозного сценария реакции на изменения. При всех сложностях с дан-

ными набор наблюдаемых изменений поведения в популяционных процессах успешно можно классифицировать даже по качественным описаниям и относительным показателям. Например, при вспышках численности насекомых вредителей ориентируются не на собственно динамику численности популяционных поколений (которую подсчитывать практически бессмысленно и оч. сложно), но на размеры пораженной вредителями территории и степень поражения отдельных деревьев леса.

1.3.1. Нелинейные режимы итерационных моделей популяций и критерии их возникновения

Систематизируем накопленный автором и коллегами по проектам РФФИ опыт интерпретации поведения траектории, полученный в результате численного моделирования динамики изменений различных ситуаций в биосистемах. Популяцию представляют динамической системой, которая в общем случае оказывается диссипативной. В изолированном случае (без внешнего управления) динамическая система представляется n -кой $\langle M, T, \psi, Q(T) \rangle$, состоящей из фазового пространства M , переменной выполняющей роль времени T , оператора эволюции ψ – тут формальный закон, по которому рассчитываются из текущих значений дальнейшая эволюция фазовых переменных. $Q(T)$ – регулируемое внешнее воздействие, которое в нашем случае зависит от положения траектории.

Множество $\{\psi^{(t)}(x_0)\}_{t \in T}$ составит вся фазовая траектория точки x_0 . Для переменных $\forall x \in M$ и $\forall t, s \in T$ пусть выполняется классическое условие:

$$\psi(\psi(x, t), s) = \psi(x, s + t).$$

В случае управляемой популяции рыб оператором преобразования ψ будет зависимость исходного запаса и полученного от него нового поколения (основанная на развитой биологической теории формирования пополнения и классификации факторов смертности в онтогенезе рыб [58]) и устанавливаемая на каждом шаге доля изъятия из запаса. Для модели с возрастной структурой задается отдельно из каждой возрастной группы.

От положения асимптот зависимости при $S \rightarrow \infty$, казалось бы, должны сильно зависеть разновидности асимптотики фазовой траектории $\lim_{n \rightarrow \infty} f^n(x_0)$. Однако, из теории следует вывод, что для многих моделей, принципиально разным по биологическим обоснованиям, асимптотическое поведение их траекторий будет идентичным, а интерпретация изменений поведения станет противоположной.

Эволюция диссипативной динамической системы во времени представляется движением точек в фазовом пространстве к аттрактору, подмножеству фазового пространства $A \subseteq M$ инвариантному относительно эволюции. Основное свойство аттрактора: $\psi^{(t)}(A) = A$ для всех $t \in T$ и такое, что существует окрестность U множества A , в которой для всех $y \in U$ выполняется $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi^{(t)}(y) = A$. В дискретных динамических системах

классифицируют три топологические разновидности аттракторов. Регулярным аттрактором для отображения интервала $\psi: \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{I}$ считается состояние равновесия с неподвижной точкой x^* : $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi^{(t)}(y) = x^*$ и устойчивый цикл, соответствующий режиму периодических автоколебаний. Все множество точек, стремящихся к одному аттрактору это область притяжения, которая может быть непрерывным субинтервалом $\Omega \subset \mathbf{I}$, так и образовывать несвязное или даже канторовское множество точек, что ведет к появлению нескольких типов хаотичного движения. Граница области не притягивается.

Проблемам хаотической динамики популяционных процессов посвящена работа П. Турчина [59], серии статей С. Элнер [60], Г.Г. Малинецкого [61] и др.

Нелинейные эффекты – популярная тематика прикладных работ. Наглядную ситуацию проблем интерпретируемости при анализе результатов расчетов рассмотрим на примере итерационной популяционной модели:

$$x_{n+1} = ax_n \exp(-bx_n) - q_n x_n,$$

известной по многим попыткам применения в ихтиологии. Модель У.Е. Рикера [62] связывает величину нерестового запаса рыб S и ожидаемое в этом сезоне пополнение R при доле управляемого изъятия q_n . Модель по современным меркам простая, однако, поведение итераций этой функции $f(S)=R$ сложное и еще не полностью строго изученное в окнах периодичности – не разработана теория вложенных окон периодичности.

Положение стационарной точки $f(x^*) = x^*$ итераций функции Рикера $f(x) = axe^{-bx}$, для которой выполняется:

$$f'(x) = ae^{-bx}(1-bx), \quad \lim_{x \rightarrow 0} ae^{-bx}(1-bx) = a.$$

Но выполнение условий зависит от двух параметров, так как стационарная точка:

$$x^* = \ln \frac{a}{b}.$$

По теореме Кёнингса [63] критерий устойчивости $|f'(x^*)| < 1$, и для стационарной точки x^* устойчивость определяет уже однопараметрическая функция. В данном случае x^* теряет устойчивость (в критическом случае $f'(x^*) = -1$ устойчивость зависит от старших производных и тут сохраняется) при выполнении для производной $f'(x^*) \neq \infty$ в точке x^* неравенства:

$$f'(x^*) < -1, \text{ где критерий устойчивости}$$

$$f'(x^*) = ae^{-b\frac{\ln a}{b}} - b\frac{\ln a}{b}ae^{-b\frac{\ln a}{b}} = \frac{a(1 - \ln a)}{e^{\ln a}} = 1 - \ln a.$$

При $a = e^2, f'(x^*) = -1$ наблюдается следующая ситуация для второй итерации $f(f(x)) \equiv f^2(x)$ в теряющей устойчивость стационарной точке x^* :

$$\frac{df^2(x^*)}{dx} = 1,$$

$$\frac{d^2 f^2(x)}{dx^2} = \frac{df'(f(x))f'(x)}{dx} = f''(f(x))(f'(x))^2 + f'(f(x))f''(x),$$

$$\frac{d^2 f^2(x^*)}{dx^2} = f'(x^*)f''(x^*)(f'(x^*) + 1) = 0.$$

Если $\frac{d^3 f^2(x^*)}{dx^3} < 0$, то следовательно $df^2(x)/dx$ при $a = e^2$ имеет в x^* локальный максимум и таким образом происходит бифуркация, – появляются устойчивые циклические точки, являющиеся стационарными точками для второй итерации:

$$f^{n+2}(x_2^*) = f^n(x_2^*).$$

Момент бифуркации рождения цикла 2^1 показан на рис. 1. Тут видно, что в точке $\max f(x)$ возникает $\min f(f(x))$, это свойство следует из простого правила дифференцирования сложной функции и станет важным для исследования итераций с несколькими экстремумами.

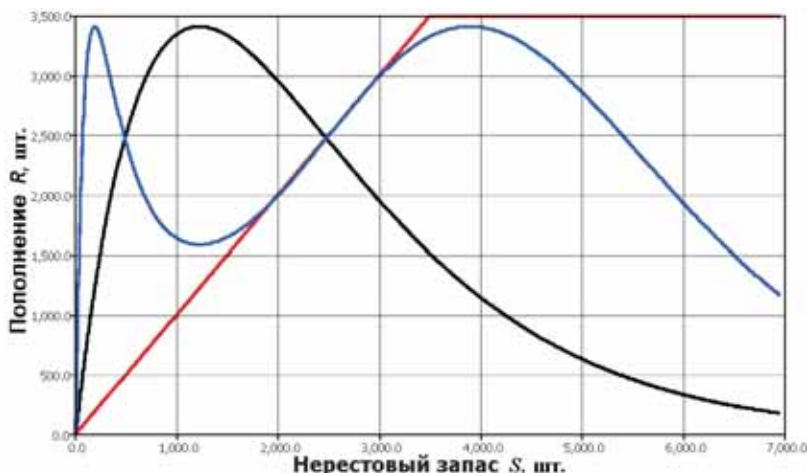


Рис. 1. Возникновение двух стационарных точек у $f(f(x))$

Существует интересный показатель – дифференциальный инвариант Шварца:

$$S_f = \frac{f'''(x)}{f'(x)} - \frac{3}{2} \left(\frac{f''(x)}{f'(x)} \right)^2.$$

Известный априори знак дифференциального инварианта Шварца позволяет установить знак $\frac{d^3 f^2(x^*)}{dx^3}$, так как «шварциан» в момент $f'(x^*) = -1$ бифуркации $S_{f^2(x^*)} = \frac{d^3 f^2(x^*)}{dx^3}$ и, как известно из [64], знак S_f сохраняется для всех итераций функции $f^n(x) = f(f \dots (x) \dots)$, $n \rightarrow \infty$.

Отрицательный знак «шварциана» $S_{f(x)} < 0 \forall x$ служит необходимым критерием для возможности реализации бесконечного каскада бифуркаций удвоения периода цикла $p = 2^i, i \rightarrow \infty$. При этом само значение

$S_f = \frac{f'''(x)}{f'(x)} - \frac{3}{2} \left(\frac{f''(x)}{f'(x)} \right)^2$ не несет какой-либо сущностной интерпретации за пределами теории функций.

Изложенное не означает, что удвоения цикла не будут возникать у итераций несохраняющих знак S_f функций, интересен вариант бесконечного каскада, так как такой сценарий развития при изменении параметра способен возникать в трех известных и широко применявшихся популяционных («запас-пополнение») моделях, предложенных У. Рикером [65], Дж. Шепардом [66], Д. Кушингом [67]. В дробно-линейных моделях (Бивертон-Холта) бифуркаций не возникает.

В настоящее время эти нелинейные модели связи родительского запаса и получаемого нового поколения редко используются самостоятельно, но входят в состав блока воспроизводства полимодельных комплексов, используемых для промышленного прогнозирования [68]. При этом функции влияют на качественную динамику моделей промышленных популяций даже с включением многих природных факторов [69]. Причины такого сильного влияния лежат в математических свойствах – в итерациях $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ после увеличения $a > e^2$ наблюдаем последовательность касательных бифуркаций с появлением устойчивых циклов периодов $p \neq 2^i$. Но область притяжения возникающих циклов уже несвязная, так как все неустойчивые стационарные точки к циклам не притягиваются. Явление неустойчивости в поведении траектории с сильной зависимостью от малого возмущения начальных условий $x_0 + \varepsilon$, названное «динамический хаос», возникает из-за континуума неустойчивых периодических траекторий, которые при каждой следующей бифуркации удвоения делят область притяжения на уменьшающиеся интервалы. Все теряющие устойчивость при бифуркациях циклы инвариантные не притягивающиеся к аттрактору множества. Существуют несколько строгих определений хаотичности динамики итераций.

Хаотизацией «по каскаду Фегенбаума» свойства итераций функций с отрицательным шварцианом $S_f < 0$ не исчерпываются. Согласно фундаментальной теореме А.Н. Шарковского о порядке циклов [70] существуют значения управляющего параметра, при которых будут возникать циклы нечетных периодов. Ли и Йорк показали [71], если одномерное отображение $R_{j+1} = \psi(R_j)$ при значении параметра $a = \hat{a}$ имеет цикл периода $p=3$, то отображение при \hat{a} имеет и бесконечное множество циклов всех других периодов – континуум неустойчивых траекторий. А.Н. Шарковский доказал ранее [72], что если одномерное отображение отрезка в себя $\psi: \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{I}$ имеет цикл $p=n$, то оно также имеет циклы со всевозможными периодами \tilde{n}_i , предшествующими числу n , среди целых чисел, выписанных в специальном порядке, который начинается число два, а завершает число три. В теореме Шарковского не следует утверждения об устойчивости сосуществующих в указанном порядке циклов.

Все популяционные модели, (не только рассматриваемая как самые наглядные модели Рикера или Шепарда) включающие как компонентные блоки нелинейные функциональные зависимости независимо от их природы и предназначения, подчиняются фундаментальным результатам теорем Шарковского, Ли-Йорка и Синджера. Следовательно, от подобных моделей мы уже на этапе построения должны ожидать поведения со сменой циклических / хаотических режимов по известным сценариям. По этим же фундаментальным математическим причинам никакого нового и более соответствующего бы целям модельного описания динамики популяций варианта поведения траектории помимо уже известных в подобных дискретных моделях мы получить не сможем. В

1.3.2. Адекватность интерпретации циклических и хаотических изменений в моделях прогнозирования состояния биоресурсов

Популяционная цикличность – интереснейший, многообразный и далеко не полностью исследованный природный феномен. Цикличность наблюдается и в лабораторном аквариуме при постоянстве условий, и в открытом океане (в том числе климатически обусловленная). В современной монографии [73] о популяционной цикличности методом спектрального анализа рассмотрены примеры колебательной динамики для многих биосистем, автор данной монографии придерживается гипотезы, что биологические ритмы подвержены синхронизирующему внешнему воздействию. Гипотеза сейчас не является подтвержденной, и не учитывает циклы в изолированных искусственных сообществах. Научная проблема установления физических причин возникновения длиннопериодических колебаний у многих видов далека от разрешения. Исследования в этой области продолжают разные международные научные коллективы. Отметим некоторые не столь очевидные аспекты проблемы описания цикличности, интересные с точки зрения системного анализа.

Популяционные циклы (пусть и не в строго периодическом математическом смысле замкнутой траектории) могут быть краткие, недельные в лабо-

раторных условиях. Однако существуют примеры длинных, даже вековых периодов колебаний [74], не соотносящимся с длиной жизненного цикла самого вида. Экстремальное по своим последствиям для лесных экосистем явление происходит со знаменитыми колебаниями численности вредителя еловой листовертки *Choristoneura fumiferana* в лесах Северной Америки [75].

Так как хорошо описано явление популяционных циклов у многих видов, то моделировать цикличность, свойственную ряду природных популяций, пробовали различными математическими методами и дискретными и непрерывными моделями. Возможность получения циклического поведения для простой модели следующего вида:

$$x_{n+1} = \psi(x_n; a)$$

оценивается позитивно многими авторами. Однако, циклы, возникающие при увеличении параметра a , отличаются не только периодом, но и порядком обхода составляющих их точек, то есть циклы у итераций с одинаковым по длине (количеству составляющих цикл точек) периодом могут быть качественно разные – это одно из отличий поведения дискретных моделей от непрерывных.

На рис. 2. циклическая траектория $x_{n+1} = ax_n \exp(-bx_n)$, состоящая из 4-х периодических точек. Мы видим, что между крайними верхней и нижней точками оказались точки, но порядок обхода из верхней ветви в нижнюю и обратно сохраняется при всех удвоениях. После удвоения точки появляются симметрично в верхних и нижних ветвях вплоть до резкого слияния двух «раздвоившихся» ветвей циклических точек в единый «канторовский» аттрактор.

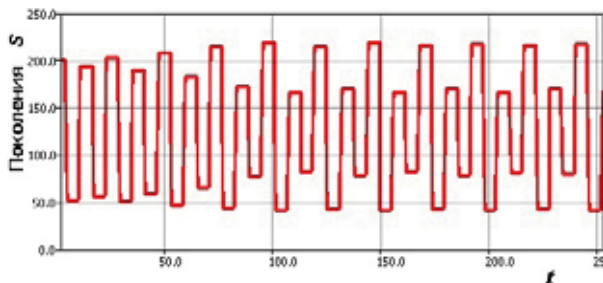


Рис. 2. Возникший в модели Рикера цикл периода $p=22$

Установления свойств образования циклов было воспринято с позитивной стороны подтверждения предсказательных возможностей таких моделей для популяций с непрерывными поколениями, и такое мнение продолжает высказываться, несмотря на доказательство универсального характера таких бифуркаций для унимодальных функций [76].

Особенно ярко выражены циклические изменения численности у грызунов субарктической зоны, но они не устойчивы и часто разрушаются. Помимо длины периода p , циклы итераций:

$$x_{n+1} = \psi(x_n) + \Delta$$

различаются между собой взаимным расположением составляющих их точек при обходе. На типичном примере динамики полевки *Myodes rufocanus* рис. 3 (звездочками отмечены годы пиков) мы видим, что популяционные циклы – монотонные перестановки с возрастанием и с явным пиком в конце 4-летнего периода колебаний грызунов.

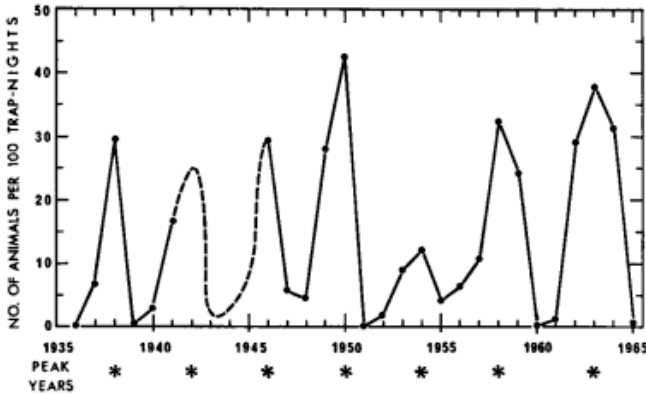


Рис. 3. Реальная 4-летняя цикличность популяции полевки по данным [77]

На примере более длинных циклов степных грызунов в Казахстане очевидно, что существует стадия минимума численности, стадия быстрого роста и пика (рис. 4), которая сменяется продолжительной депрессией с минимальным состоянием. Для многих насекомых вредителей наблюдаются затухающие «пилообразные» серии пиков численности. Согласно нашим представлениям, серии популяционных всплесков – это тоже форма циклических изменений, но такая динамика не отражается дискретными итерационными моделями, но может получить описание на основе непрерывных моделей с запаздыванием.

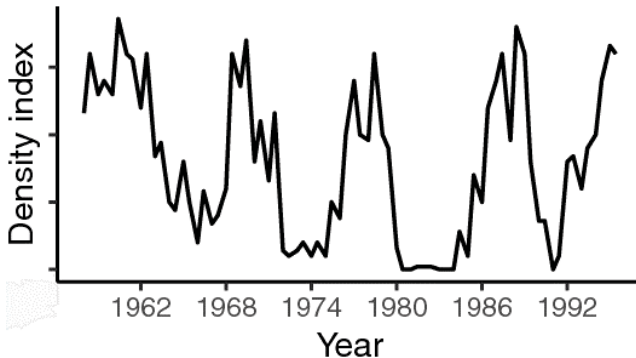


Рис. 4. Динамика циклов популяции большой песчанки *Rhombomys opimus* в Казахстане по данным [78]

В случае, если стационарная точка $x^* = \varphi(x^*)$ любой унимодальной функции теряет устойчивость, то аттрактором станет цикл из двух стационарных точек x_1^*, x_2^* . Это стационарные точки второй итерации $x_2^* = \varphi(\varphi(x_1^*))$. К возникшему циклу притягиваются точки, кроме самой неустойчивой стационарной x^* и всего множества из тех точек, которые под действием итераций отображаются в x^* . Выбор x_0 слева или справа относительно x^* изменит порядок обхода точек цикла.

В типичном числе цикл изменений популяции это смена стадий депрессия → рост → пик. Согласно «модельным» циклам любого периода $p=2^n$ итераций с отрицательным шварцианом у популяции не будет промежутков депрессии и резких переходов к вспышкам численности популяции. Получим только симметричные колебания вокруг потерявшего устойчивость стационарного состояния. В дискретных итерациях получить спонтанную динамику монотонной $x_1^* < x_2^* < x_3^* \dots p \geq 4$ циклической перестановки проблематично.

Цикл длинны четыре, где точки обходятся по порядку возрастания:

$$x_1^* < x_2^* < x_3^* < x_4^*$$

существует в модели Рикера и Шепарда, но не просто сразу найти параметрический диапазон такого цикла. По теории М. Фейгенбаума параметрический интервал a при последовательных бифуркациях уменьшается, но теория разработана только для периодов $p=2^n$. Универсальность поведения функциональных итераций таких моделей означает, что интервалы между соседними бифуркационными значениями при удвоении цикла у параметров сокращаются для разных моделей с одинаковой «скоростью». Но существуют не только удвоения циклов, при касательных бифуркациях возникают циклы четных и нечетных периодов.

Параметрическое окно цикла три самое широкое. Параметрический интервал после цикла периода три для дальнейших «несимметричных» по порядку обхода точек циклов сильно сокращается. По этой причине очень маловероятным представляется попадание популяционной системы в параметрический диапазон цикла длины пять из режима цикла три, если мы используем изменение одного управляющего параметра. Потому моделирование циклической динамики популяций нельзя считать полностью разрешенной научной проблемой.

1.3.3. Интерпретация сопутствующих циклическим режимам нелинейных эффектов при анализе воздействия на биосистемы

Системный анализ закономерности изменений состояния биоресурсов при регулируемом экспертами воздействии в наших исследованиях будет опираться на математический базис теории поведения траекторий динамических систем.

Из теории динамики отображений с отрицательным шварцианом (к этому классу функций относятся как минимум три применявшиеся модели популяций рыб) можно вывести несколько интересных практических следствий. Так, если в нашей модели возникает один нелинейный эффект, например, бифуркация удвоения периода и появление цикла, то у такой модели будут и другие метаморфозы фазового портрета, которые не всегда нужны нам и объяснимы.

Модель $x_{n+1} = ax_n \exp(-bx_n)$ генерирует сценарий резкого перехода от хаоса к циклу периода $p=3$ и с дальнейшим удвоением цикла: $p = 3 \times 2^i, i \rightarrow \infty$. Сценарий сопровождается нелинейным эффектом резкого закрытия периодического окна при внутреннем кризисе составного аттрактора – несвязного множества.

Явление кризиса составного аттрактора возникает, когда траектория в периодическом окне цикла с периодом три ограничена диапазоном между смежными точками пересечения $g(x)=x$ с биссектрисой координатного угла у третьей итерации функции Рикера $g=fff(x) \equiv f^3(x)$.

Конфигурация с тремя парами стационарных точек (устойчивой / неустойчивой), возникших после касательной бифуркации у зависимости $f^3(x)$, показана на рис. 5 стрелками у стационарных точек.

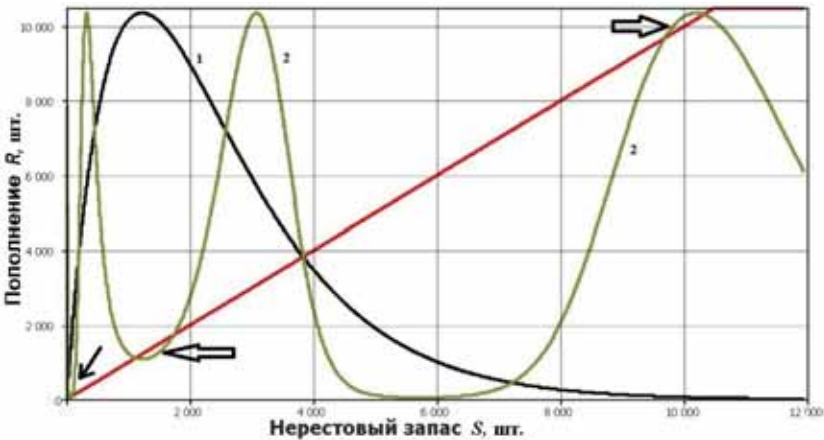


Рис. 5. Возникновение периодического окна у модели «запас-пополнение» Рикера: 1 – график $f(x)=axe^{-bx}$, 2 – график третьей итерации функции Рикера $g=fff(x)$, $a=22.7$

Если продолжать плавно увеличивать параметр a , то Траектория становится хаотической уже в рамках периодического окна, но перемещается между тремя диапазонами строго в циклическом порядке – «спорадический цикл». Режим похож на колебания арктических грызунов и может получить разумную популяционную интерпретацию. Далее при увеличении параметра a три диапазона перекрываются, и траектория резко вдруг захватывает все подмножество фазового пространства, которое включает в себя «аттрактор Фейгенбаума» [79]. Количество таких периодических окон неограниченно и окна циклов могут быть вложенными. У цикла периода $p=3$ «окно» бифуркационной диаграммы, где цикл прерывает хаотический

режим, самое большое по длине интервала значений у бифуркационного параметра a . Окно цикла периода три присутствует на всех бифуркационных диаграммах итераций, но если уменьшить масштаб, то можно найти много других «окон» с циклами любых периодов.

Дополнительные вычислительные исследования покажут, что появлению окон предшествует явление «перемежаемости» – это режим чередования во времени почти регулярных колебаний (ламинарная фаза) с интервалами хаотического поведения (турбулентная фаза). Перед появлением циклических точек график третьей итерации функции $f^3(S) \equiv f(f(f(S)))$ образует каналы, по которым в строгой последовательности траектория движется довольно долго. Выход точки траектории из канала определяет короткую турбулентную фазу. Выявление такого поведения при настройке параметров может служить индикатором близости бифуркационных значений.

1.3.4. Обоснованность поведения популяционных моделей при нескольких бифуркационных параметрах для имитации ситуаций

На этом простом примере мы видим, что возникновение бифуркаций само по себе не является особенным достоинством моделей. В реальных моделях управляющих параметров более одного и свойство их «бифуркационности» необходимо еще установить, не всегда это получается аналитически.

В модели Рикера с включением искусственного выпуска рыб:

$$f(x) = ae^{-bx} + \Delta x$$

получим выражения для состояния стационарной точки и для критерия устойчивости:

$$x^* = \frac{\ln a(1 - \Delta x)}{b},$$
$$\frac{df(x^*)}{dx} = (1 - \ln a / (1 - \Delta x))(1 - \Delta x).$$

В интерпретации критерия устойчивости искусственный выпуск молодежи способен перевести траекторию динамической системы из стационарного состояния в хаотический режим при дополнительном бифуркационном параметре, но изъятие из запаса, согласно свойствам критерия устойчивости аттрактора, будет стабилизировать динамику траектории. Это сразу вызовет ряд противоречий с исследованиями на основе и наших и альтернативных моделей.

Методический арсенал используемых в итерационных моделях нелинейных эффектов ограничен, есть три типа бифуркаций и три варианта кризиса – резкого внутреннего перестроения структуры аттрактора (но аттракторы у рекуррентных уравнений могут быть сложной геометрической формы [80]). Трансформации аттракторов возникают у итераций по фун-

даментальным математическим причинам – в точке нарушения критерия устойчивости, но выход из границ никак не связан с предметной областью. В разных биологических моделях неизбежно возникнут одинаковые метаморфозы поведения траектории (в силу конечности их набора), но которые неизбежно будут различно истолкованы. Показательный пример из практики применения моделей рыболовства в [81]. Увеличение доли изъятия в реальности совсем не уменьшает флуктуации популяций и не переводит режим существования биосистемы из хаотических изменений в стабильное положение [82]. Данное гипотетическое свойство промысла устанавливать стабилизацию биоресурсов наглядно опровергнуто многими исследованиями [83]. Показано, что промысловые виды демонстрируют более высокую временную изменчивость численности, чем неэксплуатируемые виды [84]. Повышенная изменчивость эксплуатируемых популяций вызвана промысловым сокращением возрастной структуры, что снижает способность популяций амортизировать различные сопутствующие экологические воздействия [85]. В работе [86] и [87] объясняется на анализе статистических данных и примерах, почему промысловое воздействие в реальных ситуациях увеличивает амплитуду популяционных флуктуаций. Это противоречит выводам из модели Рикера:

$$x_{n+1} = ax_n \exp(-bx_n) - qx_n.$$

Тогда при большом репродуктивном параметре $a > e^2$, но это условие выглядит нереалистично большим значением.

Вычислительные структуры с использованием нелинейных зависимостей эффективности воспроизводства в форме функций У. Рикера, Дж. Шепарда или Д. Кушинга часто используют в работах ихтиологи. Используя эти модели эксперты для принятия решений часто не представляют всей сложности теории динамики отображений с всюду отрицательным шварцианом. Знания о популярном сценарии хаоса через каскад удвоений «по теории Фейнманбаума» (теорию ренормализации изучают достаточно поверхностно в прикладных работах) нельзя считать достаточным для моделирования. Часто актуален хаотический режим по типу «подковы Смэйла» или странного репеллера – континуального непритягивающего «канторовского» множества граничных точек-репеллеров. Сложное поведение траектория демонстрирует в окрестности неустойчивого цикла и при возникновении альтернативных аттракторов.

Важность исследований таких явлений как граничный и внутренний кризисы аттрактора в том, что качественно различные режимы поведения траектории, возникающие сразу при малом изменении параметра, могут критическим образом влиять на динамику смены режимов поведения хаос@цикл. В результате исказится сущностный смысл при практической интерпретации численных расчетов при имитации сценария управления с промысловым изъятием. Итерационная модель отреагирует на малые изменения значения некоторых из параметров согласно свойствам как

функции оператора эволюции, имеющей экстремумы, асимптоты и точки пересечения с прямой $f(x)=x$.

1.3.5. Прогнозирование природопользования при появлении пороговых эффектов и неустойчивых равновесий в экодинамике

Сложности проблемы получения интерпретируемого поведения усиливаются при модельном прогнозировании – анализе динамики с учетом в новых измененных условий. Экологические явления, как следствия установленных внутренне регулируемых закономерностей изменения численности и размерно-возрастной структуры популяции могут быть внезапно появляющимися.

Например, важен для многих ситуаций «эффект Олли» или принцип агрегированной группы особей [88]. Критическая численность важна для поддержания генетического разнообразия, иначе начинается накопление вредных мутаций. Так для азиатских слонов жизнеспособной считается популяция численностью от 216 особей [89], доказана роль генетического фактора в вымирании островных популяций.

На рис. 6 показано действие порогового эффекта в воспроизводстве локальной популяции трески, когда при малой биомассе запаса точки на гипотетической кривой воспроизводства оказываются ниже биссектрисы – уровня восполнения запаса $R=f(R)$. Данный эффект будет специально моделироваться в нашей работе.

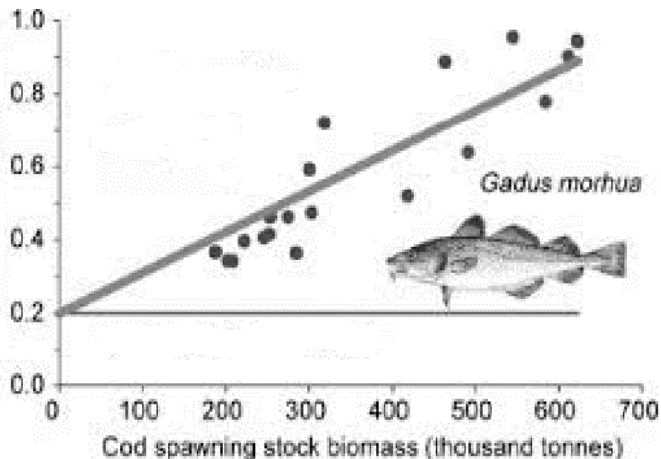


Рис. 6. Действие порогового эффекта – уменьшение эффективности при воспроизводстве популяции трески из [90]

При состоянии биомассы нерестового запаса менее 300 тыс. т воспроизводство не восполняет естественную и промысловую убыль, тогда речь идет о проблеме выживания локальной популяции. Популяция с такой зависимостью уязвима и восстанавливается очень долго, что мы обсудим в главе 3. Однако у трески много локальных популяций, что обеспечивает этому виду стабильность в целом по ареалу за счет такой эволюционной стратегии.

Отметим, что подобный метод поиска порогового эффекта по данным мониторинга о результатах нереста эффективно сработал для уже деградировавшей под действием чрезмерного промысла популяции. Актуальна разработка обобщённого метода для рассмотрения в моделях пороговых эффектов (помимо «Эффекта Олли»), резко меняющих развитие популяционных процессов. Имитацию порогового эффекта лучше проводить без использования в явном виде заданного заранее значения критического порога численности, это значение должно возникнуть из других модельных факторов – например по причине уменьшения выживаемости молоди. Исходя из вышеизложенного в работе актуально развитие методов оценки ситуации, направленных на поддержку принятия регулирующих решений при разнообразии возникающих ситуаций для реальной экодинамики.

Моделированию последствий порогового эффекта Олли посвящено несколько работ, но модели строились феноменологически и не применимы для задач анализа кризисных ситуаций. Принцип действия достигшей определенной численности группы на улучшение выживаемости потомства не рассматривался. А.Д. Базыкиным в [91] устанавливалось в уравнении наличие критической численности – неустойчивого L -порога:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) (N(t) - L), \forall 0 < N < L, \lim_{t \rightarrow \bar{t} < \infty} N(t) = 0, \quad (1.1)$$

где параметры r – репродуктивный потенциал, K – емкость экологической ниши (неразрушающая численность заполнения для среды) аналогичны модели Ферхюльста–Пирла. Однако наличие L -порога при $L \ll K$ в модели (1.1) действует на $N(t)$ и для состояния $N(t) \approx K$. Зарубежными авторами [92] для создания «модели эффекта Олли» с неустойчивым равновесием и переходом к $dN/dt < 0$ использовано менее обоснованное биологически уравнение с $-rN(t)$:

$$\frac{dN}{dt} = -rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) \left(1 - \frac{N(t)}{L} \right). \quad (1.2)$$

В уравнении (1.1) и (1.2) нельзя описать эффект стремительного роста численности, хотя это возможно для инвазионных популяций общественных насекомых, для которых реально есть минимальная численность групп [93]. Если выгода от совместных действий и кооперации особей превышает потери из-за конкуренции за ресурсы, то квадратичная регуляция избыточна, логично указать:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right)^\Theta (N(t) - L), \Theta \in [0.5, 1). \quad (1.3)$$

Разработаем модификацию модели (1.1) с L -порогом $\sqrt[3]{(N(t)-L)}$ с целью сузить область проявления негативного эффекта агрегированной группы в уравнении:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left(\frac{K - N(t)}{K + \widehat{c}N(t) / L} \right) \times \sqrt[3]{(N(t) - L)}. \quad (1.4).$$

Эффект Олли становится частой причиной пороговых эффектов. Резкие изменения возникают из-за особых состояний, при которых непропорционально значительно меняется эффективность воспроизводства. Потому для отражения эффекта Олли в логично предикативное изменение репродуктивного параметра. Пополнение уменьшается непропорционально резко из-за трудного поиска пары в местах размножения и/или уменьшается выживаемость молодых особей без защиты. В работе будет предложен более целесообразный специальный метод моделирования появления критической численности без явно заранее заданного порога, но которое является следствием потерь репродуктивного потенциала.

1.3.6. Вариативность траектории возникновения нелинейных эффектов при принятии решений в природопользовании

На основании изложенного обзора противоречий при применении метода дискретного моделирования и опыта обсуждения результатов других моделей отметим следующие шесть практически важных аспектов анализа резких изменений биосистемных процессов при возможности возникновения пороговых/нелинейных эффектов:

1. Разные «нелинейные эффекты» в моделях часто связаны один с другим как «сцепленные явления». Сценарию хаотизации Фейгенбаума сопутствуют другие эффекты, которые трудно интерпретировать с точки зрения биологической практики:

- а) два типа кризиса (перестроения внутренней структуры) аттрактора;
- б) субдукция (вытеснение или выдавливание) аттрактора другим по терминологии работ Гребоджи и Йорка [94];
- в) моментальная потеря аттрактором свойства инвариантности.

Перечисленные эффекты возникают при малом изменении параметра и более резко меняют поведение траектории, чем бифуркация удвоения или ее обратная форма – бифуркации «ополовинивания» (period halving) $p=2^{i-1}$ периода цикла.

2. Критерии возникновения одной из бифуркаций могут выполняться для совершенно разных моделей в области экологии и независимо от направления изменения параметров в сценарии. Реализация сценария хаотизации в динамических системах вида $x_{n+1}=f(\mathbf{a};x_n)$ через каскад бифуркаций удвоения периода цикла является следствием выполнения критериев теоремы Синжера [95], не имеющих отношения к биологической пробле-

матике. Критерии включают соотношения второй и третьей производных у функции $f(x)$ в окрестности теряющего устойчивость равновесия. Старшие производные не используются в биологии и шварцман характеризует только класс функций. Для установления незнакопостоянности инварианта S_f достаточно получить зависимость с двумя точками \tilde{n}_1, \tilde{n}_2 такими, что $f''(c_1) \neq f''(c_2) = 0$. Нарушение критериев совсем не означает, что динамика итераций такой зависимости будет тривиальной, наоборот, интересно для описания ситуаций использовать альтернативные притягивающие множества и их границы.

3. Границы у областей притяжения аттракторов могут изменяться и влиять на динамический режим поведения траектории [96]. Сложные границы могут возникнуть и в простом случае, – при образовании сосуществующих устойчивых циклов у итераций неунимодальной функции в параметрическом диапазоне периодического окна (мы привели этот случай на рис. 1). Хаос в пространстве параметров близко соседствует с другими циклическими режимами изменений.

4. Не всегда модели с циклическим поведением обязательно означают реализацию сценария хаотизации по Фейгенбауму, так в этом сценарии аттрактор глобальный – траектория притягивается из всего фазового пространства. Существуют итерационные модели, в которых при увеличении одного управляющего параметра наблюдаем бифуркации каскада $p = 2^{i+1}, i < \infty$, а потом при продолжении увеличения параметра каскад $p = 2^{i-1}, i \rightarrow 0$. Важно положение экстремумов у функции f . В итерациях функций с несколькими экстремумами возникают альтернативные циклы с периодом $p=2$. Более того, альтернативные притягивающие множества часто не имеют гладких границ области притяжения.

5. Одни нелинейные явления можно принять за проявления других. Появлению окон предшествует явление «перемежаемости», – режим чередования во времени почти регулярных колебаний (ламинарная фаза) с интервалами хаотического поведения – выделенная стрелками на рис. 7 турбулентная фаза.

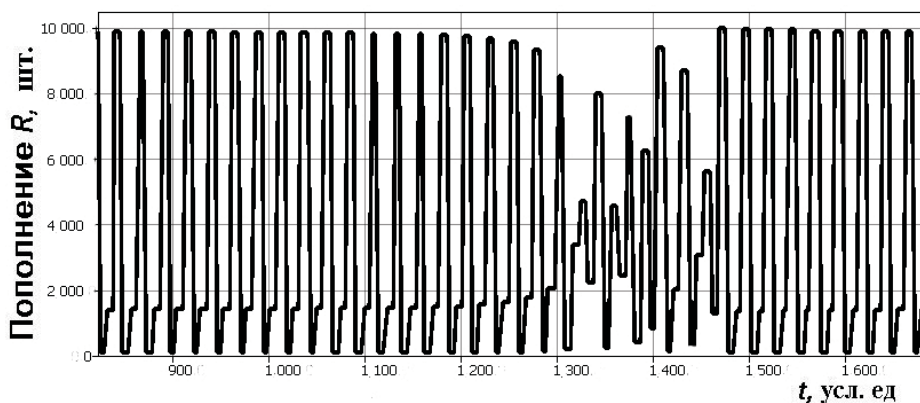


Рис. 7. Хаотический всплеск модели Рикера в режиме перемежаемости $a=22.4$

Перед появлением трех пар циклических точек график третьей итерации функции приближаясь к биссектрисе $f(S)=S$ и образует каналы, по которым в строгой последовательности периода p долго движется траектория так, что фиксируем $|\varphi_{n+p}(R_0) - \varphi_n(R_0)| \approx \varepsilon$.

Выход траектории из окрестности биссектрисы координатного угла определяет короткую, но важную турбулентную фазу. Выявление перемежаемости на этапе подбора параметров сложно, экспоненциального разбега близких траекторий еще долго не наблюдается.

6. Циклы у итераций отличаются не только периодом p , $\varphi_n(x^*) = \varphi_{n+p}(x^*)$, но и порядком обхода набора составляющих цикл точек.

Интересно при сопоставлении результатов, на какую по счету из точек в перестановке придется максимум. Популяционной динамике мелких грызунов и насекомых соответствуют циклы нечетного периода 3 или 5 с максимумом в конце периода, но именно нечетные циклы $p=2^i+1, i>1$ согласно порядку А.Н. Шарковского получить в итерационной модели затруднительно [97].

1.3.7. Нелинейные эффекты как арсенал описательных средств и прогнозирования ситуаций в экодинамике

Многокомпонентные дискретные модели крупных биосистем имеют дело с функциональными композициями $G(x, y) \circ F(x, z)$ при нескольких аргументах, где функции могут быть заданы не аналитически. Многообразие нелинейных эффектов качественной динамики итераций функций, имеющих экстремумы с одной стороны, является арсеналом для описания свойств изменений в природных процессах. Аспект представляет проблему для моделей из-за поиска критериев практического соответствия наблюдениям, нужного для работы ЛПР.

Изложенные аспекты проблемы анализа результатов моделирования автор при разработке популяционных моделей воспроизводства запасов рыб и вспышек насекомых преодолевал способами разграничения параметрических диапазонов в сценариях. Для многих популяций включение в модель действия эффекта Олли избыточно, иначе трудно объяснить стремительное развитие инвазий при попадании в новый ареал единичных особей. С другой стороны, действием эффекта Олли экспертами объясняются случаи коллапсов очень многочисленных ранее промысловых запасов, как огромная популяция перуанского анчоуса. Однако, некоторые такие популяции после коллапсов восстанавливаются (анчоус, сиг озера Онтарио), но другие ранее ценные промысловые виды входят в многолетнюю деградацию и оказываются на грани выживания (осетровые рыбы во многих ареалах, палтус). Длина жизненного цикла вида и возраст созревания важны, но не оказывают решающего фактором в восстановлении.

Эффект Олли может быть выражен ситуативно, не всегда для малочисленной группы правая часть уравнения (1.1) должна становиться отрицательной. Возможный способ описания вариативности ситуации для малочисленных групп – использовать стохастические возмущения в модели, так

как при малочисленном состоянии группы особой роль случайных негативных факторов среды усиливается. Действие стохастического возмущения должно быть ограничено.

1.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ИНТЕРПРЕТИРУЕМОСТИ ДЛЯ ПОВЕДЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БИОСИСТЕМ

Построение модели только один из предварительных этапов анализа реальной проблемы. Вполне возможно, что в ходе работы с построенной моделью возникнут сложности и ЛПР получают для оценки противоречивые результаты промежуточных расчетов. Это не означает некорректность самой модели, но существование интервалов значений параметров, при которых модель выходит из возможностей истолкования результатов. Тогда целесообразно составить карту поведения в пространстве параметров и выделить исключенные диапазоны. Придерживаясь процедуры с последовательным усовершенствованием модели мы получим все более интерпретируемое приближение к реальной ситуации. Предложим несколько критериев на основе нашего опыта для преодоления проблемы биологической интерпретации возникающих нелинейных эффектов, свойственных итерационным динамическим системам. Сформулируем в виде предложений и следствий из них набор перспективных математических правил в качестве логические схемы для выхода из сложности часто не интерпретируемых результатов моделирования для трансформирующихся процессов в биологии.

Предложение 1. Представление репродуктивного параметра популяции в итерационной модели не обязательно будет ограничено точечной числовой величиной в дискретной динамической модели.

Пусть \mathbf{a} управляющий и независимый от численности интервально заданный параметр репродуктивного потенциала на конечном наборе интервалов:

$$\mathbf{a} \in [\bar{a}_1, \underline{a}_1] \cup [\bar{a}_i, \underline{a}_i] \cup [\bar{a}_{i+1}, \underline{a}_{i+1}].$$

Предложение 2. Под воздействием факторов и условий среды обитания, интервальный параметр \mathbf{a} не растягиваясь может сдвигаться на последовательном наборе субинтервалов:

$$\text{rad } \mathbf{a} = 1/2(\bar{a} - \underline{a}) = \text{const.}$$

Предложение 3. Для выбранного варианта, когда эффективность воспроизводства популяции задана функцией, соответствующей двум условиям теоремы Синжера о шварциане S_{ψ} и экстремуме:

$$1. S_{\psi} = \frac{\psi'''(x)}{\psi'(x)} - \frac{3}{2} \left(\frac{\psi''(x)}{\psi'(x)} \right)^2 < 0. \quad 2. f'(x_m) = 0, f''(x) \neq 0 \text{ при } x \neq x_m.$$

Отдельно имеет смысл выделить вне набора интервалов параметрические диапазоны периодических окон, но их может быть бесконечное количество.

Замечание 1. В таком случае целесообразно при анализе оперировать интервальным расширением $f(\mathbf{a}, x)$ семейства вычислительных сценариев.

Замечание 2. Условия из Предложения 3 всегда выполняются для модели воспроизводства рыб типа «запас-пополнение» Рикера – с функцией $\psi(x) = axe^{-bx}$:

$$\begin{aligned} \psi'(x) &= ae^{-bx}(1-bx), \psi''(x) = abe^{-bx}(bx-2), \\ \psi'''(x) &= ab^2e^{-bx}(3-bx) \text{ и } \psi^{(n)}(x) = (-1)^n ab^{n-1}e^{-bx}(bx-n), \\ S_{\psi} &= b^2 \frac{-b^2x^2 + 4bx - 6}{2(1-bx)^2} \text{ и } S_{\psi} < 0 \text{ для } x \in \mathcal{R}. \end{aligned}$$

Но не всегда условия теоремы выполняются для другой популярной модели запас-пополнение, предложенной Дж. Шепардом с использованием следующей трехпараметрической функции (K – максимальная численность запаса, a – репродуктивный параметр, b – фактор действия конкуренции):

$$f(x) = \frac{ax}{1 + \left(\frac{x}{K}\right)^b}. \quad (1.5)$$

Модель Шепарда параметрически вариативна, – может быть монотонно возрастающей, либо имеющей максимум – форма зависит от b . При значении $b < 1$ критических точек нет, но $b = 2$ репродуктивная функция «запаса-пополнение» имеет критическую точку $x = K$. На рис. 8 показаны варианты графика функции (1.5) при разных b .

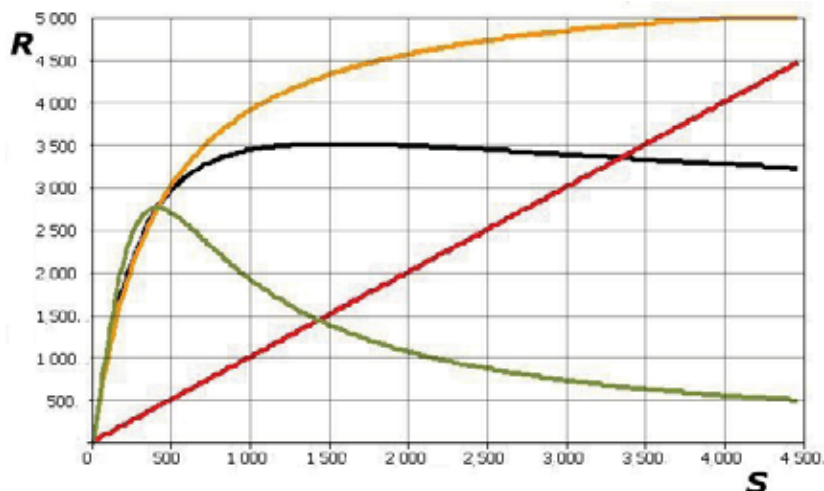


Рис. 8. Варианты графика зависимости модели Шепарда (1.5)

Для функции (1.5) получаем следующие соотношения бифуркационных параметров у производной в стационарных точках:

$\forall n: f(x^*) = f^n(x^*)$, и далее получаем:

$$f(x^*) = x^* = K\sqrt[b]{a-1},$$

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{(K^b + x^b)aK^b - ab(Kx)^b}{(K^b + x^b)^2}, \quad \frac{df(x^*)}{dx} = \frac{a - ba + b}{a}.$$

Вторая производная в критической точке очевидно отрицательна:

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = -\frac{a}{4K},$$

и функция имеет максимум при данных условиях.

Сущностная интерпретация нелинейных эффектов в двух моделях: функции Рикера: $f(x) = axe^{-bx}$ и функции Шепарда:

$$f(x) = ax\left(1 + (x/K)^b\right)^{-1}$$

оказывается прямо противоположной. При аналогичном смысле параметров a, b , *обсуждаемые модели противоречивы*.

Рассмотрев изменение поведения модели Рикера, можно сформулировать гипотезу: увеличение репродуктивного потенциала популяции (параметра a) приводит к появлению флуктуаций численности аperiодического характера.

Однако, в модели Шепарда появление циклов периода $p=2^n$ происходит при увеличении степени действия лимитирующих факторов среды, отраженных b . Отсюда можно предположить, что одна из двух моделей принципиально неадекватна либо заключить, что каскад бифуркаций и ряд других сложных нелинейных эффектов (онок периодичности, перемежаемости, внутреннего кризиса хаотического аттрактора) для SU -отображений не имеет сущностной популяционной интерпретации. Отсюда следующее следствие: функциональная зависимость, соответствующая условиям теоремы Сингера, выходит за пределы применимости в популяционной динамике. Логично для моделирования сценариев при управляемом внешнем воздействии, что нелинейная модель функциональной зависимости вида «запас-пополнение» не должна иметь знакопостоянный шварциан. Иначе внешнее воздействие вызывает бифуркации с изменением периода циклов степени 2, а это не обосновано в наблюдениях.

Можно учесть известный в популяционной биологии эффект Олли применительно к удельной скорости роста численности и дать интерпретацию величине $df(x)/dx$. Представим критерии, при соблюдении которых модель сохранит адекватность. Предложим следующие условия: производная $y(x) = f(x)/dx$ не должна быть унимодальной функцией, а именно:

- а) $y(x)$ должна достигать максимума на промежутке $(0,c)$;
- б) иметь минимум на промежутке (c,d) , где $y(c) = 0$, $y(d) < 0$;
- в) $\lim_{x \rightarrow \infty} y(x) = 0$.

Выделим отдельно ряд предложений по улучшению интерпретируемости моделей данного типа.

Можно сказать, что модели, не учитывающие эффект изменения репродуктивного потенциала в зависимости от численности группы, практически выходят за рамки возможностей интерпретации результатов моделирования.

1.4.1. Предложения по подтверждению наличия сущностной интерпретации поведения моделей

Сформулируем предложения, направленные на совершенствование методики построения моделей и обоснованности интерпретирования результатов расчетов.

Предложение 4. Допустимо использование и непрерывного и дискретного времени со сшиванием траекторий и разделение модели процесса на отдельные стадии и события переходов. Актуально применение гибко настраиваемых предикативно-переопределяемых моделей, что мы обсудим в следующей главе.

При использовании интервального подхода необходимо оценить радиус интервала a . Возможны различные подходы, основанные как на точном знании характеристик каждого вида, так и на фундаментальных математических представлениях. В описанном выше случае моделей ихтиологии можно опираться на результаты вычислений точек бифуркаций Фейгенбаума, изучавшего свойства квадратичного отображения $x_{n+1} = 4\lambda x_n(1-x_n)$ с целью

определения значений λ , при которых происходит удвоение периода цикла, возникшего после выполнения условия:

$$\left| \frac{df(\mathbf{a}, x)}{dx} \right|_{x=x^*} = 1, f(\mathbf{a}, x^*) = x^*.$$

Свойства бифуркаций удвоения универсальны для целого семейства итераций функций, удовлетворяющих критериям теоремы Д. Сингера, называемых *SU*-отображения, к ним относятся и функции, никогда не используемые в экологии.

Параметрические длины интервалов будут неравномерны. Если Λ_n значение параметра, когда период удваивается в n -й раз то величина δ_n быстро приближается к постоянной величине δ :

$$\delta_n = \frac{\Lambda_{n+1} - \Lambda_n}{\Lambda_{n+2} - \Lambda_{n+1}}, \lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = 4,6692.$$

Так, за конечное приращение бифуркационного параметра период цикла становится бесконечным (тогда говорят о хаотизации), причем интервал между последовательными усложнениями поведения траектории динамической системы быстро сокращается. Построению строгой математической теории были посвящены многие работы, однако некоторые утверждения до сих пор базируются на результатах вычислительных экспериментов.

Сложным остается теоретический вопрос об исчерпывающем определении понятия детерминированного хаоса. Определений хаотичности известно несколько. Для работ с итерационными моделями можно использовать данное Ли и Йорком [71] определение критерия хаотичности: в интервале I для каждого числа $n=1, 2, 3, \dots, \infty$ имеется траектория точки с периодом n : $p = f^n(p)$ и существует несчетное множество точек непериодических траекторий $\Phi \subset I$, такое, что $\forall d, q \in \Phi, d \neq q$ будет выполняться:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(d) - f^n(q)| > 0,$$

и для периодической точки $p \notin \Phi$ соответственно выполняется:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(d) - f^n(p)| > 0.$$

Замечание 3. Поведение динамической системы модели Рикера $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ отличается от квадратичного отображения $x_{n+1} = 4\lambda x_n(1-x_n)$ М. Фейгенбаума с переходом к хаотическому репеллеру и $\lim_{n \rightarrow \infty} f_\lambda(x_0) = \infty$. В модели Рикера невозможен граничный кризис хаотического аттрактора,

так как для этой функции $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$. Для квадратичного отображения $x_{n+1} = 4\lambda x_n(1-x_n)$ граничный кризис возможен – аттрактор сталкивается с границей своей области притяжения и перестает удовлетворять критерию инвариантности $f(A)=A$.

Замечание 4. Хаотический режим не имитирует случайность изменений, он не является тождественным процессом по отношению к белому шуму. Вероятность нахождения траектории в одних частях аттрактора выше, чем в других [98]. Данное свойство в хаотических итерациях связано с геометрической структурой неустойчивых неподвижных точек и всюду плотных циклических траекторий. Данное инвариантное множество точек-репеллеров никогда не притягивается к аттрактору. Хаотический режим итераций далеко не белый шум (это коричневый шум), отметим, заполнение траекторией областей фазового пространства не будет равномерным в хаотическом аттракторе. Всегда появляются сгущения, где точки траектории появляются чаще.

1.4.2. Предложения по использованию интервально заданных параметров

С учетом изложенных нами результатов об особенностях поведения моделей промысловых популяций на основе функций Рикера, Шепарда или Кушинга с бифуркационным репродуктивным параметром отметим следующие выводы:

Предложение 5. Интервальный набор параметра \mathbf{a} для итераций с возникновением бифуркаций при $\inf a = \Lambda_1$ пусть содержит внутри интервала как минимум одно бифуркационное значение Λ_n :

$$\text{rad } \mathbf{a} = \frac{1}{2} [\Lambda_2 - \Lambda_1].$$

Подобрать длину интервалов можно эмпирически последовательным приближением в серии численных экспериментах.

Следствие 1. Метод построения бифуркационных диаграмм станет эффективным средством исследования моделей с хаотизацией, однако метод увеличит потребность в вычислительной мощности и затратах ресурсов. Шаг изменения параметра на диаграммах нельзя уменьшать до бесконечности.

Обосновано в [99], что популяции с большим репродуктивным потенциалом склонны демонстрировать колебания с большой амплитудой. Для многих таких популяций, как насекомых вредителей, долго бывают устойчивые состояния при низкой численности, которые могут сменяться пилообразными осцилляциями или единичными стремительными всплесками, как у бабочки непарного шелкопряда, вызывающей поражение огромных лесных массивов.

Предложение 6. Чем больше репродуктивный потенциал, тем разнообразнее число режимов, которые может при некоторых условиях

принимать динамика популяции. Под условиями мы подразумеваем доступность пищевых ресурсов, благоприятность факторов среды и самое важное для моделей – регуляцию биотического противоборства, хищничество, паразитизм.

Для моделей экстремальной популяционной динамики выберем принцип наибольшей возможности выбора режимов поведения. На основе высказанных предложений сформулируем следующий принцип для моделирования типичной промысловой популяции при регулируемом изъятии и активном искусственном выпуске молоди, как происходило в случае деградации осетровых рыб [100].

Предложение 7. Искусственное возрастание репродуктивного потенциала увеличивает избыточный набор возможных изменений качественной динамики, которые допустимы для популяции. Промысловое воздействие уменьшает возможность нелинейных эффектов, что мы исследовали в моделях ранее.

При использовании идеи интервальной неопределенности характеристик увеличение репродуктивного потенциала не приводит однозначно к выводу о хаотизации. Это увеличивает количество доступных качественно различных типов динамики численности популяции, в том числе экстремальных, стремительного коллапса или вспышки численности.

Замечание 5. Возможно получить в модели с большим числом параметров ситуацию, когда количество изменений, происходящих для выбранного нами интервала a , может оказаться бесконечным.

Важно знать для оценки состояния запасов рыб некоторое усредненное по интервалу времени качественное состояние динамической системы. Для оценивания суперпозиции поведения интервального расширения отображения вполне применимы методы масштабируемой решетки с вычислением агрегированного параметра (убыли или воспроизводства). Выбор изменений интервального параметра должен соответствовать одному из доступных диапазонов заданного набора интервалов интерпретируемости.

Предложение 8. Пусть \mathbf{w} ограниченный интервал $[\underline{w}, \bar{w}]$, внутри которого будет принимать различные значения предложенный нами интервально заданный основной репродуктивный параметр популяции в дискретной модели.

$$\mathbf{a} = \{a \mid a \in \mathbf{w}, \underline{a} \leq a \leq \bar{a}\}.$$

Многие природные процессы имеют границы для допустимых режимов существования. Предлагаемое ограничение обосновано тем, что для модели природных процессов невозможно не лимитированное внутренней регуляцией возрастание амплитуды аperiодических колебаний, биологически обоснован сценарий разрушения цикла при достижении критических значений.

1.5. МЕТОД АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ЭКОНОМИЧЕСКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПОПУЛЯЦИЙ

Для многих случаев организованной эксплуатации биоресурсов собираются сведения промысловой статистики и даже данные оценки величины (обычно биомассы) нерестового запаса. Логично представить, что построение математической модели динамики запаса и оценку ее параметров для прогноза допустимого уровня изъятия для таких случаев лучше всего проводить непосредственно на основе обработки данных статистики и учета. Безусловно, такие сведения часто грешат неполнотой и неточностью, когда используют для оценок общей численности весьма приблизительные методы аппроксимации.

Согласно выводам автора показано, что методика оценки запаса путем траловых съемок с последующей интерполяцией полученных локальных уловов на всю акваторию с использованием стандартных коэффициентов уловистости ведет к системной переоценке численности запаса, основываясь на случайных событиях поимки рыб в секторах тралений. Путем сопоставления со сведениями о репродуктивном потенциале других популяций, установлена противоречивость имеющихся статистических сведений для каспийского бассейна и рассмотрено их влияние на управленческие решения при анализе причин деградации запасов.

Получение завышенной оценки запасов промысловых популяций, как оказалось в последующих исследованиях, имеет достаточно распространенный характер. Особенно с использованием методов усреднения, аппроксимации и построения регрессионных уравнений и приводит к серьезным ошибкам, что показано в [101]. Это отражается при экспертном регулировании эксплуатации.

Наборы статистических сведений использовались для выбора наилучшей модели формы зависимости запаса и пополнения и настройки их параметров. Задача решалась обычно путём приближения формы кривой к точкам на диаграмме. Исследователи склонны проявлять изобретательность, когда ставят цель подтвердить их теоретические предположения в практической задаче. Очень редко этот метод имеет смысл (в главе 3 мы обсудим уникальный случай волжской севрюги), более того, такой способ прямо противоречит представлениям о популяции как о динамической системе.

Для подбора значений параметров динамических моделей предлагались построения задачи посвящен один и разделов методической монографии Рикера [102], где предложены имеющиеся в арсенале статистики способы оценки. Однако эти способы вновь сталкиваются с фундаментальными постулатами нелинейной динамики, ведь управляемую популяцию в рамках моделирования мы рассматриваем как естественную динамическую систему в возмущенной среде. Естественные динамические системы как правило диссипативные.

Для построения кривых воспроизводства предлагались преобразования исходных данных наблюдений. У. Рикер логарифмировал предложенную им функцию $R=f(S)$ для вычисления ожидаемого пополнения R от запаса S :

$$\ln R - \ln S = \ln a - bS.$$

После преобразований Рикер на основе данных промысла атлантической норвежской трески *Gadus morhua* построил кривую с использованием регрессии $\ln R/S$ на S для геометрической и арифметической средней. Сам автор работы [102] отмечает, что линии регрессии на графике рис. 9 (рисунок из книги Рикера, где автор добавил траекторию) не отвечают данным о динамике изменений.



Рис. 9. Попытка анализа зависимости между запасом и воспроизводством регрессионным методом по данным промысловой статистики в [102]

Предложим добавить динамический аспект на график статистики, так как были проставлены у точек годы. Прочертив траекторию, отметим важный аспект, — установим, что популяция под воздействием важного фактора после 1948 г. быстро перешла из устойчивого стационарного состояния в окрестность неустойчивого равновесия. Это очевидное проявление порогового эффекта. Прочерченные на диаграмме линии регрессии не могут объяснить подобную динамику. Приближение кривой к точкам никак не гарантирует, что применение этой кривой в качестве оператора эволюции воспроизведет положение точек.

Эффективность воспроизводства после 1949 г. резко сократилась. Переход произошел достаточно стремительно, у исследуемых нами ранее каспийских видов это процесс растянулся. Однако далее воспроизводство столь же резко стало возрастать, но это было временное явление. Описав на фазовой плоскости петлю, траектория вышла к минимальному за время наблюдению значению пополнения. В дальнейшем исследуемый запас трески потерял промысловое значение как минимум на несколько лет (ряд данных заканчивается в 1960 г.). Данная диаграмма показывает последовательное разрушение инвариантных множеств динамической

системы под внешним воздействием, но позволяет или это говорить о форме зависимости с одним экстремумом? Не для всех рыб имеет смысл задача поиска формы зависимости, как для мелких короткоцикловых видов – такие виды подвержены хищничеству и случайным факторам среды.

На примере анализа данных из работ Рикера нами выявлен сценарий деградации биоресурсов в форме коллапса. Сокращение между данными 1959 и 1960 г. достаточно резкое и далее переход к колебаниям вплоть до деградации в 1969 г. Сценарий коллапса тут занял 10 лет. Подобные события целесообразно анализировать в работе подробно с учетом принимаемых решений.

Термин «коллапс» появился в научном обиходе управления промыслом позднее этой работы. Рикером приведены данные на плоскости «запас-пополнение», а не на обычной временной диаграмме динамики уловов, которая, к нашему сожалению, там не приведена, хотя представляет интерес для сравнения. На графиках в работах Рикера и его последователей искалась именно «куполообразная» кривая, но реальная зависимость, которая способна была демонстрировать при итерациях наблюдаемую динамику, выглядит сложнее и предполагает наличие порогового эффекта. У зависимости должен быть, согласно динамике, экстремум – локальный минимум. Пороговые эффекты и негладкие скачкообразные формы ранее известные модели не учитывали, что затрудняло и регулирование, и построение прогнозов.

Полученные нами ранее методами скользящего среднего графики с данными по волжским популяциям оказываются редким случаем и исключением, когда подобный метод принес результат из-за медленного и последовательного процесса деградации, постепенного уменьшения численности всей популяции.

Ценные данные о зависимости в воспроизводстве гидробионтов получали в лабораторных экспериментах [103] для аквариумных популяций. На рис. 10 приведена кривая воспроизводства аквариумной популяции гуппи, что подтверждает нелинейный и асимптотический характер зависимости.



Рис. 10. Экспериментальная кривая воспроизводства аквариумной популяции рыб [103]

Для аквариумных популяций не будет проявляться пороговый эффект агрегированной группы (сильный эффект Олли), так как у рыб такой эффект возникает из-за трудности своевременного обнаружения при поиске партнера для размножения. В большой акватории при малой плотности особей эффект приводит к гибели и разложению вовремя неоплодотворенной икры.

Приведенную форму функциональной зависимости для популяции аквариумных рыбок можно описать известными моделями (вариантом функции Шэпарда). Однако в следующих главах автор приведет примеры более сложных и нетривиальных форм связи запаса и продуцируемого им нового поколения для реальных ситуаций промысловых видов, и эти формы существенно влияют на развитие популяционного процесса при антропогенном воздействии.

Установить форму зависимости по данным на плоскости «запас-пополнение» о циклической и/или устойчивой равновесной реальной популяции в водной биосистеме не представляется возможным, так как для разных зависимостей предельные множества фазовой траектории их итераций могут быть топологически идентичными. Неразличимость действующих зависимостей по данным временного ряда проявляется в силу просто ограниченности числа возможных типов аттракторов диссипативных систем – равновесие или цикл периода два могут появиться при итерациях разных функций. Теорема Ф. Такенса для данных промысловой статистики вряд ли будет применима, хотя попытки применения ее были в [104], но их авторы существенных выводов не получили.

Определить по временному ряду данных наблюдений соответствующие видимым изменениям некоторые перестроения фазового портрета во многих случаях не представляет для математиков сложности. Этим обстоятельством по установлению нужных для описания возникающих топологических перестроений воспользуемся при исследовании типов популяционных кризисов.

Для развиваемого в работе подхода к анализу модельных сценариев возникающие нелинейные эффекты сами по себе важнее, чем тип некоторой зависимости в популяционном процессе, отдаленным проявлением действия которой эти эффекты являются. В ситуации кризисов при эксплуатации биоресурсов интересны нелинейные эффекты, возникающие при некотором уровне регулируемого по установленным правилам антропогенного воздействия.

Моделируя частные эффекты для отдельных ситуаций в итоге работы получим возможность выявлять системные аспекты популяционных кризисов, которые наблюдались для разных биоресурсов и для несхожих методов регуляции.

1.6. МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОДИНАМИКИ КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЙ МЕТОДОМ КОГНИТИВНОЙ ГРАФОВОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ

В случае анализа применимости требующих обоснования альтернативных моделей с противоположным по смыслу поведением полезно сформулировать логические цепочки из утверждений, и опровергать противоречивые следствия.

Математическое описание процессов в практической области экодинамики должно базироваться на теоретическом биологическом обосновании, которое назовем аксиоматическим. Будем оперировать набором причинно-следственных связей, непосредственно вытекающих из данных наблюдений о популяционных процессах или известных по историческим сведениям. Развиваются математические методы для анализа слабоформализованных ситуаций [105]. Для анализа сведений о противоречивом влиянии различных факторов перспективны когнитивные методы системного анализа, – работающие с качественной информацией и помогающие составить структурную диаграмму ситуаций.

Пример построения концептуальной схемы взаимодействия на основе когнитивных графов проведен автором для ситуации деградации биоресурсов осетровых рыб при искусственном выпуске молоди [106]. Нами выполнена структуризация многовариантных аналитических заключений о качестве взаимодействия двенадцать природных и антропогенных факторов в экосистеме Каспийского моря в форме графа, где дугам указывался знак влияния.

На этапе обработки разнородной экспертной информации и опубликованных данных мониторинга нами был сформирован методом когнитивной структуризации оргграф $G(Y, E, V)$ с множеством параметров 12-ти вершин – на рис. 11. Каждой из 12 вершине $v_i \in V$ ставился в соответствие безразмерный параметр-концепт $v_i \in V$ и функционал преобразования дуг $F(V \times V, E)$ для определения соответствующего дуге знакового веса с «+» или «-» положительного или отрицательного влияния концепта.

Функционал преобразования при прохождении импульса между смежными вершинами через инцидентные им дуги определяется следующим образом:

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +u_{ij}, & \text{если при увеличении } v_i \text{ увеличивается } v_j; \\ -u_{ij}, & \text{если при увеличении } v_i \text{ уменьшается } v_j. \end{cases}$$

где значение u_{ij} для дуги будет принимать значения из конечного множества B , при рассмотрении только знака и относительной силы влияния:

$$B = \{-1, -0.5, 0.5, 1\}.$$

Динамику импульса в вершине графа определим как изменение значения ее параметра v_j в момент n :

$$p_j(n) = v_j(n) - v_j(n-1) \text{ при } n > 0.$$

Импульсный процесс будет изменять значение параметра вершины так:

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

Значимыми для гипотез оказались контуры орграфа, имеющие общую зависимую вершину, которые мы назвали конкурирующими путями.

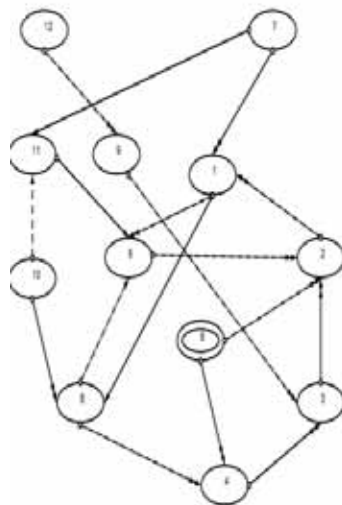


Рис. 11. Когнитивный граф для анализа передачи влияния при взаимодействии экологических факторов в биосистеме Каспия

В оригинальной модификации формализма когнитивных графов выделенные вершины сделаны управляющими. Вершины разделены в графовой модели проблем экосистемы Каспия на зависимые от влияния других концептов и свободные, которые имеют только исходящие из них дуги. Подход позволил автору рассматривать последовательные изменения заданных изначально значений параметров [107], соответствующих вершинам как импульсные процессы в дискретном времени.

С использованием графовой структуризации автором проведен анализ распространения импульсов в вычислительной среде из управляющих вершин. Импульсные процессы для сформированного нами орграфа на примере набора факторов проблематики в Каспийском бассейне целесообразно запускать из антропогенно-обусловленных свободных вершин-концептов графа.

В результате оценки распространения импульса в вершинах нам удалось определить контур распространения импульса когнитивного орграфа, который говорил об опосредованном усилении действия зависящей от плотности смертности. Установленная зависимость не имела постоянного независимого знака «+» или «-», её действие проявлялось резко на границах диапазона оптимальной численности нерестующих производителей, за которыми следовало резкое снижение показателей воспроизводства запасов.

Сопоставление конкурирующих цепочек влияния разной силы для нескольких альтернативных графов может стать полезным способом на заключительном этапе экологического осмысления результатов многих вычислительных экспериментов. Можно реализовать сравнительный перебор сценариев расположения дуг графа и отбросить заведомо не согласующиеся с данными. На основе оценки несинхронности пульсаций значений в ключевых вершинах, входящих в конкурирующие контуры графа, сформированы гипотезы:

1. Присутствует скрытый фактор, влияющий на скорость убыли численности поколения. Таким фактором для моделирования ситуации воспроизводства рыб является темп роста молоди.

2. Обосновано в результате системного анализа, что должен существовать предел процентного приращения численности нерестового запаса, который можно получить в предположении о неограниченном возрастании объемов выпуска искусственно выращенной молоди.

3. Обоснована основная и подтверждённая моделью гипотеза о том, что спад эффективности воспроизводства справа от равновесия ассоциируется с перекрытием миграционных путей и интенсивным изъятием рыб более плодотворной озимой расы, что успешно применено нами при построении модели со сложной внутривидовой структурой.

Применение автором метода графовой структуризации позволило от обих идей теории формирования пополнения запасов рыб перейти к описанию специфической ситуации последствий интенсивной эксплуатации анадромных рыб с продолжительным жизненным циклом и длинными миграциями.

Метод когнитивной структуризации позволил автору на основе орграфа выявить скрытый контур обратной связи, ослабляющий эффективность воспроизводства рыбных популяций. При экспертном управлении этот фактор стал причиной завышенной оценки допустимой эксплуатации биоресурсов. В результате, как теперь очевидно, сокращение объемов вылова осетровых произошло достаточно стремительно и не согласовывалось с ожиданиями от прогнозируемого экспертами восполнения запасов путем искусственного воспроизводства. На примере построения графа связи экологическим и антропогенным образом возникших факторов продемонстрировали, что методы когнитивной структуризации позволяют формировать сущностные гипотезы о роли факторов для имитационного моделирования, в том числе обусловленных присутствием контура обратной связи. При всех удобствах наглядности, графовые модели с импульсной динамикой отражают экспертные представления о связях, которые бывают противоречивы. Эксперты при обсуждении перспектив эксплуатации оперируют позитивными и негатив-

ными для данных биоресурсов факторами, которые передают действие со знаками «+» или «-».

Иногда факторы в процессе инвазии могут поменять и направление, и силу влияния. Изменения можно учитывать, составляя и сравнивая схемы возможных трансформаций, но вычислительные сценарии представляются более информативным инструментом сопоставления вариантов развития регулируемых процессов. Графовая структуризация цепочки факторов не заменит в прогнозах вычислительные эксперименты, не обладая нелинейностью в реакции на передачу воздействия. Чрезмерное расширение графовой модели аналогично представляется нецелесообразным, так важны замкнутые контуры графа, а не просто количество вершин.

1.7. ОБЩНОСТЬ ПРОБЛЕМ ФОРМАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ РАЗНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Обзор спектра существующих проблем при модельном описании экологических ситуаций, вызывающих противоречия при применении известных и уже стандартных методов формализации биосистемы процессов, подтвердил актуальность выбранной цели исследования в области методологических основ для организации структуры моделей математической биологии и обоснования сценарных методов анализа ситуаций с выбираемой логикой воздействия.

Важная причина появления сложностей, общих для популярных методов динамического моделирования биосистем – необходимость интерпретируемого представления нелинейных режимов при описании резких и пороговых изменений в течении процессов. Поведение известных моделей прогнозируемо, так как подчиняется фундаментальным теоремам. Условия теорем не имеют обоснования в экологии, они включают только сугубо математические аспекты свойств применяемых в моделях функций, как знак дифференциального инварианта Шварца, включающего 2-ю и 3-ю производные функций.

Показано, что регуляция эксплуатации биоресурсов с использованием экспертных решений по сезонным квотам изъятия сталкивается с противоречивой оценкой тренда развивающейся ситуации при возникновении пороговых эффектов. Эти явления не выявляются на основе прежней статистики о стабильной системе. В данном случае регуляция воздействия зависит *от оценки состояния* объекта и *от ожиданий* развития ситуации. Изменение длительного воздействия вызывает качественные трансформации в механизмах регуляции живых систем, что требует вариативности в оценках и в построении прогнозов, которые можно использовать для анализа эволюции состояния биосистем.

Актуальным явлением, важным для практики природопользования оказывается стремительное сокращение запасов: в форме коллапса биоресурсов. Описаниям коллапса посвящены многие работы ведущих ученых [108].

Остается важной нерешенной проблемой природопользования исследование коллапсов, причины и последствия явления, и поиск методики предотвращения коллапса при экспертном регулировании эксплуатации биоресурсов, когда для принятия решений у ЛПР нет стандартизованных нормативной базой правил. Ситуация промыслового коллапса угрожает разным видам гидробионтов [109]. До и перед коллапсом популяционные процессы значительно отличаются. Необходимость дифференцированного описания популяционных процессов отмечали в [110].

1.8. РОЛЬ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В АНАЛИЗЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ БИОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Специалистам в междисциплинарной области известны противоречия при моделировании биосистем. Получение частного решения модели на современном этапе развития теории динамических систем само по себе уже не будет обладать новизной. Требуется сущностное обоснование результатов и их применимости для реальных ситуаций, что можно достичь только сравнением различных наблюдавшихся ситуаций при различно выбранном воздействии. Для рассматриваемых в последующих главах реальных примеров резко меняющихся ситуаций в экодинамике естественным расширением становится использование логических переопределений вычислительной структуры моделей. Для их реализации дополнительно необходим способ связанного с основным процессом описания динамики сопутствующих биологических характеристик. Метод построения специальной модификации вычислительных структур с гибридным временем обобщаем далее для анализа других актуальных экстремальных вариантов развития популяционных процессов с резкими изменениями и выраженной стадийностью. К требующим новых методов задачам относятся инвазионные вспышки численности и развитие иммунного ответа на вирусную инфекцию в организме. Другое средство модификации уравнений – включение диверсифицированного представления действия запаздывающих факторов.

Методология системного анализа в области формальной экодинамики развивается в серии наших работ в качестве связующего звена между этапами построения, исследования математического аппарата и заключительным обоснованием полученных в вычислительных экспериментах результатов, применяемых для выработки решений. Известны примеры, когда, основываясь только на вычислениях, получались противоречивые прогнозы изменений динамики ценных популяций при малом возмущении в наборе параметров.

Системный анализ в проблемах прогнозирования состояния экосистем и их регулирования рассматривается автором как технология структуризации информации в процедуре, предшествующей вычислениям: при комплексном обобщении имеющейся информации об объекте, при выборе метода построения модели, подходящего для данной задачи и оценки набора основных параметров.

В принятой в данной монографии трактовке **Системный анализ (СА)** использует методы моделирования, но оперирует в ключевых выводах знаниями об изменении механизмов регуляции процессов, которые получены на основе сопоставления реальных примеров развития регулируемых процессов в биосистемах. Происходящие изменения и воздействия разной природы на биосистемы нами предлагается описать на основе переопределяемых систем уравнений. Имитационные сценарии формируются по принципу «реальные данные + вычислительная модель + логика выбора решений при регуляции».

В предложенном подходе появляется дополнительная актуальность идей вариативного сценарного анализа, который можно называть ситуационным. Тогда логические правила регуляции можно вносить непосредственно в вычислительную модель формализованными логическими цепочками решений при формировании воздействия. По законодательству многих стран решения о биоресурсах принимают экспертные комиссии и выбор сценарного метода обусловлен трактовкой развития ситуации для принимающих решения лиц. Правила составим на основе анализа кризисных ситуаций в природопользовании.

Имитационные методы в системном анализе расширяют рамки традиционного применявшегося исследования уравнений с функционалом воздействия при использовании вычислительных методов для описания адаптирующихся биосистемных процессов. В работе не столько моделируются биологические процессы, сколько развивается метод представления моделей. Вычислительная модель дополняется имитационной составляющей, что позволит оценивать развитие ситуаций при различно выбираемой ЛПР схеме регуляции воздействия по принципу «модель + правила выбора регулируемых решений». Составляемые правила включают и оценивание состояния биоресурсов по принципу импликации «выполнение условий $A \rightarrow$ решение по перемене воздействия B », которыми в реальности пользуются ЛПР.

1.9. ПОСТАНОВКА РЕШАЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ И ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ перечня новых аспектов оценки последствий изменений состояния биоресурсов при регулируемых антропогенных факторах позволяет указать ранее игнорируемые актуальные болевые точки при организации рационального природопользования. Исходя из выявленных проблем и отмеченных противоречий применения известных формальных методов прогнозирования динамики процессов в биосистемах очерчено направление совершенствования методологии математической биофизики с учетом результатов теории нелинейной динамики.

Монография отражает полученный автором опыт при решении следующих научных, теоретических и практических задач (в порядке их реализации):

1. Разработка и объединение в связанную структуру уравнений для убыли численности поколений с переходами между стадиями развития их онтогенеза.

2. Реализация обобщенного метода включения в модели воспроизводства популяций механизмов действия пороговых эффектов (эффект Олли, исчерпания ресурсов среды) в динамике развития регулируемой популяции при особых ее состояниях. Дополнение метода учетом влияния стохастических факторов.

3. Формализация структуры модельного времени с представлением его компонентов в форме вложенных множеств: комплекса иерархии событийности в непрерывных отрезках времени для описания действия онтогенетических изменений и событий, связанных с достижением выделяемых особо состояний.

4. Алгоритм выбора правой части системы дифференциальных уравнений, последовательно сопряженных на отрезках времени $t \in [T_i, T_{i+1}]$ для случая, когда уравнения взаимосвязаны для темпов роста особей и их выживаемости.

5. Организация логически связанной серии модельных сценариев с учетом заданного набора правил выбора уровня воздействия и его дальнейшей корректировки ЛПР при новой оценке состояния объекта в сравнительных вычислительных экспериментах для анализа важных реальных критических сценариев. При оценке заданных в модели сценариев исходим из гипотезы, что для популяционного параметра есть граница диапазона доступных значений.

6. Сопоставление полученных модельных сценариев для имитации вариантов развития коллапсов биоресурсов. Анализ сходств и различий кризисной динамики на основе ряда актуальных примеров стремительной деградации при регулируемом ЛПР эксплуатации биоресурсов. Обобщение сценарного подхода к оценке развития параметрически заданной ситуации при определенном воздействии на основе предикативно переопределяемой вычислительной структуры и динамически формализуемой логики принятия решений, применяемой при реальном регулировании эксплуатации биоресурсов экспертными методами.

7. Развитие метода анализа вариативности развития при алгоритмически предикативно заданном воздействии на эксплуатируемые популяции. Разрабатываемый метод представления оригинальной непрерывно-событийной структуры уравнений реализует анализ сценариев развития нелинейных процессов в рамках проводимых систематических исследований популяционных кризисов разной природы с формальным описанием их особенностей и этапов их развития. Результаты анализа сценариев предназначены для поддержки принятия решений по корректировке воздействия на биосистемы, в том числе при разработке стандартизирующей нормативной документации.

В результате решения семи основных задач сформированы методологические основы организации вычислительной структуры, предназначенной для описания особых нелинейных явлений экодинамики и экстремальных

изменений, которые наблюдаются в биосистемах, согласно приведенным в главах 3 и 4 нашей монографии примерам данных мониторинга.

Задачи предполагают обоснование и апробацию на реальных примерах созданной методики системного анализа динамики ситуаций, возникающих при экспертном управлении эксплуатацией биоресурсов с учетом факторов нелинейности, когда механизмы регуляции эффективности воспроизводства ценных популяций характеризуется нелинейными пороговыми эффектами. Задачи актуальны для повышения обоснованности принятия решений при регуляции использования биоресурсов и методов биологического контроля.

Актуализация методологии включает возможности для дополнения предикативно переопределяемой структуры исходя из Принципа вариативности развития явлений, что будет продемонстрировано на примере вспышки численности насекомых вредителей, завершающейся без внешнего воздействия при исчерпании ресурсов для размножения. В перечень практических задач для применения разработанного метода входит анализ сценариев резкого и глубокого популяционного кризиса после стремительной фазы инвазии и, в частности, последствий образования затухающей инвазионной вспышки численности.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ I

На основе обзора основополагающих работ и современных результатов в монографии рассмотрены различные проблемные аспекты методов, которые возникают при попытках представления свойств природного объекта в форме траектории динамической системы. Сложности работы крупномасштабных моделей в параметрической их настройке, полноте и корректности исходных данных. Проводившееся с большими усилиями построение многокомпонентных моделей экосистем часто не помогало избежать исчерпания биоресурсов.

Динамические системы – математические объекты и ведут себя по математическим законам, потому получить от их свойств биологические (химические, социологические и др.) теоретические выводы представляется отдельным искусством, как верно заметил основатель отечественной школы математического моделирования биологических сообществ В.В. Меншуткин [111]. Графовые когнитивные методы могут помочь с обоснованием выбора метода построения модели и отбора значимых факторов по силе их влияния.

Определены ключевые характеристики зависимостей итерационной модели популяций, которые влекут избыточные нелинейные эффекты – трансформации фазовых портретов, сложно сопоставимые с наблюдениями. Удалось выявить существование у четырех известных моделей воспроизводства параметрических диапазонов, для которых поведение траектории не может получить должной интерпретации в биологической проблематике. Их нелинейность избыточна.

Показано, что интервалы значений с внутренним кризисом аттрактора могут в вычислительном эксперименте вклиниваться в диапазон параметров интерпретируемого поведения. Предложен метод разграничения вы-

зывающих бифуркации параметров популяционных моделей с представлением их как интервально заданных величин для исключения избыточных метаморфозов фазового портрета на примере моделей динамики теории пополнения запасов рыб. Показано на примерах с данными статистики о промысле горбуши и трески, что свойства применяемых в моделях SU -отображений коренным образом влияют на истолкование полученных на ЭВМ результатов. Обоснован подход к интерпретации качественных изменений в динамике для моделей на основе разностных уравнений. Выполнение условий фундаментальных теорем может служить критерием применимости моделей для динамики популяций рыб. При проявлении нелинейных эффектов целесообразно моделировать процесс на разграниченных параметрических диапазонах бифуркационных параметров.

Проблема системного анализа определена как методология рассмотрения динамики выявленной противоречивой экологической ситуации со сравнительным описанием происходящих метаморфозов. В нашей трактовке сама по себе математическая формализация не играет главенствующую роль без обоснования и фактического сопоставления результатов вычислений. Следовательно, анализ фактов и мнений экспертов будет для автора важнее просто наличия вычислительных моделей, которых в данной области предложено было много и очень разных, но не решивших важные проблемы.

Продемонстрированы возможности модификации методологии применения когнитивных графов [112] в экологии, позволяющих на качественном уровне формализовать ситуацию в виде множества факторов и направлений передачи их воздействия, которые далее формализуются в моделях.

Практическая цель работы направлена на улучшение принципов принятия решений и снижения риска развития кризисов в сложных ситуациях при наличии нелинейных эффектов. С помощью разработанных моделей можно сопоставлять, как правила регуляции и своевременные решения влияют на развитие исследуемой ситуации. Принцип выбора действий при выполнении условий ближе к реальности, так как решения по квотам эксплуатации, согласно № 174-ФЗ РФ «Об экологической экспертизе», обсуждают эксперты. Вводится ГОСТ о методиках принятия управленческих решений для сохранения биоресурсов [113].

В отличие от прежних работ в области математических методов в экологической проблематике регулирования анализ будет проводиться не от свойств предложенного математического аппарата и решений уравнений. В нашем подходе исходим из логики принимаемых при регуляции типичных решений для сценариев, которая будет инкапсулирована в модель процесса.

Предложена классификация динамических типов развития исследуемых критических ситуаций (разных вариантов деградации биоресурсов и вспышек численности). Для получения картины разнообразия типов рассмотрим реальные примеры кризисов в биосистемах, развивавшихся при регулируемом природопользовании и научных методах прогнозирования. Сравнение реальных ситуаций позволит решать поставленные перед математической биофизикой задачи по развитию новых методов формализации структурных и регуляционных изменений процессов, дополняющих средства имитационного моделирования.

Определены оригинальные идеи для развития метода организации вычислительной структуры с предикативными переопределениями и представления гибридной модели в имитационных сценариях. Использование гибридных структур даст возможность задействовать широкий спектр описательных средств для сложных ситуаций в экодинамике, что позволит:

1. Выделять особые моменты в формате времени на основе соотношений между характеристиками биосистем и складывающимися условиями в пространстве состояний, достижение которых приводит к резким и качественным изменениям в развитии процесса.

2. Учитывать влияние сопутствующих процессов анаболизма на динамику численности и метаморфозов развития онтогенеза на выживаемость поколений.

3. Рассматривать пороговые эффекты в динамике, ведущие к появлению и завершению экстремального характера популяционных процессов.

4. Формализовать результаты взаимодействия нескольких взаимосвязанных процессов, которые протекают с несогласованными структурными изменениями и отличаются различной скоростью. Включение в модель динамики промышленного вида сразу нескольких процессов жизненного цикла даст метод описания эколого-физиологического развития особей поколения, испытывающих трансформации в онтогенезе. Вычисление моментов подобных метаморфозов необходимо осуществить в модели взаимосвязано с изменением темпов роста самих особей поколения и с развитием конкурирующих организмов.

5. Учитывать логику и мотивацию принятия экспертных решений при управлении биоресурсами и принципов выбора ЛПР стратегии эксплантации для ситуаций, что позволит перейти к сценарному исследованию развития ситуаций, которые способны приводить к стремительным кризисам и краху промысла.

6. Диверсифицировано учитывать явления запаздывания в регуляции популяционных процессов, что позволит описывать развитие инвазий при активации биотического сопротивления и прогнозировать последствия проявления скрытых пороговых эффектов из-за разрушения новой среды обитания активным вселенцем с несоразмерным репродуктивным параметром.

Для формализации правил при принятии ЛПР регулирующих воздействия решений автором проведен обзор реальных ситуаций по данным учета состояния биоресурсов. Благодаря методу графовой когнитивной структуризации удалось выявить последовательность действий, когда регулируемое воздействие привело к истощению биоресурсов и кризису природопользования. Сценарное моделирование в работе предполагает формализацию тех критериев оценки, которыми в реальности пользуются ЛПР при прогнозировании состояния биоресурсов и оценке дальнейшего уровня и ограничений при их эксплуатации.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРЕОПРЕДЕЛЯЕМОЙ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Из-за стремительно возникающих в современных условиях изменений среды функциональные требования к развиваемым математическим методам прогнозирования в области биологии (популяционной экологии, микробиологии, генетики, рыбном хозяйстве и природопользовании) необходимо корректировать с учетом специфики научного направления. В новых задачах исследований в области экодинамики и регулирования природопользования требуется рассматривать факторы, которые ранее считались второстепенными. Проблема расширения арсенала описательных средств моделирования сценариев является актуальной, так как наблюдалось большое количество примеров краха природопользования, истощения биоресурсов при ведении регулируемой и научно обоснованной эксплуатации запасов. Несмотря на полученные в данной области результаты, сохраняются значимые недостатки известного математического аппарата для описания гибкости популяционных процессов с точки зрения теории динамических систем.

Выявленные сложности применения известных методов моделирования не исчерпываются недостаточным соответствием решения систем уравнений заданным критериям или статистическим показателям. Регуляцию воздействия на биосистемы задают специалисты, интерпретирующие часто искаженную неполную информацию, имеющие разный опыт и реализующие собственную мотивацию. Сейчас недоступны методы прогнозирования, исключающие ошибки при принятии экспертных решений при выборе стратегии эксплуатации биоресурсов, так как одни решения априори более желательны и ожидаемы, тогда как другие негативные – считаются вынужденными и их часто откладывают.

Цель главы II – разработка метода представления предикативно переопределяемой модельной структуры с формализацией разнородных событийных изменений уравнений в непрерывном времени, удобного для организации имитационных модельных экспериментов развития экологических ситуаций. Разработанное представление структуры модели и формы гибридного времени ориентируется на возможности выбора информированными экспертами некоторой стратегии регуляции. Целенаправленную разработку имитационной модели динамики развития кризисной ситуации проведем для поддержки принятия решения экспертами, которые анализируют аспекты конкретных экологических ситуаций и определяют стратегию эксплуатации (квотируемый объем изъятия, сроки и регион ведения промысла) биоресурсов популяции. При выборе уровня воздействия ЛПР оценивают доступные наблюдению показатели популяции. В данной работе

численные решения уравнений в гибридной структуре времени представляются инструментом *прогнозирования*. Помимо средств описания нелинейных эффектов для поставленной цели важно рассмотрение механизмов и правил принятия регулирующих решений. Событийность развития обосновывает внедрение *алгоритмической* составляющей в вычислительных экспериментах.

Системы обыкновенных дифференциальных уравнений в задачах описания процессов в экологии популяций не смогли применять на практике столь универсально, как при моделировании физических явлений. Для прогнозирования динамики компонентов биосистем базовые принципы модели нуждаются в *ситуативных дополнениях*. Оригинальным гибким решением в работе станут вспомогательные уравнения, описывающие сопутствующие процессы не только для нахождения условий переключений режимов изменения состояния основной вычислительной системы. Логично применить их для удобной расширяемости базовой гибридной формы с целью уточнения аспектов при конкретизации модели для исследуемой ситуации. Метод включения триггерных функций обеспечит вариабельность развития сценариев. Выбранная гибкая структура применима к анализу иных актуальных экстремальных явлений, как внезапное развитие стремительной вспышки численности насекомых вредителей и для повышения обоснованности принятия решений с целью биологического контроля нежелательных видов и опасных вселенцев.

2.1. ЦЕЛИ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭКОДИНАМИКИ

Одна из задач системного анализа сложной ситуации в естественной среде – предложить способ формализации, который лучше согласуется со спецификой исследуемой ситуации. Для формирования экологических выводов способ должен позволять специалистам проводить прогнозирование многофакторного влияния на процессы. Цели метода анализа ситуаций требуют средств формализации для экстремального развития популяционных процессов, которые претерпевают внутренние изменения. Концепцию оригинальной модификации гибридной структуры развиваем как наиболее обоснованную для имитации характеристик изменчивых процессов с непостоянной стратегией регуляции, имеющих выраженный стадийный характер и испытывающей кризисы.

Построение оригинальной структуры для вычислительного моделирования и организации в модели параметрически заданных ситуаций с анализом развития обоснованы из свойств реальных воздействий в экодинамике. Ключевой момент предложенного метода – представление формы времени в динамической модели с использованием дифференциальных уравнений для изучаемой ситуации.

Дискретные и непрерывные формализации процессов обладают преимуществами, особенностями и скрытыми недостатками, которые необходимо учитывать и по возможности нивелировать. В поведении дискретных моделей (относятся алгоритмические, логико-событийные, матричные и др. методы) спектр возникающих нелинейных эффектов шире. Хаотизацию поведения можно получить в уже в одномерной функциональной итерации $f(x): I \rightarrow I$, но это не является достоинством, а только следствием универсальности поведения целого семейства функциональных итераций. Критерии появления бифуркаций и порядок циклов теоремы Шарковского сами по себе не имеют отношения к исследованию жизни популяций. Многие математические артефакты были привнесены в область биологии для попытки описания ряда качественных изменений, но без глубокого понимания их сути.

Если биологические процессы моделируются непрерывными системами, то эти результаты получают более строгое математическое обоснование. С другой стороны, представление изменений таких процессов как полностью непрерывной динамики в системах дифференциальных уравнений достаточно абстрактно. Непрерывность величин для популяционных процессов и неразрывность времени для большинства трансформаций экосистем изначально является математической идеализацией.

Существуют много видов организмов, у которых поколения дискретны, не перекрываются и даже развиваются в разных условиях. Самый яркий пример отстоящих поколений наблюдается у цикад – половозрелые особи выходят на поверхность раз в 7, 9 или 11 лет и появляется новое поколение, но при этом у цикад с длинным личиночным жизненным циклом существует только три или четыре поколения. У лососевых рыб существуют четные и нечетные фактически обособленные субпопуляционные группировки. Стадии жизненного цикла для множества видов чрезвычайно различны по экологии, физиологии, поведению и месте в трофической цепи. Существует понятие интервала уязвимости вида [114], это отрезок времени онтогенеза, когда убыль численности проходит максимум.

Организм управляется молекулярными сигналами. Увеличение численности живых клеток тоже происходит событийно и при прохождении фаз процесса деления – митоза. Без сигналов клетки осуществляют только накопление цитоплазмы находясь в интерфазе. Смены фаз – это событийность развития.

Помимо естественной дискретизации – череды поколений, происходят событийные изменения регуляции убыли численности и воспроизводства, которые вызваны складывающимися условиями. Постоянство некоторых из параметров в таких моделях для априори эволюционирующих систем очевидное упрощение. Селективный промысел при длительной эксплуатации сокращает среднюю плодовитость λ . Выживаемость на ранних стадиях развития резко колеблется и у рыб, и у насекомых по нескольким причинам, создавая эффекты малых и больших поколений, что не всегда прогнозируется регуляторами.

Нельзя однозначно сказать на основе имеющихся в литературе результатов исследований, какой именно фактор или характеристика вида ответ-

ственно за феномен популяционной цикличности. Как отмечено в [115], нереально признать обоснованным выделение какого-либо одного и априори решающего фактора, определяющего флуктуации численности видов в рыбных сообществах.

Специалисты выделяют следующие причины возникновения цикличности для промысловых биоресурсов [116]: 1) изменения кормовой базы при переходе на активное питание; 2) в колебаниях численности поколений рыб наиболее значимо уничтожение хищниками икры и молоди рыб; 3) разнокачественный онтогенез – влияние «условий нагула»; 4) влияние факторов среды (климат и гидрологическая обстановка). У всех концепций есть определённые ограничения применимости. Колебания возникают у популяций очень разных биологических видов и с коротким, и с длинным жизненным циклом и малым r -параметром. Цикличность отмечена и у находящихся в конкурентных взаимоотношениях с окружением популяций, так и у изолированных в лабораторных условиях [73].

Не все изменения модельных параметров, отражающие приспособленность популяций к меняющимся условиям, ведут на практике к качественным изменениям поведения. Во многих случаях биосистема стремится сохранить *status quo*, в ответ на воздействие запускаются приспособительные механизмы.

Более достоверна гипотеза, что за цикличность отвечает не некоторый один фактор и/или параметр, а форма регуляции эффективности пополнения, которая может изменяться в зависимости от состояния популяции. По нашей идее эта зависимость гибко трансформируемая, а не статичная. В разработанном нами подходе зависимость не будет определяться некоторой формой функциональной кривой, но семейством кривых с параметрически зависимыми свойствами.

2.1.1. Возможности описательных средств гибридных систем

Фактически, нашими *средствами описания* становятся метаморфозы фазовых портретов динамических систем (трансформации типов аттракторов, бифуркации, изменения положения инвариантных многообразий), которые мы будем интерпретировать для трактовки популяционных изменений. Необходим метод гибкой реализации именно необходимых изменений в поведении траектории в определенных моментах времени, определенных свойствами исследуемого процесса. Сопоставление требует алгоритмической расстановки на шкале времени нелинейных эффектов, которые мы рассматривали в главе 1.

Важный вопрос, решаемый рациональным выбором метода моделирования – допустимая «сложность» по количеству включенных параметров и переменных разрабатываемой популяционной модели, которая предназначена для анализа с учетом управляющего воздействия. Сложность поведения модели – это несколько другое качество, зависящее от возникающих нелинейных эффектов.

Обширный опыт практического применения говорит о негативной стороне чрезмерного усложнения «экомоделей», что отрывает модели от ре-

альности из-за невозможности идентификации параметров. Проблема границ усложнения отмечена В.Н. Тутубалиным в историко-методологическом анализе примеров моделирования экосистем [117]. В этой работе рассмотрен ряд неудач с применением дифференциальных уравнений. Однако, вычислительные мощности и надежность производительных численных алгоритмов за 20 лет многократно возросли. Существующие инструментальные вычислительные средства позволят использовать нам расчеты систем уравнений на интервалах времени и оптимизировать параметры с использованием обычных ноутбуков.

Мы выделим три основные для решаемых задач развития методов математической биофизики, три аспекта сложности при построении моделей:

1. Математическая. Проблема аналитического исследования нелинейных систем уравнений, доказательство устойчивости особых точек или периодических траекторий.

2. Сложность интерпретации поведения. Простые модели могут демонстрировать нетривиальную динамику.

3. Проблема параметрической размерности. Необходимость включения большого числа трудно оцениваемых коэффициентов снижает достоверность расчетов, и при наличии нескольких конкурирующих бифуркационных параметров.

Достижение целей предполагает нахождение баланса описательных возможностей разрабатываемой модели с уровнем сложности ее поведения. Арсенал описательных тех средств, которые мы можем задействовать в теории динамических систем, ограничен по приведенным трем аспектам. Все возможные свойства их фазовых портретов описываются фундаментальными теоремами. Для описания рассматриваемых ситуаций требуется досконально понимать последовательность возникновения топологически неэквивалентных фазовых портретов, и обосновано их применять. В главе 2 рассмотрим направления междисциплинарного развития вычислительных методов, включая алгоритмическое представление изменяющихся процессов экодинамики, которые опишем гибридными вычислительными структурами. По изложенным причинам обосновано разработать специальный удобный для решаемой нами задачи формат представления времени, совмещающий различные компоненты и события, который реализуем дополнительным алгоритмом в инструментальной среде моделирования при организации схемы вычислений.

2.2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНО-СОБЫТИЙНОГО МОДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА И РЕГУЛИРУЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Строгий математический подход в форме максимизации функционала выгоды от природопользования – задача, решавшаяся многими авторами, но на практике не решенная без рисков развития быстрых кризисов. Оце-

ненное как благополучное состояние биоресурсов приводит к решению последовательно увеличивать изъятие, но при этом исходная оценка долго не меняется.

Далее для получения необходимых нам *описательных средств* и *ситуативных дополнений* мы рассмотрим варианты формализации модельного времени. В дальнейшем будем применять их при алгоритмической реализации моделей популяционной динамики и сценариев с управлением стратегией эксплуатацией, имитирующей логику принимаемых экспертами решений.

Ключевое понятие в задаче представления хода времени при моделировании разнородных процессов с изменениями во времени – «гибридная система». Теория гибридных систем достаточно развитое научное направление, использующая современные численные методы, развиваемые в работах отечественных авторов Колесова Ю.Б. и Сениченкова Ю.Б. [118], Карпова Ю.Г. [119], Новикова Е.А. [120], что позволит нам использовать успешные разработки для проведения вычислений при анализе поведения и сценарных экспериментов.

2.2.1. Теоретические основы использования дифференциальных уравнений с переопределяемой правой частью в моделировании биосистем

Существует несколько определений «гибридности» систем, это далеко не устоявшееся понятие в современной технической литературе. Гибридной сейчас можно назвать и гитару, и фотокамеру. Много очень разных по своим характеристикам моделей их авторы называли «гибридными», подразумевая под этим сочетающиеся свойства отдельных методов моделирования. Гибридные модели можно классифицировать на несколько категорий различным образом.

Во-первых, для наших задач важно – какая именно из составляющих траектории превалирует при оценках состояний систем.

В большинстве моделей с различным поведением в подобластях фазового пространства (импульсные возмущения, переопределяемые характеристики, релейные переключатели, кусочно-непрерывными правыми частями и другие «склеенные» вычисления) превалирует непрерывная. В таком варианте используются разновидности дифференциальных уравнений. Дискретная фракция изменяет/возмущает ход непрерывного решения в точке переключения. По терминологии М.И. Фейгина [121] общий термин для подобных негладких структур – системы с разрывными нелинейностями.

Примеры подобных систем рассматривались при моделировании во многих технических системах, например, свойства поведения осциллятора с сухим трением можно описать с изменением знака:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = \begin{cases} + a\omega_0^2, & \frac{dx}{dt} < 0 \\ - a\omega_0^2, & \frac{dx}{dt} > 0 \end{cases}$$

$$k/m = \omega_0^2$$

$$f_0/m = a\omega_0^2,$$

где f_0 – трение Кулона, m – масса тела, k – жесткость пружины.

Для лампового генератора с кусочно-постоянной зависимостью анодного тока от напряжения на сетке формируется уравнение с переопределением:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2h\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \begin{cases} \omega_0^2 I_s, & \frac{dx}{dt} < 0 \\ 0, & \frac{dx}{dt} > 0 \end{cases}$$

$$h = R/L; 1/LC = \omega_0^2; I_s = M\omega_0^2.$$

В таких моделях явно различимы мгновенные и длительные (колебания) действия и разбиение фазовой плоскости на две области. Математической моделью переопределений являются дифференциальные уравнения с разрывными коэффициентами. Теоретический аппарат для подобного метода моделирования предоставляет концепция дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, рассмотренная в работах А.Ф. Филиппова [122], где обобщается понятие решения уравнения, удовлетворяющего условиям К. Каратеодори. Проводится обобщение традиционной теоремы существования, дается классификация особых точек их критериев устойчивости и особенностей на линиях разрыва. А.Ф. Филипповым была предложена методика «доопределения Филиппова» – способ формально доопределять правую часть.

Суть «доопределения Филиппова» предполагает, что для исследуемого скалярного уравнения с разрывной правой частью вида:

$$\frac{ds}{dt} = f(s, t)$$

движение траектории вдоль линии скольжения решения $sl(s)$ будет определяться согласно методу вектором: $f^0 = \mu \cdot f^+ + (\mu - 1) \cdot f^-$, $0 \leq \mu \leq 1$, направленным по касательной к ней и равным в каждой его точке сумме векторов f^+ и f^- фазовой скорости в рассматриваемой точке, принадлежащим

полуплоскостям: $\frac{ds}{dt} \geq 0$ и соответственно $\frac{ds}{dt} \leq 0$.

Для успешного анализа уравнений модели с разрывной правой частью вычислительными алгоритмами нами предполагается выполнение условий:

1. Предел равномерно сходящейся последовательности решений должен быть решением.

2. При любых начальных условиях из рассматриваемой ограниченной области решение должно существовать и продолжаться до границы области (либо неограниченно).

Непрерывные динамические системы с разрывной правой частью вида

$$\frac{ds}{dt} = \begin{cases} f_+(s,t), & \text{при } H(s) > 0 \\ f_-(s,t), & \text{при } H(s) < 0 \end{cases}$$

имеют ряд особенностей исследования их поведения. Такие уравнения порождают негладкие траектории, но это не основная сложность. Корни характеристического уравнения (Мультипликаторы) в таких случаях меняются скачкообразно, вдруг «перепрыгивают» через единичную окружность на комплексной плоскости. Возникают так называемые «разрывные бифуркации» вместо плавного перехода. В работе [123] предложен способ ступенчатого сглаживания, позволяющий свести разрывные бифуркации к последовательности типичных бифуркаций. В ситуациях кусочно-гладких правых частей мы при этом не сможем отследить важный для нас момент собственно потери устойчивости. Указанную сложность в разработанном методе представления гибридной структуры мы обходим кардинально – будем рассматривать поведение итераций получаемой при решении последовательности начальных условий зависимости. Соответственно, исследовать бифуркации дискретной траектории, отражающей состояние системы на границах непрерывных отрезков. Значения переменных в непрерывном времени, отрезки гладких траекторий и внутрикадровые события останутся внутренними расчетами модельной структуры.

Проблемой численного исследования гибридных систем впервые начала заниматься группа под руководством В.М. Глушкова [124]. Автоматическое управление для систем переменной структурой исследовалось Е.С. Емельяновым [125]. Систематизированными результатами указанных авторов мы будем пользоваться при решении наших модельных структур численными методами.

В подходе, где решение уравнений разбивается на подобласти, моменты и причины появления «событийности» сами по себе не представляют интереса, исследуется сшитая из отдельных участков фазовая траектория на поверхностях разрыва. В наших сценариях управления основной и доступной для наблюдения предполагается дискретная составляющая траектории, этот выбор обоснован биологически и с точки зрения организации управления, мы не можем получать непрерывную информацию о многих природных объектах. Метод принципиально отличен от импульсных систем в [126]. Состояние многих других процессов в организме (гемодинамика, нейронная активность) действительно меняется непрерывно, для их описания более применимы импульсные модели.

Во-вторых, для организации моделей значимо по какому принципу фиксируются во времени и находятся разрывные перестроения. В-третьих, важно, влечет ли событийное изменение из-за достижения некоторого особого состояния в одной из подсистем последствия для других связанных уравнений. Тогда в гибридной модели наблюдается каскад событий перестроений.

Целесообразно использовать более точные и специфичные термины применительно к конкретным моделям. Мы можем терминологически определить наши разработки как «предикативно-переопределяемая непрерывно-событийная вычислительная структура». Для формата времени вместо непрерывно-дискретного, как было определено в наших ранних работах, можно предложить более точные термины: событийно-кадрированное и непрерывно-событийное время для случая, когда есть иерархия уровней у разных по своей сущности событий, которые изменяют поведение непрерывной части системы. Разные термины для представления времени отражают сложную организацию времени в модели процесса с управлением (по сравнению с непрерывно-дискретным), надстроенную нами над внутренним представлением времени, используемым численными алгоритмами применяемых нами инструментальных сред. Для работы с вычислительными моделями выбраны продукты отечественной школы программного обеспечения: AnyLogic и Rand Model Designer, развивавшиеся в Санкт-Петербурге.

Таким образом, разработка метода моделирования биосистемных процессов и системного анализа экспертной регуляции ориентируется на вычислительную реализацию с современными алгоритмами в форме гибридного автомата, но основывается на проверенных строгих математических результатах, дающих расширение теорем существования и единственности для анализа решений уравнений с кусочно-непрерывной правой частью. Основы теории анализа разрывных систем и их применения в моделировании регулируемых физических процессов сформулированы в работах Айзермана М.А., Пятницкого Е.С. [127].

2.2.2. Средства представления гибридного времени для моделирования регулируемых биосистем

Рассмотрим формат гибридной системы как обобщение классических динамических систем для специфических задач экодинамики с заданной логикой управления воздействием. Описание формата времени как упорядоченного множества, элементами которого тоже являются упорядоченные множества, является одним из оригинальных подходов в нашей методике. Ранее при моделировании не уделяли этому аспекту отдельного внимания, оставляя дискретизацию непрерывной модели на уровень настройки шага численных алгоритмов. В работе [128] по оптимизации импульсной системы напрямую вводился $[x(t)]$ как скачок траектории x^* в точке t и использовалась конечная последовательность моментов τ переключения динамики. Разработаем далее принцип фиксации тех моментов времени, где применяются уже новые значения уровня воздействия, определенные по критериям применяемых ЛПР правил.

В [129] применен подход к структуризации времени с интервалами режимов изменения состояний в форме гибридного автомата. Изначально система находится в состоянии S_0 , при достижении особого состояния реализуется скачкообразная смена состояний автомата от $S_0 \rightarrow S_1$, где состоянию системы соответствует непрерывно меняющийся процесс на интервале $[t_{+0}; t_1]$ – рис. 3.1.

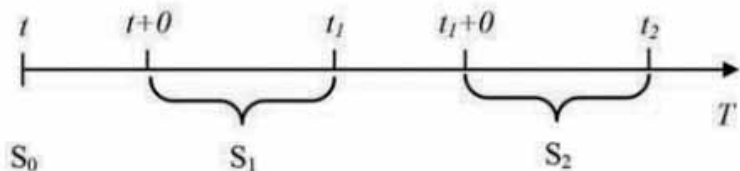


Рис. 3.1. Формат интервального времени для гибридного автомата

В работе [130] введено понятие реализации $\tau^j = \{\tau_0^j, \tau_1^j, \dots\}$ гибридного времени $\tau = \{\tau^0, \tau^1, \dots\}$, – покрытия на неотрицательной полуоси \mathbb{R}^+ конечной последовательностью упорядоченных открытых или полуоткрытых интервалов. Термином «Активности» гибридной системы называют все элементы конечного множества гладких вещественных функций $F = \{f_k, k = 1, N\}$, определенных на \mathbb{R}^+ . Каждая реализация $\tau^j = \{\tau_0^j, \tau_1^j, \dots\}$ гибридного времени будет связана с кусочно-непрерывной траекторией, порождаемой гибридной системой, которая задана в виде последовательности:

$$f_0(\tau_0^j) f_1(\tau_1^j) f_3(\tau_3^j) \dots, f_l \in F.$$

В работе [131] предложен следующий формат гибридного времени для использования в вычислительных моделях физических процессов:

$$\Upsilon = \cup_n \{Gap_pre_n, [T_{n-1}, T_n], Gap_post_n\}, \quad (2.1)$$

где обозначение *Gap_pre* «временная щель» перед и после окончания кадра в последовательности кадров $[T_{n-1}, T_n]$ для технической настройки решателей уравнений – реинициализации начальных условий и формирования новой краевой задачи на следующем интервале времени. Формат (2.1) использовался для демонстрации моделей физических явлений с разными режимами поведения (например, математический маятник на рвущейся нити с режимами колебаний и полета груза). Первая исторически «биологическая» задача гибридных моделей – о кошке, выбирающей оптимальный момент прыжка за бегущей мышью.

Мы модифицируем представление времени (2.1) с целью расширения описательных средств для важных экологических и онтогенетических аспектов.

С данной целью применим встроенные средства алгоритмического языка программирования инструментальной среды моделирования Rand Model Desiner.

2.2.3. Обоснование разработки расширенного непрерывно-событийного формата гибридного времени модельных сценариев

Для создания настраиваемой модели с регуляцией изъятия и стадийностью развития адаптируем концепцию непрерывно-дискретного времени гибридных систем для аспектов популяционной проблематики. Исследуемые нами ситуации имеют значимые аспекты – мы учитываем несколько различных типов изменений, как появление нового поколения, так и онтогенетические и эколого-физиологические трансформации особей одного поколения. Выбранный нами метод построения модели относится к разновидности с гибридных систем с переменной структурой, потому формализация времени потребует для точного установления различных моментов изменений. Исходя из представления о длине времени онтогенеза, внутри которого происходят изменения, мы совместим интервальность и событийность – внутри больших интервалов бы оставим события переходов между режимами изменения состояний (что отличает наш подход от обычных конечных автоматов и карт состояний). Переменность вычислительной структуры в исследуемом случае будет независимой от алгоритма управления воздействием, как других задач. Переопределение базовой непрерывной на интервалах структуры будет задаваться нами из внутренних принципов смен стадий развития моделируемого популяционного процесса. Ключевые из перестроений в модельной структуре в форме системы уравнений мы зафиксируем на шкале времени с заданной их повторяемостью. Для этой цели потребуются «кадрирование» времени. Для установления других моментов перестроений понадобятся дополнительные расчеты. Положение таких моментов на шкале времени будет проистекать из оценки создающихся условий.

Опишем общий метод представления, конкретная реализация множества кадров и внутрикадровых упорядоченных событий может отличаться. По нашей идее число событий в кадре времени определено исходя из особенностей моделируемого биологического объекта. В рассматриваемом далее примере время формализуется для жизненного цикла вида. События требуются для описания структурных качественных изменений как особые состояния в пространстве описывающих процесс переменных с длительностью равной нулю.

Метод структуризации перестроений с помощью кадров и кортежей, задающих перечень упорядоченных событий, сохранит актуальность и для сменяющихся фаз развития иммунного ответа организма, дифференцировки клеток в эмбриогенезе, мутаций в канцерогенезе и других случаев переходов.

Решаемая задача на данном этапе исследований – разработать не просто модельную функцию «запас-пополнение», но предложить методику

гибридного представления функциональной зависимости для сценарного анализа ситуаций с нелинейными эффектами, необходимыми именно для оценки данной ситуации.

В модели экологических ситуаций будем вводить дополнительные условия и для начала, и для завершения действия фактора, так как ход процессов может меняться скачкообразно при выполнении ряда условий в среде. Важным для нашей методики является адаптация представление модельного времени как последовательности коротких событий и определение логики переключений. Точки в кадрированном непрерывном времени для событий, которые ведут к перестроениям в системе дифференциальных уравнений, можно определять вероятностными способами и/или логическими условиями и сравнениями.

Жизненный цикл стандартной длины развивающегося из икринки (яйца) организма (и рыб, и ракообразных, и насекомых) до полового созревания сопровождается метаморфозы. Последовательность из связанных алгоритмом непрерывных интервалов времени биологически можно обосновать из результатов теории этапности развития гидробионтов, развитой научной школой В.В. Васнецова [132]. Для каждого вида есть наиболее значимые метаморфозы в эколого-физиологическом развитии, которые меняют его роль в трофической цепи сообщества и выживаемость, потому зададим разбиение интервала уязвимости на стадии. Изменение доли выживаемости на 1% по сравнению со среднемноголетним значением в раннем онтогенезе у рыб, ракообразных, насекомых имеет большое значение для популяционного тренда. В задачах с переключениями логично задать формат времени с непрерывной и с дискретной компонентой. Для данной задачи выберем формат, который подходит для моделирования процесса с измененным воздействием и особенно в ситуации экспертного управления промыслом, где изъятие рассчитывается на каждый промысловый сезон после оценки текущей ситуации – *ситуативное дополнение*.

Если мы хотим достичь целенаправленного математического описания пороговых эффектов, которые связаны с переходами в критические состояния, то прежде необходимо обозначить их место на оси модельного времени. Такие моменты определяют качественную смену внутреннего характера развития биологического процесса. Процессы убыли численности идут непрерывно, но вероятность погибнуть в разные моменты времени для особей различна, потому мы и используем переопределяемые структуры для описания стадийной динамики поколений, где смертность прямо связана с плотностью особей и взаимосвязана с размерным развитием более сложным образом на трех стадиях.

Непрерывные изменения экспертам в природопользовании знать нет необходимости. На практике фиксируются для отчетов объемы уловов или размеры пораженного вредителями леса по окончании сезона. Есть некоторые отличия оценок численности популяций для разных биосистем. Сельскохозяйственных энтомологов интересует именно вредящие личиночные стадии, тогда как в промысловом рыболовстве важно половозрелое пополнение.

2.2.4. Формализация оригинальной структуры иерархического непрерывно-событийного времени для модельных сценариев

Временные шкалы индивидуального развития и смены стадий в раннем онтогенезе и данные отчетов промысловой статистики имеют разный порядок. Используем кадрирование иерархии непрерывных отрезков времени в вычислительных экспериментах с предикативно изменяемой формой воздействия. Внутри основных кадров составим порядок из пронумерованных событий t^i . Гибридное событийное время для вычислительных экспериментов формализуем в форме последовательности *кортежей* – наборов из упорядоченных элементов на фиксированной длине интервала T :

$$\Gamma = \bigcup_n \left\{ \uparrow L_n, \left\{ \bigcup_i [t_0, t_i, t_{i+1}, T] \right\}_n, \downarrow R_n \right\}, \quad (2.2),$$

где i – номер для события внутри кадров перед T , а n – текущий номер кадра в порядке сменяемых поколений. Можно использовать термин «мультикортеж» (по аналогии с мультимножеством) как упорядоченное множество, элементами которого являются другие упорядоченные множества. Размерность такого мультикортежа гибридного модельного времени из кадров с событиями будет определяться продолжительностью вычислительного эксперимента.

Элемент формата времени – замкнутый интервал:

$$\Gamma_i = [t_0, t_i, t_{i+1}, T],$$

так как полуоткрытые интервалы $[t_N, \infty)$ в контексте нашей задачи нереалистичны. Запись времени с дискретными компонентами (2.2) оставляет грани $\{\uparrow L, \downarrow R\}$ справа и слева от основной единицы – кадра с номером n . Грани между кадрами времени, но не входящие в кадр в виде точек $\{\uparrow L, \downarrow R\}$ нужны для выполнения перестроений в выделенных условиях пунктах системных переходов. Помимо переопределения начальных условий для расчета задачи Коши после *каждого* событийного изменения, на следующем кадровом отрезке, в правой точке $\downarrow R$ меняются установки величины воздействия регулируемого промысла – именно тут будем рассчитывать изъятие из запаса. В левой точке $\uparrow L$ проводим переход к расчету развития уже следующего смежного поколения. Форма времени с непрерывной и дискретной компонентой оставляет “щели” вне кадров для перехода к расчету развития следующего смежного поколения – границы $\uparrow L$ слева и $\downarrow R$ справа от непрерывного, разбитого внутри на три субинтервала:

$$[0, t_1, t_+^*] \cup [t_-^*, t_1, t_2, t_+^*] \cup [t_-^*, t_2, T].$$

Объединение субинтервалов мы называем кадром модельного времени. Здесь t_+^* и t_-^* – специальные концевые точки для сопряжения начальных условий *внутри* кадра, которые не входят во внутрикадровые интервалы расчета. В наших моделях перерасчет производится и между сменяющимися непрерывными кадрами, и в точках внутрикадровых событий, что отличает наше онтогенетическое представление времени от классической гибридной системы.

Заданное разделение кадра $[0, T]$ актуально для видов с тремя стадиями и двумя вычисляемыми модельными метаморфозами в моменты $\{t_1, t_2\}$. Максимальное число событий i_{\max} можно увеличить, например, если нужно рассмотреть искусственное вмешательство в процесс воспроизводства рыб – выпуск партий молоди, но делить кадр на слишком большое количество субинтервалов не имеет смысла. Мелкое разбиение отрезков времени только усложнит вычисления. Стадия жизни, соответствующая форме правой части уравнения убыли, должна быть достаточно длительной, и мы говорим об эколого-физиологических этапах развития. Только дискретные перемены в моменты смены последовательных кадров будут видны внешнему наблюдателю при анализе сценариев.

Цель созданной формализации времени – точно вводить элементы событийности при управлении. Кортеж $\langle t_1, t_2, t_i \rangle$ укажем из расчетов полностью непрерывных дополнительных переменных. Не всегда время с субинтервалами плавающей длины из-за вычисляемых событий нужно форматировать в фиксированные кадры. Событийность можно вводить и без установки кадра, как в физических задачах с релейными переключениями. Идея манипуляций с представлением времени в форме множества кортежей обусловлена тем, что вычислительная модель учитывает прерывистость стадий формирования поколения и формируется на основе динамически переопределяемой системы.

2.3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТАДИЙНОСТИ РАЗВИТИЯ ПОПУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР

Гибридные модели и автоматные формализации с условными переключениями применялись для некоторых физических процессов и технических систем с релейным управлением. Например, в работе В.В. Михайлова [133] для дискретного переключения управления движением шагающей машины с целью обеспечения режима походки с последовательной сменой фаз непрерывного движения. Рассмотренный формализм автомата с гибридной формализацией времени актуален для многих задач математической биологии. В том числе модели, задающие последовательности связанных по начальным условиям решений, интересны для описания многих нестационарных популяционных процессов, не только протекающих с внешним воздействием, но и резко изменяющихся по внутренним принципам регуляции. При образовании популяции чужеродного вида в новом ареале после

вселения происходит первоначальная адаптация до перехода к интенсивному размножению. В популяционной экологии известно, что регуляция воспроизводства при малой и большой численности существенно отличаются. При малочисленном состоянии у рыб снижается вероятность образования нерестовых пар [134]. У социальных животных падает успешность коллективной защиты потомства. При высокой плотности начинают действовать негативные факторы внутривидовой конкуренции и распространения эпизоотий. Этот аспект особенно актуален при исследовании инвазионных процессов, когда на первом этапе сопротивление биотического окружения минимально, но впоследствии противодействие может резко усиливаться. Соответственно, подобные состояния необходимо моделировать с меняющимися функциями, описывающими эффективность воспроизводства и выживаемости при разных состояниях популяции и среды.

Другой важный фактор прерывистости трендов экодинамики – выраженная стадийность онтогенеза у многих видов животных. При смене стадий развития последовательно меняются характеристики организма в трофической цепи биосистемы. Ранее мы обсуждали важность интервала уязвимости в раннем онтогенезе на примере модели воспроизводства – теории зависимости «запаса и пополнения», которая была предложена У. Рикером и формализована в форме унимодальной функции. Однако, в модели у Рикера $f(x) = axe^{-bx}$ всего два абстрактных параметра (где a бифуркационный). Длина промежутка времени самого интервала уязвимости модель не включает, как и аналогичные функциональные зависимости. Однако, для разных биологических видов этот интервал времени существенно различается [135]. Более того, интервал времени при котором действуют специфические ювенильные факторы смертности может варьироваться в зависимости от текущих условий, от обеспеченности питанием [136]. Таким образом, интервал времени с наибольшей уязвимостью по отношению к внешним факторам, это значимая и варьирующаяся у разных поколений характеристика. Этот растягивающийся интервал значительно влияет на итоговое формирование половозрелой генерации. Для целенаправленного моделирования эффективности воспроизводства необходимо расширение набора параметров. Дополнение набора параметров приведёт в том числе к расширению свойств модели при образовании эффектов нелинейной динамики, которые обсудили в главе I. Очевидное решение задачи – представить динамику убыли непрерывной на последовательных смежных интервалах, что будет актуальным не только для прогнозирования пополнения запасов рыб.

Необходимую для анализа сценариев коллапса запасов модельную зависимость связи поколений можно представить в форме гибридной системы. Непрерывное изменение численности поколения будем описывать дифференциальным уравнением от начальной $N(0)$ генерации, вычисляя на конце промежутка времени «гибридного кадра» число особей $N(T)$, которые доживают до следующего момента размножения и пополняют нерестовый запас S , *часто состоящий из набора возрастных групп (не обязательно смежных)*.

2.3.1. Модель динамики численности поколений в условиях конкуренции на последовательности непрерывных интервалов

Используем дифференциальное уравнение уменьшения исходной численности нового поколения (считая от стадии икры рыб или яиц насекомых) с двумя различными по смыслу коэффициентами убыли: α, β . Включим в правую часть коэффициент компенсационной смертности α при начальном значении $N(0)$ и получим модель, где начальная численность определит выживаемость:

$$\frac{dN}{dt} = -(\alpha N(0) + \beta)N(t), \quad t \in [0, T]. \quad (2.4)$$

Теория о действии факторов смертности в зависимости от плотности исходного поколения разработана в работах канадского ихтиолога Ф. Нива [137]. Согласно классификации Ф. Нива, действующие факторы смертности молоди разграничиваются на компенсационные (усиливаются с увеличением плотности поколения из-за быстреего истощения ресурсов), декомпенсационные (усиливаются при низкой плотности, когда снижается вероятность образования нерестовых пар) и нейтральные, не зависящие от плотности. Для рассматриваемой задачи анализа динамики популяций в различных состояниях при большой и при малой численности после промыслового истощения запасов логично использовать два отдельных показателя мгновенной убыли численности.

В (2.4) исходная численность $N(0)$ непосредственно влияет на убыль поколения. Такое действие является весьма специфическим, но биологически обоснованным случаем в ряде ситуаций ограниченности ресурсов или активного противоборства паразитов. При недостатке кислорода начавшаяся гибель икры в больших нерестовых кладках ведет к массовой смертности и ухудшению условий для выживаемости. Реакция ос-паразитов часто бывает обусловлена плотностью скопления яиц насекомых жертв, легко доступных для обнаружения.

Уравнение (2.4) с коэффициентами убыли α, β проинтегрируем с помощью метода разделения переменных:

$$\int_{N(0)}^N \frac{dN}{-(\alpha N(0) + \beta)N(t)} = \int_0^t dt, \ln \frac{N(0)}{N(t)} = t(\alpha N(0) + \beta).$$

Таким несложным путем получим зависимость от начальной численности: $N(t) = N(0) / e^{t(\alpha N(0) + \beta)}$. Связывая начальные условия уравнения (2.4) через среднюю популяционную плодовитость λ с величиной родительского предшествующего поколения S , выразим на фиксированном интервале времени величину новой репродуктивной генерации – поколения потомков:

$$f(S) = \lambda S / \exp(T(\alpha\lambda S + \beta)).$$

Полученная из непрерывного уравнения зависимость определит куполообразную кривую, асимптотически приближающуюся к оси абсцисс: $\lim_{S \rightarrow \infty} f(S) = 0$. Обобщим включенные в модель параметры: $b = \alpha\lambda T < 1$. Функция $f(S) = aSe^{-bS}$ имеет единственный экстремум – максимум:

$$f'(S) = ae^{-bS}(1 - bS), S_{\max} = 1/b.$$

Значение функции в данной точке устанавливается:

$$f(S_{\max}) = \frac{a}{be}.$$

Функция относится к классу S-унимодальных функций, для которых выполняются условия теоремы Синджера.

Таким образом, получена фактически повторяющую модель Рикера функция, но с расширенным набором параметров, имеющих непосредственный биологический смысл. Включили среднюю плодовитость нерестового запаса и продолжительность того времени, когда действуют факторы ювенильные смертности на ранних личиночных стадиях, что актуально и для насекомых.

Включение в (2.4) $N(0)$ начальной группы как фактора убыли, во-первых, специфический случай. Во-вторых, может действовать только на самой ранней стадии развития (в кладке икры), в дальнейшем развитии поколения не актуален. Особенность размножения лососевых рыб в том, что при ограниченности русловых нерестилищ малых рек сделанные ранние нерестовые кладки икры просто уничтожаются при их переполнении и избытке пришедших в реки производителей [138]. В отдельные годы так гибнет до 30% исходной икры [139]. Данное включение $N(0)$ будет актуально и для модели поколений насекомых, кладки яиц которых подвергаются атакам специфических паразитов.

Логично, что факторы убыли изменяются при прохождении стадий развития, что логично приводит к идее формирования гибридной системы. Целью формирования гибридной модели будет не просто исправление недостатков известных моделей (Рикера, Шепарда, Кушинга, Т. И. Булгаковой).

Нашей задачей на данном этапе является создание метода получения гибкой трансформируемой модели эффективности воспроизводства. Уравнения, используемые для описания динамики численности для некоторых из промежуточных стадий развития, можно будет модифицировать из нескольких вариантов, как и варьировать количество самих уравнений в модели. Метод построения модели будет гибким и адаптируемым.

Итоговая цель построения уравнений – сформировать вычислительную структуру из нескольких последовательно решаемых «склеенных» задач

Коши, где отдельные уравнения динамики численности на интервалах гибридного времени будут предикативно модифицируемыми из нескольких вариантов с целью рассмотрения специфики рассматриваемой конкретной ситуации.

Включение в модель повторного нереста рыб приведет к формированию вектор-столбца \bar{s} размножающихся i поколений и расчету начальных условий:

$$N(0) = \lambda_1 S_1 + \dots + \lambda_r S_r.$$

Структура организации вычислений будет применима ко многим видам с выраженной стадийностью развития и неперекрывающимися поколениями, испытывающими большую убыль на ранних стадиях онтогенеза.

Построение гибридных структур актуально не только для стадий развития и смены поколений у рыб. Стадийность свойство многих биосистемных процессов. Моделирование на интервалах времени применимо и для анализа динамики фаз иммунного ответа, имеющего фазы активации эффекторных клеток и ослабления – убыли исходной генерации активированных клеток Т-лимфоцитов CD8+.

2.3.2. Непрерывно-дискретная модель воспроизводства при взаимосвязи выживаемости поколений с показателем размерного развития

Мы развиваем модели математической биологии путем последовательного совершенствования, и усложнения включаемых аспектов. В первых версиях модели (без включения событийности и стадий развития) рассмотрим формирование поколений анадромных рыб на основе модели связи темпов роста и выживаемости молоди до вступления особей в репродуктивный возраст:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\alpha w(t)N(t) + \beta)N(t) \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N^k(t) + \zeta}, \quad k < 1, \\ S = N(T), w(0) = w_0, N(0) = \lambda S, t \in [0, T]. \end{cases} \quad (2.5)$$

где: S – величина исходного нерестового запаса – предыдущего поколения, либо суммы нерестовых частей существующих поколений; $w(t)$ – отражает уровень размерного развития особей поколения. Этот уровень имеет двойное влияние, с одной стороны его повышение способствует избеганию хищничества. С другой стороны, этот показатель влияет на увеличение пищевых потребностей; g – статичный тут параметр, учитывающий ограниченность исходного количества доступных для молоди кормовых

объектов. z – параметр, учитывающий ограничение темпов развития, не зависящее от численности; λ – средняя плодовитость особей; α – коэффициент компенсационной смертности; β – коэффициент декомпенсационной смертности; $I[0, T]$ интервал уязвимости, когда на поколение действуют специфические ювенильные факторы смертности.

Многие методы оценки запасов (как методика ВРА) подразумевали экспоненциальный гладкий характер убыли численности поколений, однако, есть много примеров, когда зависимость в форме $N(t)=ke^{-f(t)}$ убыли от времени заведомо не выполняется, и имеет по меньшей мере точки перегиба. Большинство реальных кривых выживаемости промысловых видов представляются S -образной или ступенчатой, часто кусочно-гладкой кривой зависимости убыли от времени, согласно работам В.П. Тюрина [140] такие кривые для крупных рыб имеют некоторое «плато». Плавная экспоненциальная убыль возникает, когда гибель объектов полностью случайна, что наблюдается не в экодинамике, но в статистике выхода из строя электрических лампочек.

Гибель икры и личинок у рыб или крабов очень велика, даже у хищных и крупных видов. Убыль достигает максимума в момент полной резорбции желточного мешка перехода на особей поколения активное питание. Окончание интервала уязвимости мы будем связывать с вступлением поколения в репродуктивный возраст. Естественная смертность рыб и крабов при половом созревании и перед нерестом минимизируется (но резко возрастает промысловая, особенно если главная ценность икра). У подавляющего числа короткоциклового видов рыб велика именно «посленерестовая смертность» [141], так что для лососевых видов многовозрастной запас не актуален, но значим для осетровых.

Фактор изменчивой по стадиям ювенильной смертности определит динамику половозрелого поколения согласно разработанной модели (2.5). Аналогично модель применима для динамики насекомых-вредителей, большинство которых размножаются однократно, но среда поколений различна.

Многие виды и рыб и крабов при достижении определенных размеров становятся недоступны для хищников, являясь высшим звеном в трофической цепи своего сообщества, как осетровые рыбы [100]. При существенном снижении величины запаса S резко сокращается эффективность воспроизводства, что было установлено для популяций волжской севрюги и русского осетра [142], что требует дополнительного описания нелинейных эффектов в базовой модели (2.5).

Выписанная базовая модель (2.5), численно решаемая для допустимого диапазона начальных условий, определяется зависимость «запаса и пополнения» с ненулевой горизонтальной асимптотой рис. 2.5 и с пологой нисходящей ветвью.

Таким образом, предложенная и обоснованная наша предварительная модель (2.5) уже способна преодолевать недостатки, присущие нелинейным функциям и Рикера и Шепарда. Модель отличается по качественным свойствам, прежде всего из-за возникающих нелинейных эффектов для функциональных итераций. В итерациях не возникают ряд избыточных для

экологической проблематики эффектов, связанных с хаотизацией и окнами периодичности.

Модель (2.5) – это основа для дальнейшего развития методики формирования гибридных структур в задачах регулируемой экодинамики.

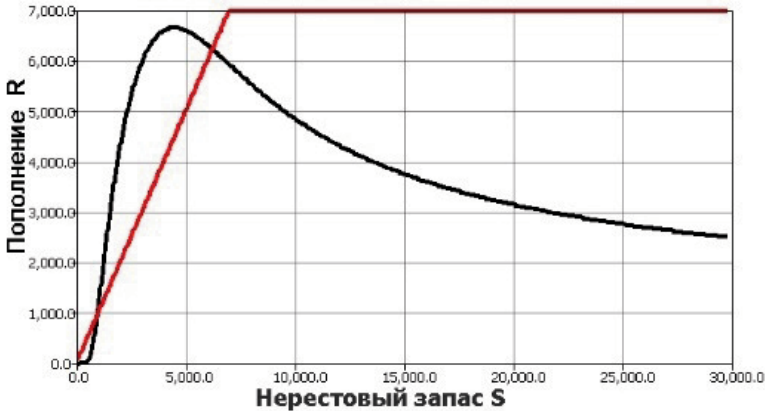


Рис. 2.5. Модельная зависимость, полученная с использованием (2.5)

Получена с применением численного решения (2.5) унимодальная зависимость с двумя точками перегиба, что нарушает условие теоремы Синджера о всюду отрицательном значении шварциана. По сравнению с моделью Рикера, полученная зависимость более обоснована, так как у модели Рикера есть странное с точки зрения экологии популяций свойство, когда при малой численности исходного нерестового запаса функция в виде:

$$R = f(S) = aSe^{-bS}$$

предсказывает увеличение эффективности воспроизводства. При стремящемся к нулю количестве нерестующих самок (и отложенной ими икры), выживаемость пополнения стремится к наибольшему возможному значению выживаемости:

$$\frac{dR}{dS} = a \exp(-bS)(1 - bS), \quad \lim_{S \rightarrow 0} a \exp(-bS)(1 - bS) = a.$$

Развитие непрерывно-дискретной модели (2.5) с вычислениями на интервале уязвимости итогового поколения используем как оператор эволюции для получения динамики функциональных итераций, описывающих сценарии.

Модель актуальна для корректировки свойств известных зависимостей, так как каскад бифуркаций в данном случае не будет бесконечным. Модель (2.5) задает зависимость с одним максимумом, но достаточно общего вида и не учитывает пороговые эффекты, потому требует дальнейшего совершен-

ствования. Для решаемых в настоящей работе задач необходимо дополнять модель. Цель модификаций – сделать основные характеристики зависимости трансформируемыми применительно к ситуативным аспектам.

В предложенной реализации каркасной версии гибридной модели (2.5) используется явное кадрирование и непрерывно-дискретное время без предикатов и событий. Требуемых для описания нелинейных сценариев с управлением свойств динамической системы можно добиться, используя изменяющуюся форму правой части уравнения. Схему изменений удобно алгоритмически реализовать в инструментальной среде используя гибридное *событийное* время, соотнеся события с порядком перестроений в правой части модели – каждой стадии процесса поставлено в соответствие свои параметры и форма моделирующего уравнения. Для каждой стадии развития действуют новые факторы выживаемости и изменяется степень влияния ранее главенствовавших, в том числе возникает механизм последствия из-за истощения пищевых ресурсов, если прошлая стадия жизненного цикла была многочисленной.

2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СМЕНЫ ПОКОЛЕНИЙ ПОПУЛЯЦИЙ ПРЕДИКАТИВНО ПЕРЕОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

Необходимо определить правила изменений и критерии завершения активности стадий моделируемого процесса с целью построения вычислительной модели, описывающей при развитии качественные трансформации, возникающие в анализируемом примере из-за стадийности в ювенильном онтогенезе. Разработаем метод организации предикативно переопределяемой вычислительной структуры. Определим для базовой модели (2.5) три последовательных режима изменения состояния для поколения в границах кадра от начальной $N(0)$ до момента начала размножения нового поколения $N(T)$.

Оптимально рассмотрение в вычислительных моделях трех эколого-физиологических стадий формирования половозрелого организма на основе выбора необходимой правой части. Столько их существует у насекомых с неполным циклом развития. У насекомых с полным циклом четыре стадии, но стадия куколки экологически неактивна – не вступает во взаимодействие с ресурсами среды, потому эту стадию можно объединить со стадией имаго.

Необходимо ориентироваться на физиологическое развитие моделируемого вида биоресурсов. Физиологи выделяют у разных видов рыб больше стадий в личиночном развитии, потому необходимо выбирать только важнейшие трансформации в эколого-физиологическом развитии. Нужно включать факторы, явно влияющие на факторы убыли поколения. Возможно включение явной динамики конкурирующего вида-хищника. При расширении структуры определим, что при дальнейшем усложнении прибавит модели новых возможностей, а какие варианты только повлекут дополнительные трудности при согласовании значений параметров уравнений.

Расширение числа уравнений увеличит и набор условий завершения активности для всех форм правых частей уравнения динамики поколения, рассчитываемых численными алгоритмами после определения новых начальных условий. В вычислительной среде в итоге решаются три краевые задачи. Большее число параметров не означает большая точность модели и этот аспект часто упускают начинающие исследователи. Большее число параметров не означает большая точность модели, так эти числовые коэффициенты нельзя взять из инженерных справочников. Моделирование в биофизике и инженерных задачах отличается по многим принципиальным моментам и параметрическая настройка один из важных моментов. Многие крупномасштабные биосистемные модели были выписаны в форме систем уравнений, но не были настроены.

Многие параметры будут определены со значительной погрешностью, потому автор практикует принцип моделирования биосистем: *минимизация параметров при максимизации описательных возможностей*. Требуемой максимизации мы достигнем за счет нелинейных эффектов, число которых и так ограничено. Даже при одном управляющем параметре можно получить очень сложное качественное поведение даже в маломерном фазовом пространстве. Можно дополнить число параметров, но они не вызовут новых бифуркационных изменений. Увеличение размерности фазового пространства всегда непредсказуемо для обсуждения результатов.

2.4.1. Критерии выбора форм правой части уравнений для описания динамики поколений

Изменения в развитии процессов объясняются различными причинами. Представляемые в модели изменения по своему сущностному генезису бывают строго обязательными, алгоритмически предопределенными во времени, либо необязательными и следствиями действий иных процессов. Выбор альтернативного уравнения в модели проводится при особом соотношении рассчитываемых величин и проверки выполнения условий по отсчетам времени.

Прерывистость – превалирующее свойство в развитии биосистем. Важная идея предлагаемого для анализа процессов метода – формализация событийности изменений, применимая к разным биологическим процессам. В вычислительной среде с поддержкой алгоритмического языка программирования из оценки состояния множества предикатов P_i будем устанавливать события, за которыми следуют изменения в процедуре расчета уравнений для популяции.

Для отражающей биологическую прерывистость модели мы предлагаем вычислительную структуру с последовательными переопределяемыми формами, но сохраняющими общие связи. Уравнения не должны изменяться полностью. Структуру с двумя показателями убыли целесообразно сохранять, но вполне логично изменять роль показателя размерного развития в динамике убыли.

Значение $N(t)$ в каждом кадре проходит изменение от $N(0)=\lambda S$ и до $N(T)$, где λ – средняя за 5 предшествующих сезонов плодовитость. Система формализуется дифференциальным уравнением с набором возможных «сменных форм» для правой части и дополнительно с набором предикатов для смены режима расчетов. Мы используем функции $P(x,y)$ с множеством значений $\{0;1\}$, которые подчиняются правилам булевой алгебры. Предикат задан математическим отношением изменяющихся непрерывно аргументов и требует проверки на каждом шаге численного интегрирования. Предикаты по умолчанию при t_0 $P(x,y)=1$, но обязательно должны будут при t^i принимать значение $P(x,y)=0$ от состояния своих аргументов (либо наоборот изменять значение с 0). Аргументы n -местного предиката $P(x,y,\dots)$ в нашем методе будут в том числе переменными из вспомогательных, но связанных с динамикой $N(t)$ вычисляемых синхронно уравнений. В дальнейшем подход приведет к расширению модели без изменения базовой предикативно переопределяемой структуры за счет включения дополнительных вспомогательных уравнений, которые рассчитывают сопутствующие характеристики. Например, так можно учесть важный сопутствующий фактор – израсходование и возобновление кормовых ресурсов.

Биофизически интервал кадра трактуем как стандартное время жизни поколения до начала репродуктивной активности, но это время не обязательно задавать одинаково у смежных поколений. Пронумерованные точки событий в интервале ювенального онтогенеза будут онтогенетически «прерываниями». Метод имеет перспективы в иммунологической и в эпидемический трактовке.

2.4.2. Формирование базовой переопределяемой вычислительной структуры с гибридным временем

Сопоставим метаморфозы с уравнениями в правой части для убыли численности поколения от $N(0)$, которое неравномерно на трех основных стадиях раннего онтогенетического развития. Система описывается дифференциальным уравнением с набором из трех возможных форм темпов убыли и дополнительно множеством предикатов для моментов смены режима расчетов правой части.

Представим гибридную модель с неспецифичными обобщенными тремя стадиями онтогенеза на объединенном интервале:

$$t \in [0, T] \subset \bigcup_i \{[0, t_1, t_i, t_{i+1}, T]\}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.6).$$

Используем уравнение с включением запаздывания для старшей стадии развития. Включение отклоняющегося аргумента предназначено для распространенной ситуации регуляции с последствием, когда на текущую смертность влияет исчерпание жизненных ресурсов особями в некоторый момент в прошлом. Базовый вариант переопределяемой структуры сформируем в общем виде с предикатами и запаздыванием так:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \beta)N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t - \xi)N(t - \xi) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = F(N(t)) \end{cases} \quad (2.7)$$

В переопределяемой структуре при использовании гибридного времени включены различно трактуемые мгновенные коэффициенты ювенильной смертности, действующие в зависимости от плотности исходной генерации. Параметры формируют убывающую последовательность: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

Таким образом в модели учитываем компенсационную смертность (сильно зависимую от плотности), убывающую по мере прохождения поколением эколого-физиологических стадий развития. β – *депенсационный* коэффициент смертности (*depensatory mortality*) по факторам, не связанным с плотностью. Мы сохраняем значение β в двух первых вариантах правой части.

Так как структура с переопределяемой правой частью описывает изменяющуюся убыль по мере взросления поколения, то удобно для организации расчетов и экологически логично, если используемые коэффициенты убыли составят убывающую прогрессию:

$$\alpha_3 = \rho^2 \alpha_1, \rho < 1.$$

Используется фиксированная длительность первой стадии развития как время τ , что биологически обосновано.

2.5. ФОРМАЛИЗМ ГИБРИДНОГО АВТОМАТА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АНАЛИЗУ СОБЫТИЙНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОПУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

Используем средство представления, позволяющее нам существенно облегчить формирование переопределяемой гибридной модельной структуры.

Следуя идеям работы профессора Ю.Б. Сениченкова [130], определим гибридную систему как математический объект:

$$H = \{s, f(s), g(s), S_0, pred(t, s(\Gamma)), Inv(t, s(\Gamma)), Init(s(\Gamma))\},$$

где $s \in \mathfrak{R}^n$ - вектор переменных состояния размерности n , но мы можем для своей задачи исходя из условий ограничить $n=2$. Пусть $f(s), g(s) \in \mathfrak{R}^n$ – правая часть моделирующего процесс алгебро-дифференциального уравнения, которое в общем виде мы записываем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{ds_1}{dt} &= f(t, s_1, s_2), \\ 0 &= g(t, s_1, s_2) \\ s &= \{s_1, s_2\}; \quad s(0) = s_0 \in S_0, \quad t \in [0, \infty). \end{aligned} \quad (2.3).$$

Положим, что (2.3) удовлетворяет критериям существования и единственность решения $s(t)$ на конечном интервале времени. Составляющие вектора S_1, S_2 во многих работах называют дифференциальной и соответственно алгебраической компонентами решения. Зададим S_0 – множество начальных условий, которое включает в себя все начальные условия, порождаемые функций инициализации и при вычислительном исследовании гибридной системы; определение включает логику переключений: $pred(t, s(t)) : \mathcal{R}^1 \times \mathcal{R}^n \rightarrow \{false, true\}$ – булевская функция, определенная на решениях алгебро-дифференциального уравнения. Цель функции – выделять особые состояния как события, приводящие к смене поведения гибридной системы. Дополнительная булевская функция в форме:

$$Inv(t, s(t)) : \mathcal{R}^1 \times \mathcal{R}^n \rightarrow \{false, true\}$$

тут определяет свойства решения на соответствие критериям. Важная для вычислений $Init(s(t)) : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^n$ вещественная функция инструментальной среды, ставящая в соответствие значению решения в правой, конечной точке t_+^* текущего промежутка интегрирования значение новых начальных условий на новом временном промежутке в его левой, начальной точке:

$$t_+^* : s(t_+^*) = Init(s(t_-^*)) .$$

Пусть Γ – определенный нами в (2.2) формат гибридного иерархического времени – ряда событий на последовательно заданных отрезках времени. Исходя из потребностей области применения моделей при регулируемой эксплуатации биоресурсов автором введены два уровня дискретности – нужно учитывать разные по генезису события изменений и внешние (управляемые) и внутренние (биосистемные) и эндогенные перестроения. Целесообразно использовать графическое сопоставление возможных режимов поведения системы и схему переключений между ними. В таком случае удобно использовать графовое представление: в вершинах для непрерывно меняющихся состояний. Вершины графа соединены ребрами, которые отображают возможное множество переходов между режимами, которые вносят изменение в протекание процесса и создают карту переходов гибридной системы.

Гибридный автомат является расширением формализма «таймированного автомата». Согласно общепринятому определению, графическое представление гибридной системы «Гибридный автомат» включает конечное

множество состояний, с каждым из которых связана правая часть системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка, и множество переходов между состояниями. Каждому переходу (дуге графа) в работе автора поставлены в соответствие условие завершения активности и функция инициализации новых начальных условий.

Следуя основам в работе [143], определим гибридный автомат G_H для задач экодинамики с некоторым дополнительным введенным онтогенетическим уточнением следующим образом:

Определение 2.1. Кортеж из элементов $G_H=(Q, X, \text{Init}, f, \text{Inv}, E_1, E_2, G, R)$, где Q – конечное множество дискретных переменных. X – множество непрерывных переменных. $\text{Init} \subseteq Q \times X$ - множество начальных состояний. Представим, что

$$f : Q \times X \rightarrow X$$

это функция, являющаяся правой частью системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно $x \in X$, но зависящая от дискретных переменных. Введем множество:

$$\text{Inv} : Q \rightarrow 2^X$$

как набор инвариантов, связанных с каждым значением переменной $u \in Q$.

Введем $E_1 \subset Q \times Q$ как множество дискретных условных (предикативных) переходов. E_2 – множество обязательных безусловных переходов (наше дополнение в определении – разделение типов переходов). $G : E_1 \rightarrow 2^X$ – множество предикатов, присвоенных каждому переходу:

$$e = (q, q') \in E.$$

Тогда множество правил переопределения начальных условий зададим так:

$$R : E \times X \rightarrow 2^X.$$

Правила заданы на каждой дуге для непрерывных переменных:

$$e = (q, q') \in E.$$

В данном определении переменные гибридной системы $x \in X$ называются непрерывными, так как они являются решением дифференциальных уравнений, а переменные $u \in Q$ – дискретными. Именно это множество переменных определяет конечное множество режимов работы – состояний автомата. Под состоянием гибридного автомата G_H понимается пара:

$$(u, x) \in \mathbf{Q} \times \mathbf{X}.$$

Примем по умолчанию, что правая часть дифференциальных уравнений в разрабатываемой модели удовлетворяет условиям Липшица.

В данное известное определение автомата мы внесли модификацию для адаптации к особенностям решаемой биологической задачи – мы разделили множество переходов на предикативные и безусловные, которые будут выполняться в любом случае. Это необходимо для нас уточнение, так как при любых обстоятельствах жизненный цикл конечен и необходимо переходить к расчетам динамики численности следующего поколения популяции. На рис 2.2 показан простой гибридный автомат с одним выполняемым переходом.

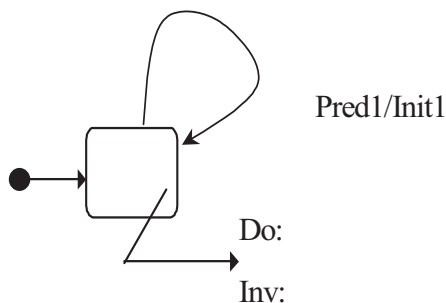


Рис. 2.2. Простой гибридный автомат с одним длительным состоянием

На рисунке дуга, закругленная стрелка с поставленным в соответствие условием $Pred1$ и функцией инициализации $Init1$, указывает на новое длительное состояние. В это состояние переходит автомат, после возникновения особых выделенных условиями событий, приводящих к смене поведения в гибридной системе элементы последовательности решений базового дифференциального уравнения «отделены» друг от друга событиями, которые будут описаны нами предикатами, определенными на решении уравнений:

$$pred(t, s(t)).$$

Такие события мы будем называть событиями, приводящими к смене поведения по предикатам – условиям смены поведения системы. При численном исследовании гибридных систем при проверке истинности предикатов осуществляют выбор новых начальных условий на новом временном промежутке. Такой выбор в левой, начальной точке t_+^* может зависеть от значения решения в правой, конечной точке t_-^* предыдущего промежутка – перед событием. Используем функцию реинициализации $Init$:

$$s(t_+^*) = Init(s(t_-^*)) .$$

С помощью функцию реинициализации зададим новые начальные условия. Для биологических задач необходима проверка сохранения положительности решением на всех временных промежутках.

Событиями будем считать любые специальным образом выделенные состояния в фазовом пространстве, для графа используется особая метка. Формально событиями в фазовом пространстве назовем пару:

$$\langle t^* \in \Gamma_i, s(t^*) \rangle.$$

Как первую координату соотнесем с временем наступления события, а вторую определим как сущностью события. Каждому событию можно сопоставить флаг, – булевскую функцию на решении, принимающую значение *true* только на моменте события, и *false* на всех остальных точках фазового пространства:

$$flag(s(t^*), s(s_0; t)) = \begin{cases} true & s(t^*) = s(s_0; t) \\ false & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Траектория гибридной системы – последовательность решений заданного уравнения (2.3). Технически, нужно говорить о двух проекциях: траектории гибридной системы на вещественную ось, и о проекции траектории на гибридное время, которая выглядит как разрывная однозначная функция на рис. 2.3. Для наших вычислительных сценариев при управляемой эксплуатации биоресурсов важным будет оценка положения траектории в конечных точках кадров, непрерывная составляющая траектории останется для внутренних расчетов.

С помощью техники создания гибридного автомата можно моделировать «чисто дискретные» динамические системы с дискретным, так и «чисто непрерывные» с непрерывным временем. Действительно, если исследуемая система входит в новое состояние и мгновенно его покидает (предикат, позволяющий покинуть состояние, становится истинным уже в начальной точке), гибридный автомат ведет себя как обычная карта состояний, являющаяся стандартной формой задания дискретного поведения в языке UML.

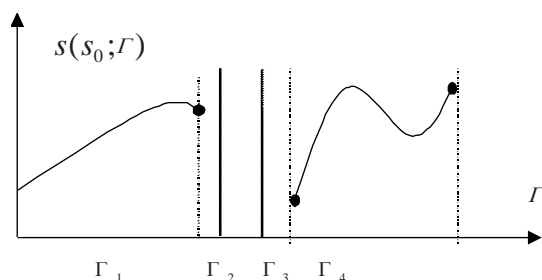


Рис. 2.3. Проекция траектории гибридной системы на гибридное время

При численном исследовании гибридных систем могут возникать некоторые сложности, как бесконечное срабатывание перехода, когда гибридный автомат начинает демонстрировать только дискретные свойства, или остановка движения – вырождение гибридного времени с уменьшением непрерывных интервалов – «эффект Зенона». Для предотвращения таких явлений используют специальные алгоритмы, описанные в цитируемых статьях и в докторской работе Ю.Б. Сениченкова. Известный «Эффект Зенона» в нашей формализации времени (2.2) устраняется в Γ жестким кадрированием. Длина времени кадра времени может быть плавающей в модели, но при этом оставаться ограниченной величиной.

Метод применения гибридных автоматов при моделировании обладает возможностью расширения и анализа взаимодействия композиции автоматов, которые могут описывать параллельно протекающие взаимодействующие процессы с трансформациями и переключениями. В работе [130] введено определение для композиции гибридных автоматов: $G_{H1} \parallel G_{H2}$ таким образом:

$$G_{H1} = \{f_1(t, s_1^1, s_2^1), g_1(t, s_1^1, s_2^1), S_{01}, pred_1(t, s^1), Inv_1(t, s^1), Init_1(t, s^1)\},$$

$$G_{H2} = \{f_2(t, s_1^2, s_2^2), g_2(t, s_1^2, s_2^2), S_{02}, pred_2(t, s^2), Inv_2(t, s^2), Init_2(t, s^2)\}.$$

При создании новой программной композиции автоматов возникает необходимость в доопределении функций инициализации из-за потребности синхронизации исходных автоматов и, следовательно, переходу к единому для них гибридному времени. На рис. 2.4. показана схема построения обобщённого гибридного времени для композиции двух простых гибридных автоматов.

Схему с совместными событиями применим для взаимосвязанного моделирования перестраивающихся по ходу течения времени биосистемных процессов: онтогенетического стадийного развития и физиологического роста. Способ применим к другим биологическим явлениям. Актуальной областью применения метода гибридных автоматов представляется варибельная цепочка процессов при запуске иммунной активации после презентации антигена. Иммунный ответ очень индивидуален.

В модели сценариев воспользуемся организацией композиции автоматов в предложенной модификации при анализе взаимосвязанных биологических процессов со стадийными изменениями: скорости роста организмов и динамики изменения численности поколения, которая связана с достижением стадий развития. Достижение успешных переходов на следующую стадию в свою очередь обусловлено темпами роста особей и обеспеченностью организмов пищевыми ресурсами. Темпы роста в раннем онтогенезе рыб значительно различаются между стадиями, так как спектр питания молодых организмов быстро расширяется, но при этом существует критическая стадия – момент полного завершения эндогенного питания. Далее организм

должен добывать питание в конкурентной борьбе. Обеспеченность пищей и кислородом именно в это короткое значимое время перехода к активному образу жизни важнейший фактор выживаемости и формирования нового поколения.

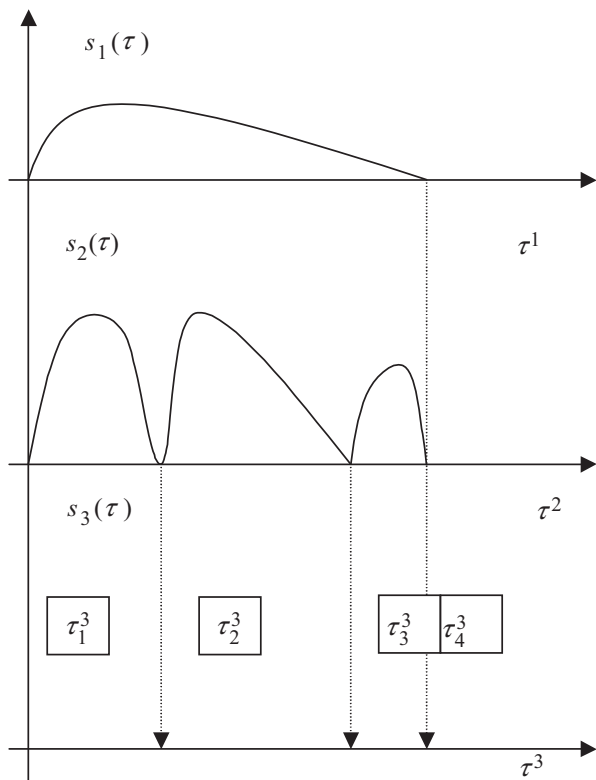


Рис. 2.4. Обобщение гибридного времени для двух автоматов по [130]

В биосистемах много параллельно развивающихся, но взаимосвязанных процессов, потому предложенная методика имеет перспективы расширения для разных задач моделирования и анализа трансформаций биосистемных процессов.

Для рассматриваемой нами задачи существуют особенности применения гибридных автоматов, которые мы будем учитывать. В теории гибридных автоматов, моделирующих физические процессы, возможно превращение гибридной в классическую динамическую систему, при этом варианте не существует возможности получения значения *true* у обеспечивающего переход предиката. В альтернативном варианте вырождения происходит при заикливание с бесконечным срабатыванием перехода. Данные варианты поведения алгоритма для рассматриваемой нами задачи по самой ее популяционной сущности являются некорректными и должны быть исключены при проектировании, либо генерировать специальное сообщение об ошибке.

Дополнительное ограничение для нашей реализации гибридного автомата предполагает невозможность срабатывания одного перехода дважды подряд. Это ограничение достигается при использовании дополнительных логических переменных, закрывающих возможность срабатывания для перехода, если перед этим не был выполнен другой переход или не произошла реинициализация начальных условий для расчета развития нового поколения.

Таким образом, теория гибридных систем и формализм их представления на основе гибридных автоматов предоставляют наилучшие возможности для описания трансформирующихся процессов на *внутреннем уровне* описания функционирования биосистем. Далее необходимо представить гибридные модели для исследования сценариев в формате динамики функциональных итераций – они составят верхний *наблюдаемый* экспертами уровень описания процессов и возникновения нелинейных эффектов в динамике популяций.

2.5.1. Структура набора предикатов для переопределения правых частей уравнений

Вторая идея метода построения модели – по предикатам, не обязательно связанным с отсчетами единиц модельного времени, устанавливать события (например, смены стадий онтогенеза), за которыми следуют изменения формы правой части уравнений, которые описывают текущую численность поколения. $N(0)$ – максимальная численность поколения. Вместе с формами уравнений в (2.7) предикатами нами P_1, P_2, P_3 заданы биологически интерпретируемые моменты остановки расчетов каждой из форм правой части. Необходимые условия завершения активности формы правой части уравнения и получения промежуточных результатов зададим так:

$$P_1(-t < \tau), P_2(t \geq \tau, t \neq T, \neg w_i < w_k), P_3(t = T, w_i > w_k). \quad (2.8).$$

Два сопоставленных дугам гибридного автомата предиката в (2.8) мы записали с логическим отрицанием, так эти события станут возможными при нарушении соотношений. Расчет (2.7) с (2.8) происходит с алгоритмом цикла *while(P)* до тех пор, пока выполняется $P_i=1$. Предикаты должны однозначно и всегда t определять события переходов в кадре времени. Избегая неоднозначности, можем воспользоваться дополнительно логическими переменными-флагами, меняющими состояние с 1 на 0, если переход запрещен до тех пор, пока не будет выполнен другой переход – один переход гибридного автомата не может срабатывать дважды подряд. Унарный предикат P_i возвращает значение *true* после достижения возраста окончания первой жизненной стадии.

Запись непрерывно-событийного модельного 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. Внутри каждого кадра времени с начальной позицией t_0 имеются

«внутрикадровые» события, которые мы обозначили верхним индексом t^i . Использован переходный уровень развития w_k для выхода поколения из квадратично определенного уровня смертности. Для каждой формы правой части в момент события рассчитываются сопряженные с предшествующими расчетами начальные условия (и численности и показателя размерного развития). Набор условий, которые определяют события смены поведения нетрудно расширить, например, так рассмотреть в модели искусственное выращивание до стандартного веса и потом выпуск поколения рыб в естественную среду. Тогда жизнь поколения делится на два этапа в искусственной и в естественной среде. Предлагаемый метод предикативного переопределения уравнений или параметров применим для многих ситуаций в биологических процессах с различными этапами и меняющимися условиями.

Популяционные процессы даже без влияния промысла вариативны. В сценарном применении модели важна оценка текущих значений набора P_1, P_2, P_3 . Переходы в (2.8) можно разделить на три типа: только по отсчетам отрезков единиц времени t – назовём этот тип «таймированные переходы», как предикат P_1 – проверяющий достижение возраста перехода ко второй стадии развития. Второй тип более сложный – вычисляемый, изменение истинности предиката будет вызвано внутренними соотношениями у рассчитываемых показателей – с использованием уравнений. Тогда смена формы в (2.7) происходит после сравнения соотношения значений по (2.8) у внутренних модельных переменных – по динамике размерного развития $w(t)$, заданной некоторым законом $F(N(t))$. Предикат может включать проверку на истинность нескольких условий, что легко программируется для гибридного автомата в вычислительной среде пользователем, имеющим элементарные навыки записи условных операторов.

В некоторых случаях можно использовать иную специфичную для исследуемого биологического вида динамическую характеристику (например, нейрофизиологическое развитие и становление когнитивных функций особей, обучение охотничьим навыкам и коллективному поведению). Может быть актуально изменять, и варьировать коэффициенты уравнений в базовой структуре, исходя из необходимости решаемой задачи. Далее в следующей главе мы покажем применение структуры модели для анализа особых ситуаций в динамике и промысловых запасов рыб и вспышек насекомых вредителей леса.

2.5.2. Определение начальных условий для расчета динамики поколений и их корректировка для учета факторов среды

Для расчета динамики нового $n+1$ поколения происходит реинициализация начальных условий для первого в структуре (2.7) уравнения. Модель можно расширить для нескольких поколений и использовать в составе матричных моделей. В случае, когда родительский запас состоит из особей нескольких поколений, что актуально для долгоживущих гидробионтов (крупных рыб, крабов), то используются такие расчеты начальных условий на левом конце кадра:

$$N_{n+1}(0) = \lambda S_n, S_n = (N(T)_n + \sum_{m=1}^k v_m N(T)_{n-m}), N(0) \in \square, (2.9)$$

где v_m – показатель посленерестовой выживаемости для серии предшествующих m поколений, а S – как и в предыдущих моделях, численность готового к размножению запаса со средней плодовитостью λ . По очевидным причинам λ , S и, соответственно, $N(0)$ для расчета уравнений принадлежат подмножеству натуральных чисел, которое ограничено сверху историческим максимумом численности запаса. При промысловом изъятии q начальные условия для уравнения убывли численности:

$$N_{n+1}(0) = \lambda S_n (1 - q).$$

Структура гибридной системы предполагает методы ситуативной корректировки, например при инициализации гибридных автоматов. При определении начальных условий мы можем корректировать влияние внешних факторов на воспроизводство. Для многовозрастной популяции с несколькими нерестовыми циклами и не ежегодным нерестом можно учесть так:

$$N(0) = \frac{1}{\omega} \exp\left\{-\left(\frac{\Delta V}{\sigma}\right)^2\right\} \lambda \sum_i \omega_i S_i, \quad i \in \{11, 15, 17, 20\},$$

где S_i – численность нерестующих особей из возрастной группы i , тогда запас половозрелых производителей считаем:

$$S = \sum_i S_i, \quad \text{где указаны } i \in \{11, 15, 17, 20\}$$

как возраста массового созревания самок. w_i – средняя масса самки из данной возрастной группы (так считается, что количество икры пропорционально массе самки). Здесь ω учитывает возможное неравномерное гендерное распределение в половозрелой части популяции.

Введем поправку ΔV как отклонение от оптимального для воспроизводства значения важного гидрологического показателя, например, речного стока во время нереста анадромных рыб, σ – характеризует «интервал толерантности», что рассчитывают по данным многолетних наблюдений. Определение начальных условий для расчета поколений согласно идее метода может быть модифицировано исходя из необходимости учитывать специфические аспекты факторов среды для рассматриваемой ситуации.

В некоторых случаях ценные промысловые популяции после перелова начинают поддерживать выпуском партий искусственно выращенной молоди. Моделирование динамики популяционных процессов в ситуации организованного масштабного искусственного воспроизводства деградирующей популяции рыб являлось основной задачей дипломной работы автора.

Тогда проблема была рассмотрена нами на примере низкой эффективности выпуска заводской молоди волжской севрюги согласно данным мониторинга. Построена модель, показавшая, что методом масштабного искусственного выпуска можно получить только очень ограниченное приращение численности популяции, которое не компенсирует затраты на организацию рыбоводного процесса.

2.5.3. Включение вспомогательных уравнений для ситуативного расширения переопределяемой модели воспроизводства

Рассмотрим несколько вариантов способов, какими будем *модифицировать* базовую модель (2.7) для рассмотрения специфических биологических аспектов.

Третья идея метода – использование в модели косвенного влияния на выживаемость поколений динамики сопутствующих факторов. Так как изменения для двух реализаций перехода гибридного автомата предикативные, то необходимо использовать показатели, которые бы определяли такие переходы – рассчитывать некоторые связанные характеристики, и наиболее целесообразно совместно изменяющиеся величины по мере онтогенетического развития.

В разнообразных «вспомогательных» уравнениях и корректирующих решение основного уравнения убыли мы будем учитывать состояние биотического окружения и конкурентного противоборства за ограниченные пищевые ресурсы. В предложенном методе моделирования присутствие межвидового взаимодействия будет оказывать опосредованное, но значимое влияние на выживаемость поколения.

Идея разрывных вычислений на интервалах времени не исключает моделирования трофического взаимодействия непосредственно. Это можно реализовать двумя переопределяемыми гибридными структурами, описывающими динамику видов-конкурентов с важными онтогенетическими метаморфозами с фактором прямого давления как у Вольтерра. Учет прямого трофического взаимодействия возможно реализовать разработанным методом, что может быть актуальным для ряда хищных насекомых. Модификация для двух гибридных систем приведет к появлению в (2.7) факторов внешней убыли.

Моделирование динамики роста отдельная проблема математической биологии. Существуют модели асимптотического увеличения массы организмов, но они не очень подходят для организмов, у которых ранние стадии существенно отличаются от сформированной половозрелой особи. Мы должны учитывать, что темпы роста на ранних стадиях онтогенеза и динамика массы сформировавшегося организма происходят различно. Мы ввели показатель размерного развития поколения, который зависит от плотности, – при увеличении рост замедляется.

Важнейшим фактором является скорость роста для средней размерно-весовой группы особей поколения. От динамики роста зависит способность организмов гидробионтов (рыб, крабов) успешно избегать атак

хищников, но и пищевые потребности тоже увеличиваются при увеличении биомассы [144].

Использовать скорость роста как выражение:

$$w'(t) = v(N^{-1}(t))$$

в моделях пополнения как отдельный показатель развития молоди рыб, но взаимосвязанный с динамикой численности, предложено Е.А. Криксуновым и М.А. Снетковым [145] и именно в форме дифференциального уравнения убыли на интервале уязвимости,

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N(t)} \\ \frac{dN}{dt} = -f(N(t), w(t)), t \in [0, T], \end{cases} \quad (2.10)$$

где g – уровень обеспеченности кормовой базы молоди, который на небольшом интервале времени можно принять статичной величиной. На старших стадиях показатель развития замедляет темпы убыли поколения. Показатель скорости роста годится и для предиката завершения интервала уязвимости.

Прямая обратная зависимость в (2.10) выглядит нереалистично сильнодействующей. Степень в знаменателе у $N^k(t)$ должна быть меньше единицы. Мы целенаправленно модифицируем предложенный Е.А. Криксуновым метод моделирования воспроизводства рыб [146] с использованием двух уравнений. Расширим представление аспектов динамики показателя размерного развития для гибридной модели и получим гибко настраиваемую зависимость.

Предикативная структура набора правых частей (2.7) будет решаться численно во взаимосвязи со вспомогательным $w(t)$ – показателем среднего размерного развития особей поколения с поправочными коэффициентами:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{g}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}} + \chi_N, \quad (2.11)$$

где δ – корректирующий показатель, g – фиксировано отражает обилие пищевых ресурсов, но может быть и сезонной периодической зависимостью $g(t)$ или дополнительно рассчитываться собственной динамикой воспроизводства. Степень воздействия численности мы определили в знаменателе $-2/3$, но это может стать резервной настраиваемой характеристикой модели:

$$\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}.$$

Затрачиваемая на рост энергия у гидробионтов в северных широтах зависит от температуры [147]. В уравнение для большей биологической обоснованности введена $\chi_{\bar{N}} \in [-\varepsilon, \varepsilon]$ – поправка, связанная с температурой, может быть положительной или отрицательной. Для оптимальных условий нереста в (2.11) примем отсутствие воздействия: $\chi_{\bar{N}} = 0$. Таким образом, наличие доступной кормовой базы в нашей модели влияет на выживаемость в модели опосредовано.

Четвертая идея нашего метода в том, что многофункциональную популяционную модель должно быть удобно совершенствовать далее, так как разные ситуации кризисов или всплеск одной моделью не описываются. Многообразии зависимостей и функций регуляции одна из отмеченных многими специалистами проблем при управлении биоресурсами [148].

Модифицировать для анализа специфической ситуации модель наиболее удобно дополняя перечень учитываемых факторов, но не перестраивая базовую вычислительную структуру. В расширении модели (2.7) с множеством предикатов (2.8) и со вспомогательным уравнением (2.11). Показатель в числителе уравнения (2.11) можно задать при расширении модели динамически. Расширение потребует включение для $g(t)$ третьего уравнения. В случае, если из данных наблюдений установлено, что кормовая база пребывает в стационарном состоянии так, что выполняется:

$$\lim_{t \rightarrow T} g(t) = K,$$

то в зависимости от удобства настройки уравнения кибернетической саморегуляции на интервале $[0, T]$, можно применить уравнение для $g(t)$ с самой популярной квадратичной формой регуляции, выбрав начальные условия $g(0) = K/2$, где K емкость экологической ниши кормовых организмов достаточно велика (что выполняется для планктона или nekтона – используемых личинками при переходе на активное питание) в нормальных условиях среды:

$$\frac{dg}{dt} = rg(t) \left(1 - \frac{g(t)}{K} \right) - \zeta N(t). \quad (2.12)$$

Здесь r – репродуктивный параметр, сравнимый с коэффициентом потребления корма ζ ; K – равновесное значение численности, означающее емкость экологической ниши для данного вида, который используется в пищу.

2.5.4. Система уравнений для стадийного процесса с предикатами переопределения правых частей

С использованием разработанной формализации времени вычислительную гибридную структуру для расчета динамики поколения на интервале до вступления в репродуктивный возраст будут формировать наборы урав-

нений и предикатов. Выпишем гибридную модель в форме дополняемой предикативной системы для расчета динамики поколения с предикатами переключений и с двумя вспомогательными уравнениями, которые используются в предикатах:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \beta)N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t - \xi)N(t - \xi) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g(t)}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}} + \chi_N, w(0) = w_0 \\ \frac{dg}{dt} = rg(t) \left(1 - \frac{g(t)}{K} \right) - \zeta N(t), g(0) = g_0. \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Система (2.13) базовая для дальнейших модификаций. Динамика размерного развития аналогично может изменяться при прохождении стадий онтогенетического развития поколения. В третьей форме правой части можно ситуативным образом оставить только один параметр убыли:

$$-\alpha_3 w(t)N(t).$$

Наша методология описания изменений в биосистемах подразумевает вариативность частных деталей модели (условия различных ситуаций и жизненные циклы популяций видов специфичны), но при сохранении общей структуры с событийными переключениями. Например, можно использовать в первом уравнении убыли зависимость от смертности и от количества икры $N(0)$:

$$-(\alpha_1 w(t)N(0) + \beta)N(t).$$

Если рассматривается ситуация нереста лососевых рыб в небольших реках, где гибель икры непосредственно фактор большей смертности, но тогда во 2-й и 3-й форме декомпенсационные коэффициенты будут лишние, так как зависимость от плотности для молоди уже не будет играть такой роли:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(0) + \beta)N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta, & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t - \xi)N(t - \xi) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases} \quad (2.13б)$$

Формализация в (2.136) изменит характеристики зависимости эффективности воспроизводства, которые повлияют и на нелинейные эффекты динамики.

Отметим после выписывания уравнений, что цель главы – не просто построить формализацию для некоторой конкретной формы зависимости (как делалось в работах Рикера, Бивертонга, Холта, Т. И. Булкаковой и Е.А. Криксунова). В работах автора развивается метод представления, который будет применим для формализации большого разнообразия форм связи запаса и пополнения, возникающих в естественной среде и отражающихся на графиках данных наблюдений при анализе с использованием скользящей средней.

В гибридной структуре можно рассмотреть дополнительные факторы экодинамики, как воздействия вредных веществ на процесс репродукции [149].

Изначально автором определены для оригинального метода построения гибридной модели общие принципы:

- 1) *вариативности* составляющих модель вспомогательных уравнений;
- 2) *трансформируемости* положений экстремумов итоговой результирующей формы получаемых кривых при учете дополнительных воздействий, используемых в качестве оператора эволюции для функциональных итераций в модельных сценариях с управлением для задачи сравнения;
- 3) бистабильность траектории итераций при включении воздействия из вне;
- 4) отсутствие стремящихся к нулю асимптот функции воспроизводства;
- 5) отсутствие устойчивых циклических траекторий с четным периодом цикла более 2^1 . При этом допустимо сосуществование альтернативных циклов с $p=2^1$.

Важность указанных исключений в пунктах 4 и 5 обсуждалась в §1.4, это позволяет избегать избыточных нелинейных эффектов, которые затрудняют биологическую интерпретацию результатов моделирования.

2.5.5. Включение циклически изменяющихся характеристик в базовую модель репродуктивного процесса

Форма третьего вспомогательного уравнения вариативная и количество самих уравнений для динамики пищевых ресурсов опциональная для ситуации. Если в моделируемой ситуации наблюдаются колебания в обилии кормовых ресурсов, что вызвано сезонными изменениями, то для моделирования можно использовать одно из уравнений с запаздыванием и дополнительной убылью:

$$\frac{dg}{dt} = rf(N(t - \xi)) - \zeta N(t),$$

где при увеличении $r\xi$ наблюдаем бифуркацию Андронова–Хопфа – мягкую потерю устойчивости равновесия с возникновением орбитально устойчивого цикла $g_*(t; r\xi)$, амплитуда которого зависит от $r\xi$. При таком методе моделирования колебаний необходимо избегать ситуаций:

$$\lim_{\xi \rightarrow 1} \min g_*(t; r\xi) = 0 + \varepsilon.$$

Если минимумы цикла корма станут глубокими и околонулевыми, то это нереалистичный с точки зрения экологии сценарий резко повлияет на выживаемость. Можно ввести запаздывание непосредственно в уравнение (2.12):

$$\frac{dg}{dt} = rg(t) \left(1 - \frac{g(t-\xi)}{K} \right) - \zeta N(t), \quad (2.14)$$

Однако, для получения резких негармонических колебаний целесообразно использовать вместо квадратичной формы более сложную функцию саморегуляции, например, экспоненциальную регуляцию функции Рикера:

$$\frac{dg}{dt} = rg(t-\xi)e^{-bg(t-\xi)} - \zeta N(t) - \iota g(t). \quad (2.15)$$

Запаздывание ξ в регуляции даст возможность описать невынужденные колебания обилия ресурсов $g(t)$. Тогда зависимость $\varphi(S)$ для системы запаса и пополнения перестанет быть гладкой кривой, для популяционной интерпретации потеря гладкости $\varphi(S), S > 0$ не значима и объяснима, так внешние возмущения присутствуют в реальных биосистемах. Очевидные варианты уравнений с запаздыванием при численном моделировании демонстрируют существенный недостаток. При необходимости увеличить период между максимумами колебаний с ростом $r\xi$ происходит быстрое увеличение амплитуды цикла $g_*(t; r\xi)$. Минимумы становятся чрезвычайно малыми:

$$\forall \xi r > 0, \lim_{\xi r \rightarrow \infty} \min g_*(t) = 0.$$

Близкие к нулю значения g не соотносятся с реальностью и недопустимы для расчетов согласно уравнению, так как возникнет программная ошибка в алгоритме расчетов.

Изменение ресурсов может иметь пульсирующий характер, так как происходит смена малочисленных и многочисленных поколений. В непрерывной динамике можно описать подобные явления. Предложим специальное уравнение для колебательного варианта модели воспроизводства с учетом истощения пищевых ресурсов:

$$\frac{dg}{dt} = rg(t) \left(\frac{K - N^2(t-\xi)}{K + zN^3(t-\xi)} \right) - \zeta N(t). \quad (2.16)$$

В (2.16) результате реализации бифуркации рождения цикла получим релаксационные колебания – пики значительной амплитуды негармонической формы. Такие пики начинаются от ненулевого порогового значения:

$$N(t) \approx K.$$

Ситуация развивается в окрестности потерявшего устойчивость равновесия. Вариант с (2.16) без неприемлемых глубоких минимумов флуктуаций будет актуален и для ряда задач с сезонной изменчивостью, когда несколько поколений появляются после зимовки или развиваются летом, таким образом существуют в разных условиях. Возможности описания специфических экстремальных популяционных процессов уравнениями с запаздыванием мы можем активно использовать.

2.5.6. Особенности постановки задач моделирования и вариативность базовой гибридной структуры

Цель разработанного нами метода организации модифицируемой, предикативно переопределяемой и дополняемой модельной структуры – получить разнообразно настраиваемую зависимость по количеству и положению экстремумов и числу нетривиальных стационарных точек и таким образом увеличить описательные возможности сценарного моделирования ситуаций.

В работе продемонстрирована возможность эффективного варьирования вспомогательными уравнениями, определяющими срабатывание переходов для режимов гибридного автомата, которые моделируют событийные эффекты во *внутреннем развитии* процессов. При развитии модели и дополнении новыми уравнениями для других объектов необходимо уделить внимание биологической обоснованности, а при выборе модификаций исходить из экологических реалий. Расширяемость гибридной модели с целью учета различных внешних условий является преимуществом развиваемого нами метода описания популяционных изменений. Особенность разработанного способа организации времени – необходимость согласовывать временные интервалы у основной гибридной структуры и вспомогательных уравнений. Циклы колебаний ресурсов не должны менять амплитудные характеристики на выбранном нами интервале уязвимости. Задача вариативности при моделировании сценариев – позволить описывать поколения, которые развиваются в различных условиях, что актуально для видов, которые генерируют 2 или 3 поколения за сезон, последнее из которых зимует.

По сравнению с известными моделями метод отличается сложностью применения. Необходимо заметить, что для описания влияния стадийности развития на выживаемость в модели можно было бы применить более простой способ без непрерывных интервалов и не требующий специальных численных методов. Так можно использовать для трех стадий непосредственное вычисление композиции из трех функций:

$$R = f_1(f_2(f_3(S))),$$

где f_1, f_2, f_3 соответственно можно определить функциями Рикера, Шепарда, Бивертон-Холта. У такого подхода есть математическое возражение, композиция двух унимодальных функций определит зависимость, где вместо исходного максимума возникнет минимум, а точки-прообразы максимума слева и справа определят новые максимумы. Произойдет смещение максимумов к краям интервала допустимой численности запаса. Поведение итерации подобной композиции зависимости на самом деле будет сложнейшим и не описываемым одной бифуркационной диаграммой. Выигрыша в простоте анализа поведения и сценариев управления данный метод не предоставляет именно из-за сосуществования альтернативных устойчивых циклов разных периодов. Важнее другое биологическое возражение, как мы отмечали ранее, эффективность воспроизводства рыб часто изменяется пороговым образом после интенсивного перелова, что в данном методе придется учитывать предикативным изменением параметров функций от величины S . Для пороговых эффектов потребуются специальные средства и разграничение области определения величины S , что в любом случае приведет к использованию в качестве оператора эволюции траектории функций с точками разрыва.

Сложность *структуры* модели (число уравнений и набор параметров) и сложность *поведения* динамической системы (возможные бифуркации, метаморфозы аттракторов и перестроения границ их областей притяжения, хаотизация и другие нелинейные эффекты) не будут априори связаны некоторой прямой зависимостью. Это различные понятия сложности для моделирования.

Дополнительно гибридная форма модели с вычисляемыми по предикатам событиями позволяет вводить алгоритмическую компоненту при рассмотрении задачи с регуляцией, которую тоже можно задавать предикативно с проверкой на истинность соотношений между модельными переменными. Такая структура позволяет учитывать регуляцию, которую вырабатывают при принятии решений на основе обработки запаздывающей информации, полученной в прошлом сезоне – воздействие определяется исходя из предшествующего состояния.

2.6. МЕТОД ВКЛЮЧЕНИЯ ТРИГГЕРНЫХ ФУНКЦИЙ В ПРЕДИКАТИВНО ПЕРЕОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ

Пятая идея разрабатываемого в монографии метода – изменять характеристики оператора эволюции, то есть функциональных итераций для целенаправленной реализации нелинейных и пороговых эффектов. Именно получаемые нелинейные эффекты траектории будут описывать поведение

в экстремальных сценариях развития популяционных процессов. Особые свойства изменения функции, которая отображает точки траектории, требуются в некоторых узких диапазонах, потому в монографии называем их «триггерными». Однако, в разработанном методе оператор эволюции для функциональных итераций мы получаем при решении дифференциальных уравнений гибридной системы. Именно в одно из уравнений должны быть внесены ситуативные дополнения, оригинальные «триггерные функции» – эти функции должны срабатывать по условиям ситуации, а потом выключаться в нужный момент.

Эффективность воспроизводства эксплуатируемых популяций может резко и непропорционально сокращаться при уменьшении численности запаса [150]. Действие сильного эффекта Олли приводит к состоянию, когда воспроизводство не восполняет даже естественную убыль у родительского поколения. В критическом состоянии популяции, согласно имеющемуся экологическому опыту, возможно *несколько* вариантов дальнейшего развития ситуации:

1. Гибель популяции, что предсказывает известная модель Базыкина:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) (N(t) - L), N < L.$$

2. Образование реликтовой малочисленной, но стабильной группы особей.

3. Прохождение состояния «бутылочного горлышка» за счет ряда механизмов адаптации и прекращения негативного воздействия, например, сокращения жизненного цикла и более раннего созревания. Восстановление популяции возможно и искусственными методами выпуска (реинтродукции).

Известные математические модели хорошо описывают только вариант пункта 1. Однако, экологически более обосновано, по нашему мнению, что критическое состояние популяции – это не точечная величина, но особый интервал численности нерестового запаса:

$$Sl \in [L - SL, L + SL],$$

отличающийся высокой *вероятностью* превышения естественной убыли над пополнением, то есть выполнения условия положения кривой воспроизводства ниже биссектрисы координатного угла: $f(Sl) < (Sl)$.

Обоснованию действия эффекта Олли у разных видов (проявляется и у рыб, и у насекомых) посвящено много работ [151]. Связь между низкими темпами роста популяции и ее малой плотностью установлена в инвазивных для Северной Америки популяциях опасного вредителя, непарного шелкопряда *Lymantria dispar* [152]. Изучение роли эффекта Олли и его конкретных экологических причин для каждой отдельной ситуации – важный аспект для анализа явления стремительных всплесков численности после ин-

вазий, а не только случаев деградации промысловых биоресурсов. Нужны динамически корректируемые параметры, отражающие влияние состояния самой популяции на фертильность.

У нерестующих рыб эффективность оплодотворения икры снижается при малой плотности на большой акватории, икра просто не развивается дальше и гибнет. Данное явление резкого перехода к малочисленным новым поколениям отмечал еще У.Е. Рикер в статье «Большие последствия из-за малых причин» [153], где на примере двух промысловых популяций описал явление при небольшом превышении уровня допустимой эксплуатации и назвал критическое состояние эффектом «лезвие ножа», но не предложил математической формализации в уравнении. При таком эффекте зависимость «кривая воспроизводства» на некотором интервале численности запаса становится ступенчатой функцией, тогда кривая разрывается на сегменты. Для промыслового прогнозирования подобные эффекты чрезвычайно опасны, так как экспертами вовремя не прогнозируются [154].

2.6.1. Анализ влияния порогового эффекта сокращения эффективности воспроизводства методом триггерных функций

Использование в модели явного критического порога «эффекта Олли» – точки неустойчивого равновесия L математически простой способ, но недоверенный для практики природопользования. Если эксперты точно знали бы заранее и о существовании критического порога и определили бы значение L , то во многих случаях могли бы избежать ситуации промысловой деградации, усилив контроль за активным промыслом и введя ограничения, что, конечно, возможно при наличии достоверных данных учета численности или биомассы биоресурсов.

Для описания пороговых эффектов без явно указанных критических значений в динамике популяций нами разработан оригинальный способ, который мы назвали метод включения триггерных функций (термин введен автором).

Цель нашей работы связана с системным анализом возникающих при управлении биоресурсами критических ситуаций, то есть вне экологического оптимума популяции и состояний балансового равновесия вида со средой. Соответственно, необходимо отразить действие эффекта агрегированной группы, так как мы рассматриваем ситуации для популяций вне исторически сложившейся численности. При малой численности S велика роль неблагоприятных факторов в воспроизводстве рыб [155]. Даже искусственное воспроизводство рыб не может восстановить запаса, так как сложно найти достаточно пригодной икры. Вводить тут явный минимальный L -порог эффекта Олли, как в уравнении Базыкина, методически неправильно. Как мы отметили, заранее L -порог экспертам и ЛПР просто неизвестен. В результате проведенного анализа достоверно утверждаем о существовании порога уже постфактум. Не все изменения в регуляции численности бывают жестко предопределенными.

С другой стороны, по экологическим критериям недостоверно изменять скачком базовые популяционные характеристики, отвечающие за эффективность воспроизводства. Средняя плодовитость λ не может так резко изменяться, хотя в эволюционной перспективе это адаптивная характеристика, при переходе к короткоцикловым быстро созревающим формам плодовитость сократится.

Идея предлагаемого нами метода – точно возмущать выбранные параметры популяционной модели в особых условиях существования и отношений со средой обитания. Учтем действие эффекта Олли непосредственно в уравнении выживаемости особой функцией, изменяющей значение модельного коэффициента убыли β . Мы предлагаем метод учета изменчивости факторов в форме точечного внедрения в предикативно переопределяемую динамическую систему особых функций как варьирующихся коэффициентов: $\Psi(n) \cdot \text{const}$ для итераций $\varphi^n(x_{n-1}, \Psi(n))$, но только с ограниченным диапазоном у их значений.

Такие функции должны быть постоянны на всем кадре $[\uparrow L, \downarrow R]$ непрерывного модельного времени. Менять свое значение функции триггеры в расчетах будут при смене кадра $n := n+1$. Непосредственное значение Ψ связано с начальным состоянием численности поколения в точке 0 очередного интервала времени.

В уравнении убыли численности поколения разделены коэффициенты смертности: αN^2 и βN . Величина $w(t)$ при параметре α_i 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 сильно проявиться именно при низкой плотности $S \rightarrow \min \varphi$ половозрелых особей, больше икры останется неоплодотворенной. Эффект снижения эффективности воспроизводства для малой группы реализован в модели динамическим коэффициентом с βN . Влияние его зависит от величины родительской популяции S , из которого мы рассчитывали начальные условия $N(0)$. Диапазон влияния Ψ на $f(S)$ нужно ограничивать. Область значений «функции-триггера» $E(\Psi)$ справа имеет быстро достижимый конечный предел:

$$\Psi(S) = 1 + \exp(-\zeta \sqrt[3]{S^2 + \varepsilon}),$$

$$\lim_{S \rightarrow \infty} \Psi(S) = 1, \Psi(0) = 2. \quad (2.17)$$

Коэффициент $\zeta < 1$ отразит уровень экспрессивности эффекта потерь от исходной икры. Таким способом при оптимальном нерестующем запасе Ψ не определяет расчеты пополнения, так как $\Psi \approx 1$. Фактически мы переходим к динамической системе с изменяемым оператором эволюции, который непосредственно зависит от положения траектории.

Свойство ограниченности области значений $E(\Psi) = (1, 2]$ позволит в стадийной модели гладко реализовать выключение действия фактора сильного эффекта Олли в уравнении для первой стадии, если данная ситуация уже не актуальна:

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha w(t)N^2(t) - \Psi[S]\beta N(t). \quad (2.18)$$

В (2.17) мы учли плавные изменения регуляции, но которые парадоксально ведут к возникновению порогового эффекта в динамике. Тогда как в гибридной системе описали пороговые изменения динамики убывли численности молоди, которые нельзя избежать, но при этом сохраняли гладкий характер зависимости.

В главе об анализе вспышек и инвазий мы предложим другой триггерный функционал для описания эффекта истощения жизненных ресурсов при анализе сценария порогового развития вспышек численности насекомых.

Включение в структуру нашей модели триггерной функции в следующей форме (без запаздывания) определит качественное изменение её поведения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dt} = \begin{cases} -\alpha w(t)N^2(t) - \Psi[S]\beta N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t)N(t) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g(t)}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}} + \chi_N, w(0) = w_0 \\ \frac{dg}{dt} = rg(t) \left(1 - \frac{g(t)}{K} \right) - \zeta N(t), g(0) = g_0 \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Идея метода триггерных функций – быстро убывающая (возрастающая) до $\Psi[S] \rightarrow 1$ функция в уравнении с расчетом на интервале жизненного цикла. Форму графика триггерной функции подбираем из экологических условий кризисной ситуации в развитии процесса. Методом триггерных функций можно описывать не только эффект Олли или «фактор агрегированной группы», когда из-за малочисленности ухудшается защита потомства у коллективных животных (например, огромные колонии социальных насекомых) или становится трудно найти партнера для размножения рыбам на большой протяженности нерестилищ. Данным способом можно описывать другие изменения, которые следуют при достижении критически большой численности и резком истощении ресурсов.

В приведенном примере триггер Ψ увеличивает смертность в диапазоне малочисленного состояния, но мы можем использовать Ψ^{-1} для описания противоположного по сути явления, – увеличения выживаемости поколения.

Во время развития инвазионного процесса после вселения чужеродного вида через некоторое время адаптации часто наблюдается переход к вспышке численности из-за отсутствия эффективных антагонистов. Во вре-

мя этого явления череда возрастающих поколений не балансируется емкостью экологической ниши и в какой-то момент ресурсы для размножения следующего поколения будут исчерпаны предыдущими, среда начинает разрушаться (лес гибнет и теряет листву, пастбища вытаптываются, клетки организма разрушаются и др.). В результате условия воспроизводства резко ухудшаются.

2.6.2. Включение триггерной функции действия пороговых эффектов в непрерывные модели

Метод включения триггерных функций обосновано применять и для модификации полностью непрерывных моделей, создавая таким способом, плавающий порог с непрерывно меняющимся значением Ψ . В реальности незыблемое состояние популяции, ограниченное ресурсами среды, встречается крайне редко. Например, этот способ актуален для модификаций логистических моделей, использующих пороговые значения численности: ёмкости среды K , или критической численности L , как было показано в известной модели А. Базыкина [156], которая нуждается в ситуативной модификации.

Целесообразно предложить следующую модификацию логистического уравнения при логарифмической саморегуляции с промысловым изъятием, дополненное триггерным включением, используя в функции Ψ значение численности с запаздыванием:

$$\Psi[N(t - \tau)], \tau > 0.$$

Тогда уравнение выпишем таким способом:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \ln \left(\frac{K}{N(t)} \right) (L\Psi[N(t - \tau)] - N(t)) - \delta N(t).$$

В разработанной новой модификации положение критического порога будет зависеть уже от предшествующего состояния популяции. На положение критического равновесия учитывается влияние ранее израсходованных ресурсов и опосредованно возникает зависимость от величины изъятия.

Цель данной модификации – включить естественную неопределенность в детерминированные модели. Нереалистично в экологии и изменчивых биосистемах, что пороговые значения в популяционных моделях являются незыблемыми и априори predetermined. С применением триггерных функций можно имитировать и ограниченное действующее на биосистемы стохастическое возмущение.

В уравнениях динамики популяций с эффектом запаздывания триггерными функциями целесообразно воздействовать на показатель запаздывания:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \ln \left(\frac{K}{N(t - \tau)\Psi[N(t - \tau)]} \right).$$

Запаздывание в данной модели бифуркационный параметр и таким методом нам можно изменять по необходимости характеристики колебательных режимов в некоторых особых состояниях исследуемой популяции. Актуальность подобных модификаций известных уравнений обоснована потребностью в расширении вариативности получаемых в моделях биологических процессов режимов поведения. Данным способом в работе расширены описательные возможностей используемого в анализе биосистем математического аппарата.

2.6.3. Особенности экспертного регулирования эксплуатации биоресурсов с критическим неустойчивым равновесием в экодинамике

Действие триггера приводит к разделению фазового пространства на две области притяжения, что не учитывали три известные ранее модели формирования пополнения. Появится граничная неустойчивая точка-репеллер R_1^* в первой точке $f(S)=S$, области притяжения, которая обуславливает пороговый эффект. Стационарную точку пересечения кривой воспроизводства с биссектрисой будем обозначать R^* , а нижним индексом R_i^* порядковый номер точки от начала координат, но как R_0 обозначается начальная точка траектории итераций $R_n = \varphi^n(R_0)$, так мы исследуем дискретную составляющую траектории.

Для области притяжения левее репеллера R_1^* аттрактором для Ω_1 является тривиальное равновесие – начало координат $(0,0)$, так что выполняется:

$$\forall 0 < R_0 < R_1^* : \lim_{n \rightarrow k < \infty} \varphi^n(R_0) = 0.$$

Аттрактором правой области Ω_2 является устойчивое положение R_2^* , но в модификациях нашей модели аттрактором может быть и цикл с периодом $p=2$.

Более сложная канторовская структура притягивающего множества в данном случае не представляет интерпретируемых возможностей для описания.

Биссектриса с двумя пересечениями и унимодальный вариант зависимости кривой воспроизводства, полученная при численном решении гибридной модели, показаны на рис. 2.6. Кривая воспроизводства с данными свойствами очень нежелательная для благополучия популяции и опасная для длительного ведения промысла зависимость. Такая зависимость возникает у популяции, плохо адаптированной к среде размножения и испытывающей давление видов конкурентов. Восстановление такой популяции после деградации маловероятно.

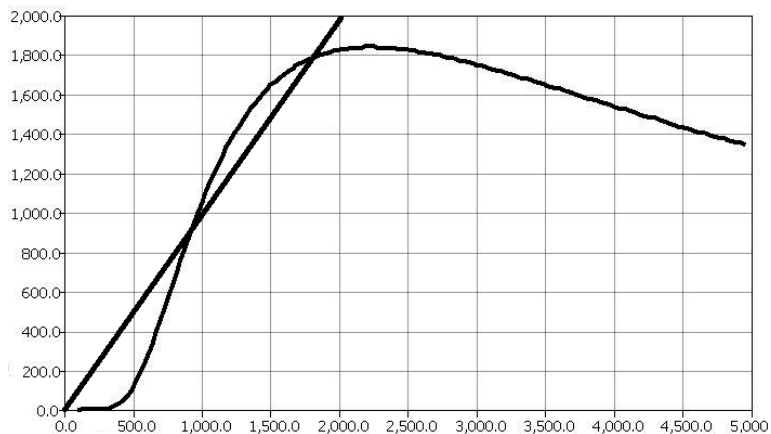


Рис. 2.6. Появление неустойчивой пропеллерной точки унимодальной кривой

Интересно, что устойчивое состояние для запаса оказывается тут левее точки максимума, значит над такой популяцией довлеют более сильные конкурентные факторы, ограничивающие ее развитие. Управление биоресурсами с подобной кривой воспроизводства представляется сложной задачей, имеющей высокую степень риска развития быстрой деградации. Оптимальное для промысла состояние S_{opt} популяции определяется так: $|f(S) - S| \rightarrow \max$. Для приведенной на рисунке кривой состояние S_{opt} лежит почти по середине интервала $S_{opt} \approx |R_2^* - R_1^*| / 2$ между устойчивым и не устойчивым равновесием.

Очевидно, чем правее расположено устойчивое равновесие $R_{max} < R_2^*$ и чем дальше эта точка от неустойчивого, тем стабильнее эксплуатация и можно увеличивать долю изъятия. Модель нелинейной эффективности воспроизводства показывает, что успех долговременного промысла обеспечивает свойство:

$$|R_2^* - R_1^*| \rightarrow \max .$$

Эту разницу $|R_2^* - R_1^*|$ мы можем называть запасом стабильности эксплуатируемых биоресурсов. Эксплуатируемая популяция уже не находится в естественном стабильном состоянии баланса (цикле, аperiodическом режиме). Восстановительный потенциал популяции можем оценить по площади фигуры, которую образует кривая воспроизводства над биссектрисой координатного угла.

При этом отметим важный аспект при управлении промыслом, основанном на экспертных решениях и статистике уловов. При ведении промысла, когда начальные условия определяются с учетом доли изъятия q :

$$N(0) = \lambda S_{n-1} (1 - q).$$

Кризис из-за истощения запасов популяции для показанной на рисунке кривой при $|S_{opt} - R_1^*| \rightarrow \min$ скоро станет очевиден экспертам. Объемы улова упадут быстро при перемещении устойчивого положения влево по кривой. В ином случае для популяции, которая выдерживала значительный уровень изъятия, когда устойчивая точка далеко правее максимума $f(S)$, эксперты долго не замечают приближающегося критического состояния, падение уловов происходит медленно вплоть до критической точки. Необходимых решений о снижении давления не принимается, мораторий не вводится, потому реализуется модельный сценарий длительной деградации при «перелове» с финальным кризисом, как на рис. 2.7. В реальности меры регулирования не смогут обеспечить строгую точность выполнения установленной доли изъятия, так как промысел массовых видов чаще всего оперирует квотами крупными единицами биомассы (млн тонн), реже численностью. Отметим, монотонное сокращение уловов – это приблизительный сценарий кризиса. Уловы реальности колеблются в некотором диапазоне даже при стационарном состоянии биоресурсов, так как успех рыболовства имеет некоторую вероятностную составляющую – удача вовремя найти скопление промысловых объектов.

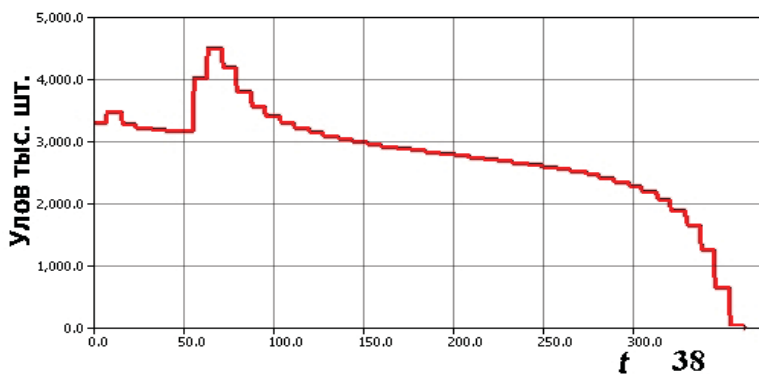


Рис. 2.7. Модельный сценарий монотонной динамики уловов при длительной промысловой деградации популяции с большим запасом стабильности

Наименьший уровень изъятия q при котором промысловая популяция перестает существовать за конечное число сезонов, мы назовем *критическим* уровнем.

Можно по имеющимся длительным данным наблюдений оценить устойчивое состояние (возможно, такое состояние будет циклическое), трудно заранее предположить положение неустойчивого равновесия. Риск возникает из-за переоценки способности популяции к восполнению, которая неизбежно возникнет у экспертов при длительной эксплуатации запаса с большим запасом стабильности, который не может быть бесконечным.

В необходимости обоснования неочевидных решений состоит *дилемма экспертного регулирования* биоресурсов с нелинейной регуляцией эффективности воспроизводства и пороговым эффектом – непропорционального снижения эффективности воспроизводства. Это аспект требует анализа

экспертной логики. Регулирующий экспертный коллектив часто видит то, что ему хотелось бы увидеть и занижает значимость факторов, которые нарушают обоснованность желательных решений, если одни принимаемые им решения будут желательными, а другие только необходимыми. Логика мотивации решений говорит, что введение моратория на вылов – это необходимость, возобновление промысла после кризиса – желательное и ожидаемое решение.

Интересный взгляд на проблему содержится в одной из работ по теории организации боевых действий [157], «одним из фундаментальных свойств процесса принятия решений является то, что наряду с объективной реальностью существует ее отражение в сознании. Во многих случаях между реальностью ситуации и ее образом в сознании командования существует неизбежное несоответствие». Изучение свойств восприятия связано с понятием «рефлексия».

Приведенный вычислительный эксперимент с последовательной монотонной и постепенной утратой уловов, наблюдался для каспийских осетровых, но достаточно редкий в хозяйственной практике, как правило, наблюдается немонотонная колеблющаяся динамика. Колебания не описываются точкой-репеллером, но такие сценарии требуют более сложного неустойчивого инвариантного многообразия в фазовой плоскости. Следовательно, целесообразно продолжить совершенствование структуры популяционной модели для возможности описания в сценариях *как можно большего числа* разновидностей динамики популяций при чрезмерно интенсивном промысле.

Разработанная методика моделирования позволяет получать *различные* расположения стационарных точек на кривой $f(S)$, которые *нужны* для описания исследуемой ситуации с точки зрения теории динамических систем. В развешиваемом методе за счет вариативности структуры мы *выбираем* из доступного нам набора *требуемые* нелинейные эффекты при описании ситуации.

Фактически в данной модификации получен дискретный аналог модели Базыкина [158]. В разработанной модели наличие эффекта Олли не вмешивается в расчеты получаемого пополнения для оптимального состояния запаса. Для наших задач интересна более сложная зависимость с несколькими экстремумами и соответственно сложным поведением траектории, включая хаотизацию, но включенный триггерный функционал $\Psi[S]$ будет сохранять разделение фазового пространства (минимум) на две области притяжения: Ω_1 и Ω_2 двух альтернативных аттракторов. Это простой случай появления динамического эффекта бистабильности.

Состав уравнений модели мы полагаем *открытой структурой*. Логично продолжим совершенствование модели и продемонстрируем включение в состав набора уравнений важных эколого-физиологических аспектов и факторов среды.

Варианты развития стремительных процессов в экосистемах чрезвычайно разнообразны. Разработанный нами метод представления «гибридной» модельной структуры из набора сменяющихся в логическом порядке правых частей делает предлагаемую нами структуру *открытой*

для совершенствования, так как в предикаты включены вспомогательные показатели. Метод предоставляет возможность специалистам *развивать модель* (2.13), настраивая ее характеристики для множества частных ситуаций в экодинамике и соблюдая некоторые принципы (прежде всего, экологической обоснованности). Теоретических принципов экологии и эволюции описано достаточно много (принцип минимума видов В.В. Хлебовича или принцип наименьших сопротивлений Спенсера), и в том числе с уникальными особенностями.

В реальных ситуациях число стационарных точек не ограничивается двумя и возникают более сложные режимы поведения, потому динамика уловов в реальных графиках выглядит волатильной и аperiodической, поэтому мы рассмотрим дальнейшее обоснованное усложнение модельной структуры.

2.7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРЕДИКАТИВНО- ПЕРЕОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СТРУКТУР

В монографии мы поэтапно развиваем методологию организации структуры переопределяемой модели как инструмент системного анализа ситуаций в биосистемах. Последовательный *путь совершенствования* обусловлен неизбежной технической проблемой: сложностью параметризации всех уравнений сразу, – трудностью одновременной настройки большого числа параметров для получения биологически адекватного варианта решения. Помимо научных решений, задача анализа сценариев управления биоресурсами включает вспомогательные работы по программной реализации, настройки, верификации – это черновая часть выполнения проекта, затраты времени на выполнение которой стараются минимизировать. После настройки базовой структуры в этом разделе добавим еще один важный метод для описания вариативности развития популяционных процессов в разных условиях – взаимодействия двух процессов с некоторыми логически заданными логикой изменениями.

Для поставленных в работе задач автор использовал при формировании системы (2.13) прерывистую, динамически переопределяемую модель убыли численности, где влияющим фактором регуляции сделали уровень размерного развития. Использование скорости роста в данной связи было биологически обосновано Е.А. Криксуновым [159] в исследованиях по анализу факторов формирования пополнения популяций рыб. В данной работе расширяются математические подходы теории формирования пополнения, которые могут быть применимыми для моделирования других экосистемных явлений: активных инвазионных процессов и всплеск численности вредителей леса, одиночных или пульсирующих. Потому в развиваемом методе показатель размерного развития, сам зависящий от численности поколения, используется в предикатах смены

поведения гибридного автомата. Подход к моделированию актуален для биологических видов, у которых показатели ювенильной смертности велики и колебания выживаемости на ранних стадиях с амплитудой в несколько процентов определяют состояние популяции. К этой категории можно отнести далекие друг от друга по таксономическим признакам виды (рыб, насекомых, ракообразных), можно говорить о применимости модели к «г-стратегии» размножения.

С точки зрения биологической теории можно логично возразить – темпы роста многоклеточного организма, очевидно, не являются постоянными в жизненном цикле, когда речь идет о рыбах или насекомых. Более того, скорость роста должна существенно меняться в ювенальном онтогенезе. Если мы выбрали структуру расчета динамики численности поколения, переопределение которой связано со стадийностью развития организмов, то логично обратить внимание на изменение темпов индивидуального развития, которое аналогично будет связано со стадийностью. Переход от икринки (или яйца) к стадии, питающейся за счет желточного мешка личинки и потом к свободно ищущей корм молоди, очевидно, подразумевает физиологические перестроения, отражающиеся на динамике развития. Зависимость роста особей от их плотности тоже не может быть постоянной, так как способность к поиску пищи увеличивается. Следовательно, логично в модели специальным образом использовать в расчетах половозрелого поколения вторую переопределяемую структуру, изменяемую синхронизировано с вышеописанной – в тех же точках событий на шкале гибридного времени.

Шестая идея разработываемого метода формирования структуры модели – анализ двух взаимодействующих и динамически трансформирующихся процессов. Взаимодействие переопределяемых систем можно организовать в одной гибридной модели, так как одна из структур играет вспомогательную роль. При управлении внешним воздействием необходимо синхронно повторно инициализировать начальные условия для двух переопределяемых структур.

Моделированию динамики биомассы и линейного роста разных организмов посвящено значительное число экспериментальных работ [160], рассматривающих процессы анаболизма и катаболизма [161]. Предложены уравнения роста Бергаланфи, Гомпертца, Броди, Шмальгаузена и др. Модели роста дают представление о регуляции предельных размеров особи вида и подходят к накоплению биомассы как непрерывному явлению, но они не учитывая переходные процессы при формировании систем жизнедеятельности на ранних этапах развития. Для рыб практически актуально моделирование роста в индустриальной аквакультуре, что было рассмотрено на примере молоди осетровых [162]. Однако, в этих исследованиях мало уделялось внимания моделированию связи динамики размерных показателей поколения и убыли его численности. Зависимость плотности группы с темпами роста особей специфична для некоторых ранних стадий онтогенеза (рыб, крабов, насекомых), когда особи еще недостаточно подвижны [163]. Ситуация, когда взаимная зависимость рост-численность становится актуальной, возникает в искус-

ственных средах, например, при выращивании заводской молоди рыб в искусственных условиях ограниченного водоема. На данный аспект автор акцентировал внимание в работе по анализу уменьшающегося процента возврата от выпуска в реку искусственно выращиваемой молоди [164]. Промысловый возврат от выпуска молоди оказался существенно ниже ожидаемых экспертами показателей, которые были заложены в основание промысловых прогнозов [165], и этот фактор стал одним из важнейших в развитии кризиса и деградации.

В новой модели гибридной модельной структуры для скорости размерного развития впервые реализуем (обобщенно для видов, не заботящихся о потомстве и развивающихся со стадии икринки или яйца) ряд важных биофизических аспектов. Отразим в уравнениях, что на первой стадии питание проходит за счет желточного мешка, потом происходит переход на смешанное питание с активной конкуренцией за ресурсы. Далее происходит миграция поколения с активным питанием. Учтем в модели, что в ходе активной миграции растущей молоди конкурентные факторы, которые зависят от плотности, становятся менее существенными и их вклад в расчет выживаемости должен уменьшаться.

Дополнительно примем во внимание при построении модели для ситуаций, что у осетровых и лососевых рыб относительно продолжительное время по сравнению с другими видами занимает смешанное питание. На самой первой стадии икринки питание происходит эндогенно за счет запаса питательных веществ [166] и скорость роста не может считаться положительной, но этот небольшой промежуток времени мы включим в этап, завершающийся резорбцией желточного мешка и переходом на активное питание. Скорость роста линейная с незначительным коэффициентом наклона к оси абсцисс сохраняется до тех пор, пока личинкам не станут доступны подвижные кормовые объекты. Условием для перехода пусть служит накопление достаточного показателя \bar{w} .

На втором этапе скорость роста уже зависит от плотности конкурирующих за пищевые ресурсы и еще недостаточно подвижных личинок. Характер зависимости прироста от плотности малоисследованный вопрос, и имеющиеся результаты экспериментов в искусственных условиях несколько противоречивы из-за разных условий содержания и кормления молоди [167]. В исследования при дальнейшем развитии необходимо включать фактор не только питания, но достаточного обеспечения всех биохимических процессов кислородом.

2.7.1. Вспомогательная переопределяемая вычислительная структура

Реализуем в модели ситуацию, опираясь на сопоставленные нами сведения, что зависимость обратная дробно степенная пропорциональна N^{-z} , и показатель $z < 1$ дробь от $1/3$ до $2/3$. После начала миграции в потоке воды к эстуарию моря зависимость от плотности у молоди рыб должна снижаться, а в прудовых условиях даже фиксировалось повышение упитанности при более плотном зарыблении уже подростовой молодью. Групповое поведение особей тоже один из факторов создания

нелинейности во взаимосвязи роста организмов и убыли численности поколения.

Второе уравнение в системе (2.13) переопределим в виде структуры с дважды изменяющейся правой частью. Каждому виду правой части сопоставлено условие завершения активности для данной фазы скорости весового прироста:

Предложим следующую структуру для динамики размерного развития, переопределяемую при использовании предикатов (2.8):

$$\frac{dw(t)}{dt} = \begin{cases} \rho, P_1 \\ \zeta \frac{w(t)}{\sqrt{N}}, P_2 \\ \eta \sqrt[3]{w(t)^2} - \vartheta w(t), P_3 \end{cases} \quad (2.17)$$

где в предикате P_1 используется τ – длительность периода развития до полного израсходования питательных запасов желточного мешка, определяемая биологическими особенностями вида с линейным коэффициентом прироста $\rho < 1$, который в среднем для поколения должен быть положительным; в предикате P_2 интерпретируется уровень развития, при достижении которого изменяется характер метаболизма из-за смены характера питания. На втором этапе может наблюдаться депрессия роста при повышенной плотности. При переходе модели к описанию третьего этапа полагается, что скорость роста свободно мигрирующей молодежи не определяется более численностью поколения.

Третья форма правой части переопределяемой структуры представляет собой балансовое уравнение разности между биологически синтезируемой биомассой с параметром анаболизма η , и убылью массы организма при метаболическом распаде живого вещества. Уравнение было предложено в работе Лео фон Берталанфи [168], но может быть модифицировано поправочными показателями.

Ускоренный рост в дальнейшем делает недоступным молодь для большего числа мелких окуневых хищников. Половозрелые осетровые и тресковые рыбы не имеют естественных врагов (фактор каннибализма сохраняется у хищных рыб и крабов на всех стадиях жизни), что позволяет убрать из уравнений убыли численности взрослых зависимый от плотности фактор смертности.

2.7.2. Динамические свойства и нелинейные эффекты модели с двумя переопределяемыми структурами

Вычислительная структура с применением взаимосвязанных предикативно-переопределяемых структур показывает наибольшую параметрическую вариабельность динамических режимов поведения, по сравнению с итерациями $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$ и других отображений с всюду отрицательным

шварцианом, как и с первыми версиями зависимости $f(S)$, полученной при численном решении нашей упрощенной гибридной модели воспроизводства без переопределений правых частей. Исследование дискретной составляющей «непрерывно-событийной» динамической системы демонстрирует разнообразие качественной динамики.

Изменения режимов поведения зависят от развиваемой модели более чем от одного бифуркационного параметра, но в реальных биосистемах некоторые параметры консервативны. Наблюдается появление всех типов бифуркаций, которые возможны для функциональных итераций и других метаморфозов аттракторов. С применением переопределяемого уравнения темпа размерного развития, калибруя соотношения модельных параметров в биологически допустимом диапазоне, можно получить сложные формы зависимости, имеющие более одного экстремума. Полученная модельная зависимость имеет два экстремума – максимум и минимум. Горизонтальная ненулевая асимптота сохраняется, но траектория теперь приближается к асимптоте не сверху, а снизу.

Разделение фазового пространства на две области Ω_1 и Ω_2 сохраняется, более того, возможно дальнейшее разделение одной из областей Ω_2 с появлением альтернативных притягивающих множеств и, соответственно, новых границ их областей притяжения.

Помимо известного сценария появления циклов итераций удвоенного периода, как было в ранее рассмотренных моделях, в новой модификации мы наблюдаем как сменяются бифуркации при плавном изменении одного параметра с прямых на обратные. Сперва при увеличении параметра происходит каскад удвоений периода $p = 2^{i+1}, i \rightarrow \infty$, сменяющийся обратным процессом – последовательного кратного двум уменьшения периода цикла $p = 2^{i-1}$, т. е. прямая и потом обратная бифуркация происходят при увеличении одного и того же бифуркационного параметра. Подобные явления «paired cascade» обнаруживались ранее в двумерных отображениях типа «аттрактор Эно».

Для биологической интерпретации интереснее другой нелинейный эффект. В числе других нелинейных эффектов можно наблюдать появление в диапазоне значений параметра, одновременно существующих в Ω_2 двух устойчивых циклов периода $p=2$, соответственно, областей притяжения в фазовом пространстве будет три, но их границы не будут гладкими. Эти две пары циклических точек являются стационарными точками для второй итерации $\psi(\psi(S))$ полученной при численном решении модельной зависимости.

На рис 2.8 показано стрелками появление четырех новых стационарных точек у второй итерации модельной зависимости $\psi(\psi(S))$, которые образуют два цикла периода $p=2$ у итераций $x_{n+1} = \psi(x_n)$, что было бы невозможно для функций, удовлетворяющих критериям теоремы Сингера – с одним экстремумом. Экстремум у $f(x)$ порождает дополнительные у $f(f(x))$ во всех точках-прямых прообразах, которые под действием $f(x)$ отображаются в экстремумы.

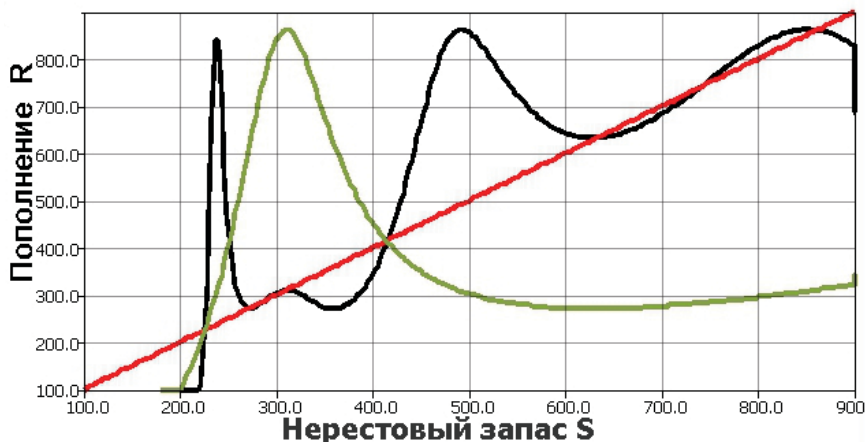


Рис. 2.8. Появление двух пар (показаны стрелками) циклических точек у второй итерации $\psi(\psi(S))$ полученной функции воспроизводства

Стационарных точек у функциональной зависимости с максимумом и минимумом, но значение в минимуме функции должно быть выше точки репеллера $\psi(S_{\min}) > R_1^*$ по-прежнему две, только обе точки в данном случае оказываются неустойчивыми. В этом случае важно положение стационарных точек старших итераций. Когда у третьей итерации появятся три устойчивых пересечения (каждому устойчивому равновесию в паре соответствует неустойчивое) с биссектрисой, то возникнет цикл периода три, при этом будут существовать как минимум четыре неустойчивые стационарные точки, разделяющие область притяжения цикла.

Появление альтернативных циклов может иметь популяционную интерпретацию для популяции рыб, когда одна из составляющих, частично изолированная группа, начинает изменять свою численность по циклу с меньшей амплитудой. Для насекомых вредителей такой вариант поведения реализуется из-за давления паразитов, численность которых сильно зависит от внешних погодных факторов и от предшествующего состояния. Могут происходить переходы между циклическими режимами как на рис. 2.9. с изменением амплитуды колебаний.

Между точками, притягивающимися к разным циклам, не будет уже простой гладкой границы области, состоящей из единственной видимой на графике точки. Граничные точки не притягиваются к циклам, как и потерявшие устойчивость циклические точки – они формируют инвариантные непритягивающиеся к аттракторам множества, разделяющие смежные области притяжения. Завершенной математической теории для таких итераций пока не разработано. Большинство результатов по исследованию фрактальных канторовских структур в динамике получены численно и описаны в работах Мэрилендской группы хаотической динамики, но эта область математики продолжает активно исследоваться и дополняться.

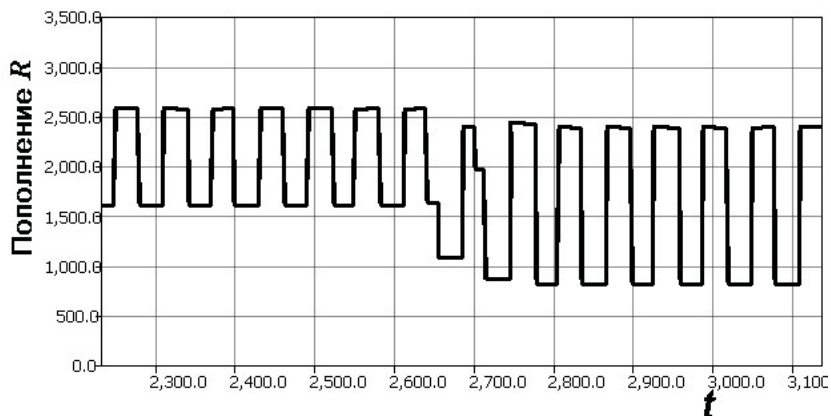


Рис. 2.9. Переходы между циклическими режимами при изменении параметров

Пусть популяция находится в состоянии большого цикла. При организации эксплуатации – дополнительном изъятии из запаса положение правой после максимума ветви зависимости будет изменяться, но и положение $\psi(\psi(S))$ тоже.

В разработанной модели реализуется при внешнем воздействии необычный метаморфоз фазового портрета уже в разделенной на отдельные подобласти Ω_2 , неописанный ранее для популяционных моделей. На рис. 2.10 показано как из-за изменения промышленного воздействия у второй итерации $\psi(\psi(S))$ исчезают две правые стационарные точки пересечения с биссектрисой координатного угла (обратная касательная бифуркация для второй итерации), которые формировали циклические колебания при большой численности популяции, где стрелками показаны сохраняющиеся стационарные точки $\psi(\psi(S))$.

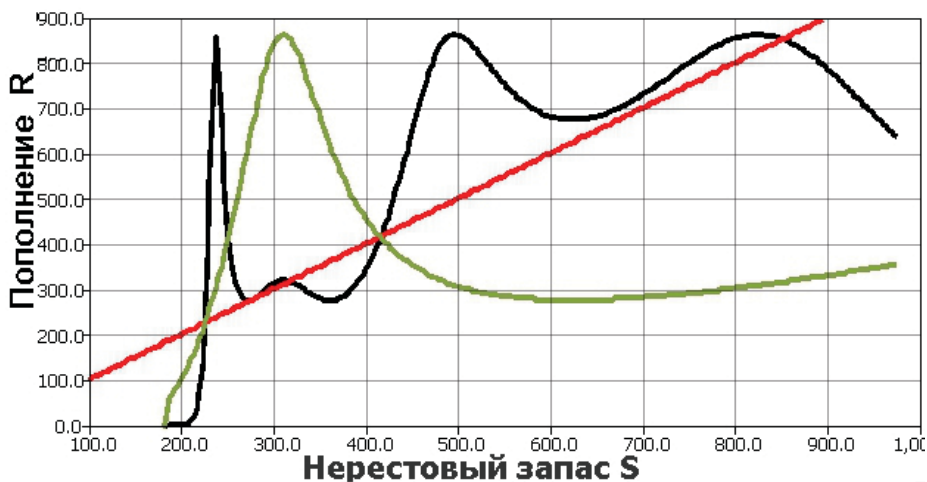


Рис. 2.10. Зависимость после исчезновения у $\psi(\psi(S))$ двух правых циклических точек, сохраненные левые циклические точки показаны стрелками

Показанное нами изменение зависимости описывает сценарий с переходом в длительную депрессию численности популяции без возможности быстрого восстановления. Аттрактором в Ω_2 остается показанный стрелками малый цикл с незначительной амплитудой, который очень близок к репеллерной точке:

$$R_1^* \equiv \partial\Omega_1,$$

и переход к которой означает безвозвратную деградацию биоресурсов:

$$\forall x_0 \in \Omega_1 \lim_{n \rightarrow k < \infty} \psi^n(x_0) = 0 + \varepsilon.$$

Интервал значений параметра α_2 (использовался как бифуркационный), в котором существует один из циклов (малый левее максимума), весьма узок, потому для популяции вероятность динамики с переходом на другой устойчивый цикл оценивается как редкое событие стремительной трансформации.

Биоресурсы с показанной на рис.2.9 и рис.2.10 зависимостью восполнения нестабильный объект для управления. Риск деградации запасов высок при малом превышении допустимого изъятия и запас стабильности у популяции незначительный. В модели существуют возможность для старшей нечетной итерации:

$$\min \psi^k(S) < \partial\Omega_1, k \neq 2^i,$$

но это вариант граничного кризиса и потери всех аттракторов в области Ω_2 при увеличении периода циклов.

Возможен иной вариант бифуркации с исчезновением точек не большого, а малого цикла. При ослаблении действия эффекта Олли и уменьшения значения триггерной функции кривая сдвинется выше в этой области. Так как триггерная функция не влияет на положение кривой правее максимума, то эффект приводит к переходу траектории на сохранившийся большой цикл. Данный оригинальный вариант бифуркации будет описывать эффект вспышки численности.

Седьмая идея предлагаемого подхода заключается в использовании прямых и обратных касательных бифуркаций стационарных точек при сложных (локально-несвязных) границах областей притяжения аттракторов. Трансформируемая зависимость позволяет проводить нужные метаморфозы.

Таким образом, полученная нами неунимодальная модель на основе двух переопределяемых структур с применением всего **одного типа бифуркаций** исчезновения/появления пары стационарных точек у кривой воспроизводства способна описывать *сразу два биологически интерпретируемых* нелинейных эффекта. Интересные эффекты кризиса в форме коллапса и вспышек численности инвазионных видов более подробно и на реальных экологических примерах с графиками рассмотрим в следующих 4-й и 5-й главах работы.

2.7.3. Бифуркационная диаграмма итераций разработанной зависимости с двумя экстремумами

С целью исследования изменений поведения нелинейных итераций для получения наглядных результатов картирования поведения в пространстве параметров используют бифуркационные диаграммы (или многомерные поверхности). Построение таких диаграмм проводят трудоемкими вычислительными методами. Соответственно, чем сложнее модель, тем больше вычислительных ресурсов и времени для расчета потребуется для построения.

Будем действовать стандартным подходом – фиксируем начальную точку и стартовое значение управляющего параметра, потом проводим вычисления траектории, отбрасывая переходные режимы 1000 первых итераций начальной точки. Перемещение следующих 1000 шагов траектории зафиксировав на диаграмме в инструментальной среде. Далее изменяем управляющий параметр на некоторый небольшой шаг и повторяем процедуру. Строим диаграмму, которая показывает переход от стационарной точки к циклическому режиму из двух точек, который мы показывали стрелками на предыдущих иллюстрациях.

На диаграмме рис. 2.11 и продолжение на рис. 2.12, мы последовательно тут уменьшаем параметр смертности, которая зависит от плотности в переопределяемом уравнении. Логично, исходя из известного поведения других итераций с экстремумами, что возникший цикл будет усложняться путем удвоений периода и это действительно происходит. Однако, от варианта поведения с бесконечным каскадом в нашем случае присутствуют важные отличия. Свойства динамики итераций с экстремумами следуют из правила дифференцирования сложной функции. В точке $\max f(x)$ будет $\min f'(f(x))$.

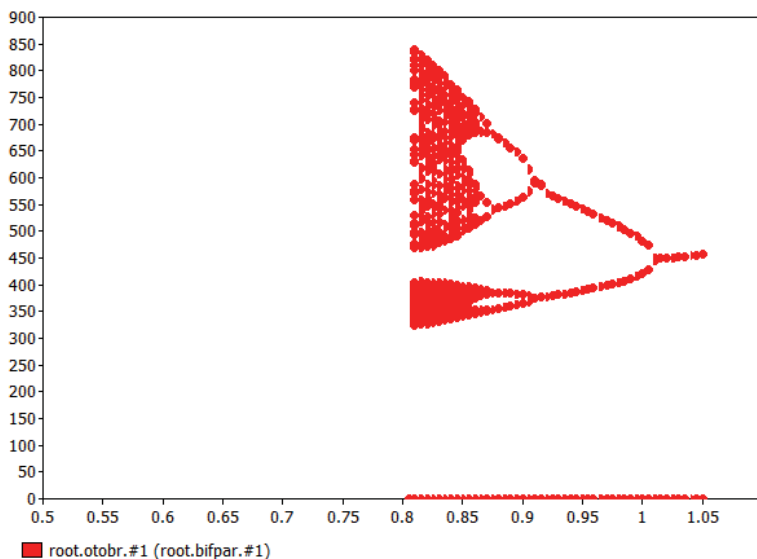


Рис. 2.11. Построение бифуркационной диаграммы для поведения разработанной модели (изменение параметра справа налево) в среде AnyLogic

Во всех точках, являющихся прообразами $\max f(x)$, возникнут $\max f(f(x))$, но у полученной нами зависимости прообразов точки максимума три, а не два.

При построении вычислительной структуры определили, что показатели компенсационной смертности $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ в переопределяемой структуре составят убывающую прогрессию, знаменатель этой прогрессии будет самым удобным бифуркационным параметром для исследования режимов поведения, но это не единственный управляющий параметр. Изменение параметра на рисунке идет справа налево, потому анализируем диаграмму в противоположную сторону, чем обычно это делают. В выбранном подходе сохраняется логичность. В модели Рикера исследовалось изменение поведения, и наблюдалась хаотизация по мере увеличения репродуктивного параметра, в нашей модели по мере уменьшения показателя убыли численности. Мы видим потерю устойчивости стационарной точки, образование удваивающегося цикла с «фейгенбаумским» развитием, которое заканчивается до появления объединенного канторовского аттрактора. Наблюдаем появление циклов конечного периода и уменьшающегося далее периода (рисунок продолжение предыдущего).

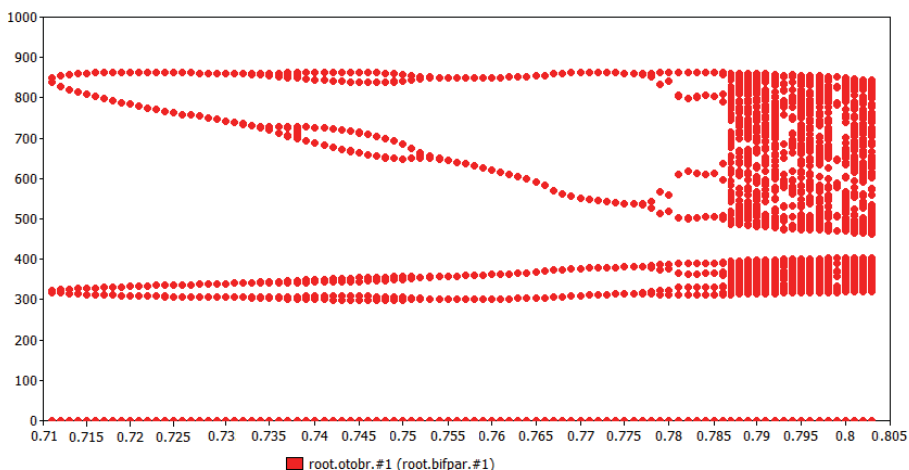


Рис. 2.12. Построение бифуркационной диаграммы (продолжение) изменение динамики при уменьшении управляющего параметра

Траектория итераций начинает «хаотизироваться», но каскад удвоений не становится полным. Не происходит объединение аттрактора, как в сценарии Фейгенбаума, две ветви остаются разделенными. Не наблюдается цикла $p=3$, – признака наличия континуума циклических траекторий. Далее при продолжении уменьшения параметра вместо слияния ветвей снова возникают циклы конечного периода, период которых уменьшается. Происходят бифуркации «ополовинивания» периода цикла $p=2^{i-1}, i \rightarrow 1$ вплоть до возникновения цикла периода $p=2^1$ при сохранении направления изменения управляющего параметра.

Сосуществования циклов и разделение областей притяжения не выявляется на бифуркационных диаграммах, так как при их построении использу-

ют фиксированные начальные точки, которые итерируют с использованием функции – оператора эволюции. Меньший цикл существует в узком диапазоне параметров, так что бифуркационная диаграмма представляет эволюцию одного из аттракторов, в данном случае цикла с большей амплитудой.

В главе 3 мы рассмотрим обоснование нелинейных ситуаций в реальной экодинамике, которые сможем имитационно моделировать с применением предложенных методов и вычислительных моделей. Без обоснования на реальных примерах модель будет громоздкой вычислительной абстракцией.

Монография имеет последовательный стиль изложения с точки зрения описания методологии сценарного моделирования в гибридных структурах, но часто именно с биологического обоснования и сравнения графиков с данными отчетов автор начинал свои исследования актуальных кризисных ситуаций.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В главе 2 проведено развитие метода формирования вычислительных структур гибридного типа с важными свойствами в контексте задач экологии. Предложенная предикативно-переопределяемая разновидность специально адаптирована для анализа ситуаций экстремальной экодинамики и последствий регулируемой эксплуатации биоресурсов. Термин “гибридные системы” в системном анализе сложных процессов объединяет в себе большое многообразие моделей с разрывными траекториями. Различные модели с переключениями и возмущениями динамики развивались при исследовании демографических и эпидемиологических процессов [169]. Известны различно формируемые динамические модели, которые относятся к гибридным структурам, разным по типу организации переключений. Для поставленных задач совершенствования методов системного анализа ситуаций обосновано формирование предикативно-переопределяемых структур с непрерывными вычислениями на базе дифференциальных уравнений.

В монографии определен способ формирования оригинального иерархического непрерывно-дискретного модельного времени, который соответствует событийным изменениям в изучаемых популяционных процессах при антропогенном воздействии. Метод позволяет исследовать естественную прерывистость процессов в жизненном цикле многих видов.

Выбранный метод построения расширяемой структуры модели, исходящий из особенностей анализируемых биологических процессов учитывает, что современные экосистемы перестали в эпоху глобализации быть замкнутыми эволюционно сформированными сообществами в гомеостазе. В современных условиях это иерархические многокомпонентные системы, объединенные гибкими типами трофических связей, где меняется состав сообществ из-за инвазий, перемены климата и прямого антропогенного давления промысла [170].

Выборное построение определено как предикативно переопределяемая вычислительная структура с кадрово-событийным временем. Структуры алгоритмически реализуются и численно исследуются в отечественных инструментальных средах: AnyLogic и Rand Model Designer, разработанной под руководством Ю.Б. Колесова и Ю.Б. Сениченкова специально для задач

с переключениями. В данной работе использована для программного представления принятая автоматная графовая нотация схемы переходов.

Разработанные гибридные структуры можно численно исследовать в RMD с применением персональной ЭВМ, любого современного ноутбука с ОС Windows XP и выше и без приобретения дорогостоящего импортного ПО. Для работы с гибридными моделями необходимы базовые знания основ информатики, теории графов, синтаксиса условных операторов языков C++ или Java, и задание настройки численных методов в библиотеке инструментальной среды.

В анализе развития ситуаций используем традиционную форму задания непрерывного поведения при численном решении задачи Коши на отрезке времени, интервале жизненного цикла поколения. При отсутствии событий, приводящих к смене поведения, карта состояния гибридного автомата вырождается в единственный узел с поставленной в соответствие «гладкой» системой дифференциальных уравнений.

Разработка переопределяемой структуры модели формирования поколений и концепция исследования поведения дискретной составляющей траектории для системного анализа заданных ситуаций основана на следующих семи идеях:

1. Формирование иерархического непрерывно-событийного модельного времени из непрерывных кадров и множества кортежей из событий.

2. Предикативное установление событийных изменений в структуре уравнений – использование наборов булевских функций.

3. Использование расчета динамики сопутствующих факторов для описания численности поколений и выделения на их основе событий переходов между стадиями развития организмов.

4. Расширяемость модельной структуры за счет учета ситуативных дополнительных факторов, при расширении набора уравнений для предикатов, например, для учета колебаний кормовой базы молоди.

5. Метод триггерных функций. Оригинальный способ рассматривать пороговые эффекты, действующие только в узком диапазоне состояния популяции. Таким методом было описано действие сильного эффекта Олли или «эффекта агрегированной группы» при низкой численности популяции уменьшающего эффективность воспроизводства. Данное экологическое явление вызывает появление состояния критической численности запаса. При этом само положение на кривой критической точки-репеллера (неустойчивого отталкивающего равновесия) в явном виде в модели заранее не указывается. С помощью данного метода удобно рассматривать влияние стохастических возмущений именно в ограниченном известными условиями узком диапазоне.

6. Использование двух взаимодействующих на интервале предикативно переопределяемых структур. Сопоставлены последовательные уравнения для убыли численности на стадиях развития в раннем онтогенезе и аналогичное изменение уравнений для скорости размерного развития.

7. Расширены спектр нелинейных эффектов и описательные возможности для системного анализа ситуаций. Показаны перспективы применения сложных границ областей притяжения и возникновения альтернативных

аттракторов. Таким способом, не меняя топологическую структуру аттракторов, при анализе ситуаций с воздействием можно получить сложные недетерминированные режимы динамики траектории итераций.

Методологическое отличие развиваемого автором монографии подхода к сценарному имитационному анализу состоит в разработке структуры представления модели эффективности восполнения биоресурсов, с применением которой можно описывать не просто функциональную зависимость в регуляции воспроизводства, но анализировать трансформации формы зависимости для исследуемых сценариев. Новизна изложенного метода состоит в том, что разработана не частная система уравнений и моделирующая зависимость, а предложен способ биологически обоснованного получения необходимой формы зависимости и её гибких трансформаций в имитационных сценариях с управляемым воздействием. Перспективность метода построения моделей заключается в применении схемы переключений стадий процесса к анализу регуляции иммунного ответа организма и описания цепочки реакций при активации Т-лимфоцитов вспомогательными иммунными клетками.

Предложенные методы при совместном их использовании предоставляют возможности для описания непрерывно-дискретных систем с событийными изменениями. События, управляющие поведением непрерывно-дискретной модели, связаны с моментами дискретного времени. Внутри каждого отрезка сохраняется упорядоченность вещественных чисел, так что свойство упорядоченности времени обеспечивается. В результате исследуется поведение дискретной составляющей траектории. Исследования основаны на положениях современной теории нелинейных динамических систем, теоремы Ли-Йорка и теории универсальности (Фейгенбаума, Коллета, Трессера [171]). В расчетах использованы методы склеенных вычислений, предложенные А.Ф. Филипповым.

Гибридная модель может казаться сложным объектом для экспертов, имеющих биологическое образование, но при переходе к дискретной динамике ситуации описываются более наглядно, чем при бифуркациях непрерывных моделей.

Приведено экологическое обоснование и примеры на основе реальных данных об эксплуатируемых популяциях для подтверждения достоверности полученных свойств зависимостей, примененных в анализе динамических сценариев развития нескольких вариантов кризисов при ведении промысла биоресурсов.

Выписанные системы дифференциальных уравнений используются не стандартным для традиционного вычислительного моделирования способом. Разработанные гибридные структуры с расширенными описательными возможностями применимы для имитационных вычислительных экспериментов с целью анализа развития кризисных ситуаций с изменяющимся воздействием.

В рамках развиваемой методологии гибридной модели биофизических исследований автором с применением разработанного метода решена задача сопоставления на основе изложенных идей и формальных методов оценки группы сценариев для разных кризисных ситуаций. Определены их этапы и

факторы развития. К концепции расширенного применения иерархического событийного времени и идее метода дополняемой базовой структуры уравнений модели приводит отмеченное рядом авторов наблюдавшееся сходство функциональной регуляции эффективности воспроизводства у популяций разных биологических видов, демонстрирующих схожие режимы изменения динамики численности.

Предложенные в главе построения вложенных кортежей иерархии событий и схемы правых частей уравнений будем обосновывать с точки зрения биологической теории этапности развития организмов и подтвердим для реальных примеров экологии популяций с использованием реальной статистики.

Развиваемый подход имеет больше перспектив практического применения при прогнозировании состояния биоресурсов, чем, например, очередные модификации систем Лотки-Вольтерра или Розенцвейга-Макартура со множественным распределенным запаздыванием [172], которые предлагались различными авторами. Разрабатываемый метод направлен на описание динамики воспроизводства и убыли популяции в различных меняющихся экологических условиях. Отражением взаимодействия нескольких ключевых факторов является вариативная форма получаемой в результате функциональной зависимости.

ГЛАВА 3. ПРЕИМУЩЕСТВА И ПРИМЕНИМОСТЬ ПРЕДИКАТИВНО ПЕРЕОПРЕДЕЛЯЕМЫХ МОДЕЛИРУЮЩИХ СТРУКТУР ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БИОСИСТЕМНЫХ ПРОЦЕССОВ

Осуществляя развитие методов системного анализа для экологических процессов, специальное внимание в монографии уделим реалистичности разработанных математических решений. Теоретическое обоснование и обзор известных экспериментальных примеров в работе требуется для подтверждения применимости моделей к важным реальным сценариям при экспертном регулировании в практике эксплуатации биоресурсов. Задачи системного анализа шире, чем построение адекватной модели процесса и включают комплексное изучение ситуаций, аспекты регуляции воздействия и принципы принятия решений. Для прогнозирования необходим поиск механизмов запуска кризисной ситуации и понимание ограничений в данной области исследования. Выделим в отдельный раздел обоснование для применения гибридных моделей с точки зрения биологического соответствия. Для согласования подходов к обсуждению сценариев быстро меняющихся экологических ситуаций и методов теории динамических систем необходимы подтверждающие материалы наблюдений.

Приведенные теоретические сведения и примеры графиков изменений численности и скорости размерного развития организмов будут интересны для специалистов в области экологии природопользования. В гибридных системах можно отразить, что непредвиденные ранее ситуации с резким нарушением выравненности биоразнообразия в изолированных ранее экосистемах могут возникать и при естественном изменении границ ареалов из-за климатических изменений или целенаправленной, но необдуманной интродукции видов.

Цель главы – продемонстрировать реальные экологические взаимосвязи, которые возможно качественно описывать и формально анализировать предложенными методами построения модели динамики убыли поколений. В главе 3 выделим и обсудим несколько реальных примеров возникновения нелинейности в экологической регуляции популяционных процессов. Описательные возможности разработанного метода моделирования подтверждены примерами с фактическими данными. Одна из отличительных обобщающих методических идей работы – использовать для анализа неясных экспертам причин возникновения ситуаций популяционных кризисов и неверных решений схожие по динамическим признакам примеры подобных событий. Для большей достоверности вычислительных решений устанавливаем параметрические границы биологической интерпретации поведения траектории для всех модификаций предложенных моделей и имитационных сценариев.

Для рассмотрения ситуаций коллапса запасов, выявления ошибок при принятии решений актуально изучать ситуации-прецеденты *как динамические аналогии*. Это математически оправдано. Существует конечное число изменений режимов поведения динамических систем, из которых составляется сценарий.

С целью результативного применения метода моделирования в биологической области (популяционной, эколого-физиологической, генетической тематике) необходимо развивать теоретическое обоснование и проводить сопоставления исследований в предметной области. Помимо теории в третьей главе приведены подтверждённые наблюдения за реальными объектами примеры. Сопоставляя ряд примеров конкретных экологических ситуаций, можно сделать вывод о правильности использованных в популяционных моделях гипотез и способов формализации. Последовательно акцентируем внимание на анализе *качественных* изменений в развитии популяционных процессов, известных по данным наблюдений.

Трактовки сущности развития ситуации и роли факторов в литературе часто могут различаться, но в арсенале математической биофизики применяют методы для проверки гипотез. Противоречивые мнения специалистов об исследуемой ситуации не должны останавливать разработку модели. Методом построения диаграмм и когнитивных графов влияния можно оценить и выбрать более правдоподобную из конкурирующих гипотез, так как противоречия аргументации станут очевидны.

Например, если рассматривать противоречия в рыбохозяйственной отрасли, где негативно действует некоторый естественный природный фактор, а промысел по этой гипотезе не был чрезмерным, то тогда этот фактор действует не только на промысловую популяцию. Интенсивный вылов (по терминологии промыслового рыболовства – «перелов») запускает цепь изменений, которые можно своевременно выявлять и использовать при обосновании решений. Убыль доминирующего вида хищника часто приводит к изменению возрастной структуры популяции жертв. Известны ряд косвенных признаков перелова, выявляемых по изменениям в размерно-возрастной структуре популяции. При противоречивости мнений специалистов о ключевых факторах динамики запасов в моделях целесообразно воспользоваться сопоставлением ситуаций аналогов.

Выбор наиболее подходящей из всех возможных функциональных зависимостей эффективности воспроизводства для моделирования исследуемого сценария будет основан на согласовании нескольких факторов. Далее обсудим прецеденты существования форм сложной и трансформируемой зависимости эффективности воспроизводства с экстремумами, способы выявления которых представляет отдельную задачу. Выявленные примеры не уникальны в экологии популяций и значимы для исследования динамики схожих ситуаций, когда у экспертов не имеется данных мониторинга о воспроизводстве деградировавшей популяции (только ретроспективные сравнения объема уловов и среднего возраста запаса, приблизительная оценка общей численности).

3.1. АНАЛИЗ ПРИМЕРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ И ПОРОГОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОСПРОИЗВОДСТВА ПОПУЛЯЦИЙ

Приведем ряд примеров из практики наблюдений за популяционными изменениями с целью подтвердить обоснованность полученных в главе 2 модельных результатов с экологической точки зрения на реальных данных.

Привлечен большой массив данных из различных источников, в том числе личных архивов. Проведен поиск материалов, отражающих реальные популяционные процессы, как из научных статей, так и из отчетов организаций Канады и Норвегии, которые были ответственны за научное обоснование квот промысла и потом анализировали причины, повлекшие вынужденное прекращение рыболовства. Сведения о популяционных изменениях, квотах вылова и способах учета численности волжских популяций собраны во время работы в Каспийском НИИ рыбного хозяйства в 2001–2003 гг.

Многие сложные ситуации в динамике популяций объясняются нелинейными зависимостями в регуляции воспроизводства. Специалисты обратили внимание достаточно давно на нелинейный характер регуляции. Отмечались резкие изменения в динамике популяционных процессов, проводящих как следствие к сложным неунимодальным (функции с несколькими экстремумами) формам зависимости в эффективности воспроизводства от состояния запаса. В работе [173] на основе построения зависимости «родители/потомки» (в английской литературе связь называется «stock recruitment» – запас/пополнение) определялись биологические ориентиры регуляции промысла кеты и нерки. Авторы [173] предлагают рекомендации по управлению ресурсами тихоокеанских лососей в бассейнах рек Чукотского автономного округа без использования имитационного моделирования динамики популяций, анализируя графики зависимости «родители/потомки», построенные по имеющимся данным о промысле.

Специалисты в промысловой ихтиологии предпочитают более понятные для них методы расчетов, чем анализ решения систем дифференциальных уравнений, что мы учитываем в данной работе. Потому рекомендации о признаках высокого риска развития кризисов (коллапса) запаса для их предотвращения после анализа вычислительных сценариев составим без использования терминологии теории бифуркаций и критериев устойчивости.

3.1.1. О роли неточности в исходных оценках состояния биоресурсов

Моделирование функциональной связи запаса и пополнения при воспроизводстве популяций для задач регуляции эксплуатации биоресурсов – это достаточно популярная область исследований и наработанная методика оценки перспектив промысла, но имеющая много противоречий при обсуждении с точки зрения теории нелинейной динамики.

Специалисты хорошо понимают и недостатки методов и неточность их оценок запасов. В работе Ю.С. Решетникова и В.Г. Терещенко [174] отмечается актуальность оценки ошибок количественных исследований в экологии промысловых рыб и приведена классификация источников возникновения

погрешности. Подход следует известному тезису работы [175] 1969 г. «Об ошибках в применении математики в биологии» – «точные науки называются точными не потому, что они достоверны, а потому, что в точных науках ученые знают меру неточности своих утверждений». Часто действительно трудно оценить меру погрешности данных, которыми оперируют эксперты по промыслу.

Главное, о чем говорят упомянутые работы экологов – систематические составляющие погрешности наблюдений не уменьшаются с увеличением объема выборки. Например, часто исходные данные для прогнозов оказывались полученными путем аппроксимации случайных уловов. В своих прежних работах автор уже высказал мысль о том, что лучше бы оценки общей численности осетровых рыб Каспия контрольными тралениями не проводились, так как использование таких данных при принятии решений и прогнозировании допустимых уловов принесло много негативного вклада в итоговый кризис запасов. Есть некоторый уровень погрешности и ошибок, при котором информация о ситуации любой природы совершает качественный переход и становится дезинформацией. Отметим, что часто эксперты понимают всю недостоверность доступной им информации об объекте, но используют их в своих выводах за отсутствием иного материала.

Эксперты могут получить информацию, что существует якобы огромная численность резерва не вступивших сейчас в промысловый возраст поколений и оценить текущее сокращение уловов как временное случайное явление. Заявлять о системном истощении биоресурсов в условиях рыночной экономики рискованно. Не многие специалисты готовы выступит в роли пророка бед, и предвещать кризис промысла с неминуемыми убытками и добиваться необходимого моратория, что естественно затрагивает доходы.

По нашему мнению, проблема прогнозирования воспроизводства осложняется тем, что построить реальный график, где можно увидеть такую зависимость, достаточно сложно. О возможности появления двух максимумов на кривой писал в основополагающей работе Рикер, но без реального графика примера [65]. Рикер предлагал методы для обнаружения предложенной им куполообразной формы кривой воспроизводства. Многие авторы экологи ищут подтверждения именно их теории. Проводят поиск образа предложенной ими модельной формы зависимости на графиках. Во-первых, как мы писали ранее, увидеть непосредственно в явном виде зависимость на графике будет редким и специфическим случаем, так как популяция имеет свойство диссипативной динамики – предполагается стягивания траектории к некоторому подмножеству. Во-вторых, наш метод подразумевает получение разнообразия форм нелинейной зависимости, и мы ранее продемонстрировали часть возможностей. В-третьих, следствия нелинейных эффектов могут быть очевидны на графиках промысловой статистики по другим признакам. Есть все основания предположить ключевые свойства зависимости, не наблюдая при этом образ самой кривой зависимости на графиках с данными, если имеется длительный ряд с данными (так как можно использовать скользящую среднюю с усреднением по двум соседним точкам) на плоскости запас-пополнение с прорисованной траекторией. По свойствам перемещения траектории по фазовой плоскости вполне об-

основано делать выводы, например, о наличии эффекта цикличности или локального экстремума эффективности воспроизводства.

3.1.2. Особенности зависимостей воспроизводства с тремя экстремумами

В следующих разделах обсудим качественные формы реальных кривых воспроизводства. Они отражают действие внутривидовой регуляции и влияют на динамику популяций не только промысловых видов рыб. Данные примеры шаблонных форм служат основой для классификации типов нелинейных зависимостей, основные особенности которых мы сможем моделировать предложенными методами и использовать в сценарном анализе в главе 4.

Р. Петерман из регулярных наблюдений об уловах горбуши *Oncorhynchus gorbusha* в реках Тихоокеанского побережья Канады сделал вывод о действии на динамику промысловой популяции рыб сложной зависимости [176]. По его выводам такая зависимость имеет два максимума и три не тривиальных стационарных состояния рис. 3.1. Устойчивость стационарных точек итераций для такой функции чередуется – первая и третья при большой численности будут устойчивыми равновесиями, а промежуточная между ними граничной неустойчивой точкой (репеллерной от to repel – отталкивать).

Промысловое воздействие сдвигает на графике функции воспроизводства положения устойчивого и неустойчивого равновесия навстречу друг другу и эти две точки сливаются в одну, которая будет неустойчивой.

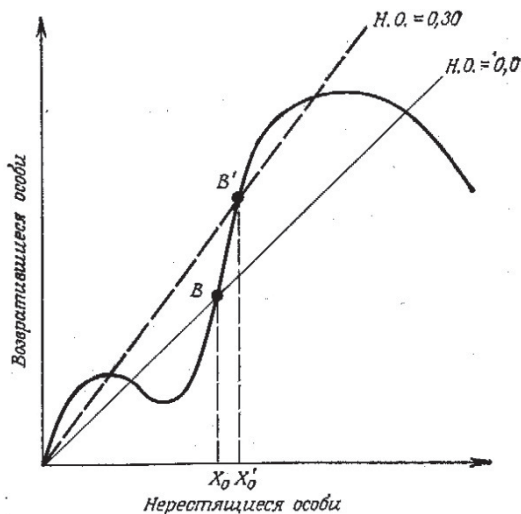


Рис. 3.1. Зависимость эффективности воспроизводства горбуши реки Скина (Британская Колумбия) с тремя стационарными точками, сдвигающимися под действием промысла [176]

При интенсивном вылове, превышающим рациональный уровень, останется только малая устойчивая стационарная точка. Далее популяция пе-

рейдет в малочисленное состояние, и переход в другую область притяжения по такой кривой к большему равновесию будет невозможен после остановки промысла.

Как отмечено в работе Петермана, оптимизация промысла для такого объекта промысла опасна и требует адаптивной стратегии управления «изменение размера областей стабильности пропорционально уровню эксплуатации и определенные уровни эксплуатации с максимальным устойчивым уловом (называется стратегия MSY) неизбежно близки к уровням, которые вызвали бы резкое сокращение численности популяции». У Петермана не было реальной математической модели, описывавшей представленный им эффект двух состояний с граничной точкой. Разработанная в главе 2 вычислительная структура может описывать данную форму кривой воспроизводства горбуши, так как задача для нашей модели получения нужной формы сводится к техническому подбору параметров. Мы показали выше более сложный вариант поведения с альтернативными циклами. Существование малого цикла зависит от положения функции в точке $\min f(x)$, при повышении минимума вторая итерация не получит стационарных точек пересечений с биссектрисой, а при понижении значения в минимуме ниже репеллерной точки $f(\min f(x)) < R_1^*$ область притяжения цикла пересечется с областью притяжения тривиального равновесия, это эффект граничного кризиса. Большой цикл существует, потому что у полученной функции три прообраза точки максимума, а не два, как в унимодальных зависимостях.

Предложенная на рисунке зависимость отображает простой сценарий быстрого промыслового кризиса как пути в один конец. Общая проблема методов теории катастроф – однонаправленность описываемых ими резких изменений. Если деформируемая с разрушением балка заведомо не может восстановить свое положение сама, то движение в биосистемах редко бывает однонаправленным. Запас прочности биосистем в их адаптивности. Они долго эволюционировали.

Фактически в обсуждаемом примере представлен вариант образования реликтовой малочисленной, но стабильной популяции. В природе должны быть естественные механизмы регенерации численности, тем более можно ожидать для видов с большой плодовитостью, к которым относятся рассматриваемые в этом примере его автором крупные лососевые рыбы с коротким жизненным циклом. Для многих лососевых рыб характерны смены длительных периодов депрессии и высокой численности, смены таких периодов происходят и без вмешательства промысла. С другой стороны, некоторые запасы деградируют в исторической перспективе безвозвратно, тогда виды признают официально вымершими, как китайский веслонос и малый амударьинский лопатонос.

Для подтверждения, что зависимость в эффективности воспроизводства между исходным нерестовым запасом и получаемым поколением лучше всего привести реальные обработанные нами данные наблюдений. Автору удалось подтвердить существование сложной зависимости с несколькими экстремумами по результатам анализа скользящим средним данных о миграции молодежи рис. 3.2, на основе собиравшихся сведений о нересте волжских популяций рыб семейства Acipenseridae, опубликованные в [177],

[178], в представленной к защите докторской диссертации П.В. Вещева и в материалах отчетных сессий. Наиболее математически интересна зависимость, которую автор выявил для волжской севрюги *Acipenser stellatus*.

Запас-пополнение севрюги (среднее по трём соседним)

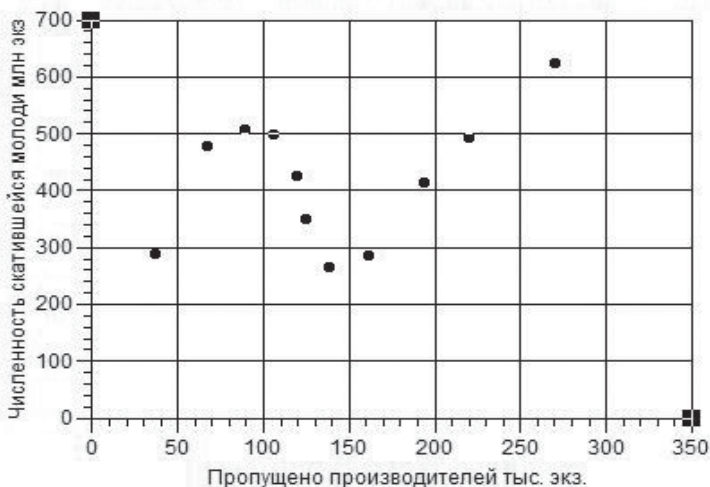


Рис. 3.2. Полученная методом скользящего среднего зависимость по данным о воспроизводстве (миграции молоди в реке) волжской севрюги *Acipenser stellatus*

Данные о воспроизводстве волжских рыб оказались уникальными. Обнаружить аналогичную информацию автору не удалось. Подавляющее большинство исследований связано с влиянием абиотических факторов на воспроизводство. Волнообразная зависимость с эволюционной точки зрения выглядит странной, но учтем, что гидрологический режим Нижней Волги резко изменился с 1950 г. после строительства Волгоградской ГЭС.

Интересно отметить, что специалисты, собиравшие данные мониторинга за нерестом в Волге сами не использовали методики теории формирования пополнения, и зависимости в форме кривых воспроизводства не попытались построить. Рассчитанный ими коэффициент корреляции между величинами запаса и численностью скатывающейся молоди был невелик. Отсутствие значимой корреляции естественно из-за сходства участков графика с симметричной параболической формой. Как показал наш анализ, построенная зависимость по данным для севрюги имеет два максимума. Полученная автором форма кривой с промежуточным минимумом качественно отличается от аналогичных данных для воспроизводства волжского осетра, где была продемонстрирована куполообразная зависимость и белуги с асимптотической.

В данной исследовании удалось увидеть форму зависимости не только потому, что длительное время учеными коллегами собирались данные о естественном воспроизводстве. Популяции каспийских осетровых медленно деградировали от перекрытия миграционных путей и хищнического промысла, который не был вовремя остановлен. Популяция была под из-

быточным давлением. Искусственный выпуск молоди, как автор показал в работах ранее [179], принципиально не был в состоянии восполнить потери от промысла.

Возможно, если бы такая зависимость была бы построена кем-то из экспертов ихтиологов раньше, например, в работах проводившего мониторинг волжских нерестилищ П.В. Вещева, то можно было бы обосновать необходимость моратория на промысел в Волге. Однако, ихтиологами использовался поиск корреляционных взаимосвязей, а для куполообразных форм корреляция весьма незначительна. По целому ряду причин и стечению обстоятельств явные нелинейные эффекты в воспроизводстве этих рыб не были вовремя выявлены специалистами и не послужили обоснованием для срочного моратория.

Отметим, естественное воспроизводство севрюги и так резко сокращалось с начала 1990-х гг., искусственный выпуск не показал ожидаемой эффективности [180]. Повышение «водности половодья» по сравнению с маловодными годами Волги в 1970-х гг. не стало решающим фактором для увеличения пополнения. Научные основания для введения моратория на промысел были явными к 1999 г.

Анализ принятия решений в экономике природопользования задача не только про сложные аспекты информированности и выбор рациональной альтернативы. Ситуация включает и мотивацию, и волю у обосновывающих необходимость принятия данного решения экспертов, которое для них может быть очевидно и *стратегически рационально*, но необходимое по всем критериям решение оказывается вдруг нежелательно по хозяйственным и сиюминутным причинам.

3.1.3. Куполообразная форма с пороговым эффектом в эффективности воспроизводства

Схожий по сути пороговый эффект был установлен нами и для воспроизводства волжского осетра с использованием метода скользящего среднего для обработки в плоскости запас-пополнение данных мониторинга за нерестом рыб [181], опубликованных в работах ихтиологов Довгопол Г.Ф., Вещевым П.В., Гутеневой Г.И [182]. На рис. 3.3. автор при анализе данных выявил пологую ниспадающую правую ветвь после выраженного максимума. Это очень выгодная для ведения длительного промысла зависимость.

Сложность нелинейности полученных зависимостей воспроизводства мы объясняем существованием внутрипопуляционных группировок у осетровых рыб, что является эволюционной адаптацией для эффективного размножения в условиях ограниченности речных нерестилищ. Однако, данная адаптация была выгодна до перекрытия миграционных путей в реках. Теперь длительные миграции увеличивают риск гибели рыб до оставления потомства.

Осетровые заходят на нерест и весной и осенью (озимые и яровые расы), зимую в реке. Это существенно повышало жизнестойкость вида и позволяло отдельным группам избегать промысла. Они заходили на нерест раньше или

позже основного потока рыб. Потому для анадромных рыб помимо объема вылова важно определять и сроки лова (промысловой путины). Имеет смысл каждой субпопуляционной группе (нерестовой расе) оставлять шансы на размножение.

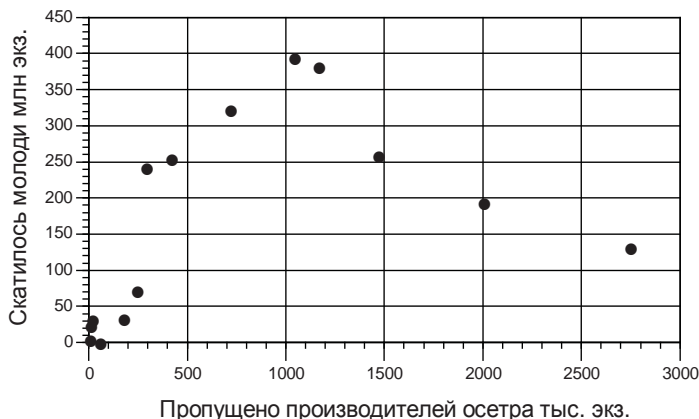


Рис. 3.3. Выявленная автором кривая эффективности воспроизводства популяции волжского осетра с пороговым эффектом

График подтвердил, популяция осетра отличалась большим запасом стабильности, но была истощена хищническим выловом. При менее чем 300 т пропущенных производителей на нерест численность молоди в реке непропорционально уменьшается. По данному графику можно оценить величину минимально необходимой нерестовой группы, но обеспечить на практике её пропуск на нерест не столь просто, когда общая величина заходящего на нерест в реку стада остается неизвестной величиной. Сведение о пропуске особей на нерест получены при ведении промысла в створе реки. Путем аппроксимации уловов в неводе рассчитывают суточный ход рыбы в створе реки. Без ведения промысла нет возможности получать данные о динамике нерестовой миграции и возрастных и размерных характеристиках запаса. Для учета численности рыб необходимо развивать средства гидроакустического наблюдения, но такие способы плохо работают для рыб, ведущих придонный образ жизни.

Автор работы осуществил поиск литературных данных о реальной динамике различных популяций. Данная работа по моделированию воспроизводства рыб и системного анализа деградации запасов не получила бы экологического подтверждения без результатов мониторинговых наблюдений за волжскими популяциями, полученных П.В. Вещевым и Г.И. Гутеновой [183]. В архивах КаспНИРХ (теперь астраханский филиал ВНИРО) хранятся другие ценные данные о популяционной динамике, которые никак не используются для моделирования и анализа популяционных взаимосвязей. Для осетровых рыб метод установления формы зависимости $R=f(S)$ запас-пополнение ранее не применялся по причине малого коэффициента корреляции между запасом и количеством молоди, но зависимость, очевидно, существует и она нелинейная.

Используем одну переопределяемую структуру с триггерной функцией в первом уравнении убыли численности:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha w(t)N(t) + \theta(S)\beta)N(t), & 0 < t \leq \tau \\ -(\alpha_1 N(\tau)/w(\tau) + \beta)N(t), & t > \tau, \quad w(t) < w_{k1} \\ -(\alpha_2 w(t)N(t))N(t - \zeta), & w_{k1} < w(t) < w_k. \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N^k(t) + \zeta}. \end{cases}$$

Разработанный нами метод представления модели позволяет для задач СА получить кривую воспроизводства при численном решении уравнений убыли на интервалах времени для всех допустимых исходных значений численности запаса с нужными для данной ситуации свойствами. В результате получили куполообразную кривую воспроизводства с пороговым эффектом рис. 3.4., создающим точку-репеллер R_1^* при неустойчивом большем равновесии R_2^* вдали от максимума. Аттрактором правой области притяжения итераций такой функции будет единственный цикл с периодом два. Однако, при изменении формы у такой зависимости из-за экстремумов могут появляться альтернативные циклы длины периода два – из двух точек, которые являются стационарными точками для старших итераций. Экстремум максимум функции у ее старшей четной итерации отобразится в минимум, а в точках-прообразах максимума функции появятся максимумы и старшей итерации.

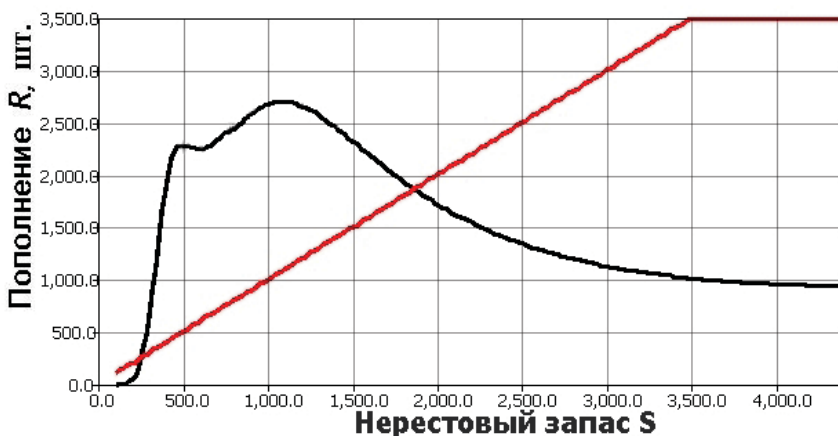


Рис. 3.4. Кривая воспроизводства полученная в разработанной модельной зависимости, обладающая циклическим поведением траектории итераций

Полученная разработанным методом модельная зависимость, которую мы целенаправленно построили на основе сведений о реальном воспроизводстве волжского осетра, обладает сглаженной куполообразной формой с высокой горизонтальной асимптотой. При существовании циклического

режима кривая с «деформацией» не удовлетворяет критериям упомянутой в главе 1 теоремы Дж. Синждера [95] и не демонстрирует хаотизацию с образованием канторовского аттрактора. Зависимость предполагает циклическую популяционную динамику, и это важный сущностный вывод – популяции свойствен колебания с длительным периодом, что не было никем учтено ранее в прогнозах.

Поведение траектории итераций зависимости с тремя экстремумами качественно сложнее. На графике для севрюги заметно действие порогового эффекта Олли – непропорционально резкого снижения численности молоди после уменьшения численности запаса ниже 60 тыс. особей и подобная особенность критически важна при принятии экспертных решений по квотам.

Интересно, что критическое положение численности запаса отмечалось для популяций гораздо раньше, чем были научно описаны явления, получившие название коллапса запасов. Подобный пример автор обнаружил в классической книге Г.В. Никольского [184], продемонстрированный на примере черноморской хамсы. Данные показаны на диаграмме с биссектрисой рис. 3.5.

По датам у точек мы можем предположить аperiodическую динамику со значительной амплитудой. Прогнозирование подобной динамики популяции с эффектом Олли очень сложно и математически, и практически предвидеть пороговый эффект нереалистично.

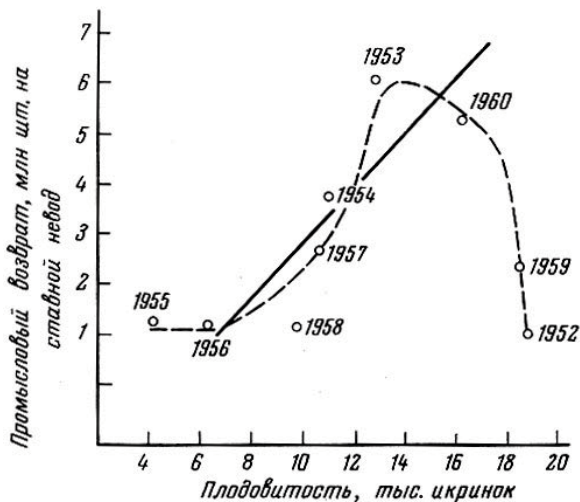


Рис. 3.5. Зависимость числа отложенных икринок и промышленного возврата для черноморской хамсы с эффектом Олли из книги Никольского [184]

Данная популяция с показанной на графике кривой воспроизводства обладает гораздо меньшим запасом стабильности, чем русский осетр Каспия.

Так как на графике в книге Никольского приведены данные о годах наблюдений, то отметим, что популяционная динамика для данного запаса отличается аperiodической нестабильностью. С точки зрения теории хаотизация траектории в некотором подмножестве позволит увидеть форму

зависимости в этой замкнутой области при длительном наблюдении. Траектория заполняет точками эту подобласть, но нельзя сказать, что заполнение равномерно, так как динамический хаос далеко не белый шум, у хаотического движения другие статистические свойства.

Гораздо чаще из имеющихся данных трудно сделать вывод о существовании какой-то именно строгой выраженной формы зависимости, когда динамика выглядит стохастической или аперiodической, как разбросанные данные мониторинга на рис. 3. 6. Восстановить функцию по зашумлённой динамике порождаемой ей траекторией и с учетом промысла тут задача бесперспективная.

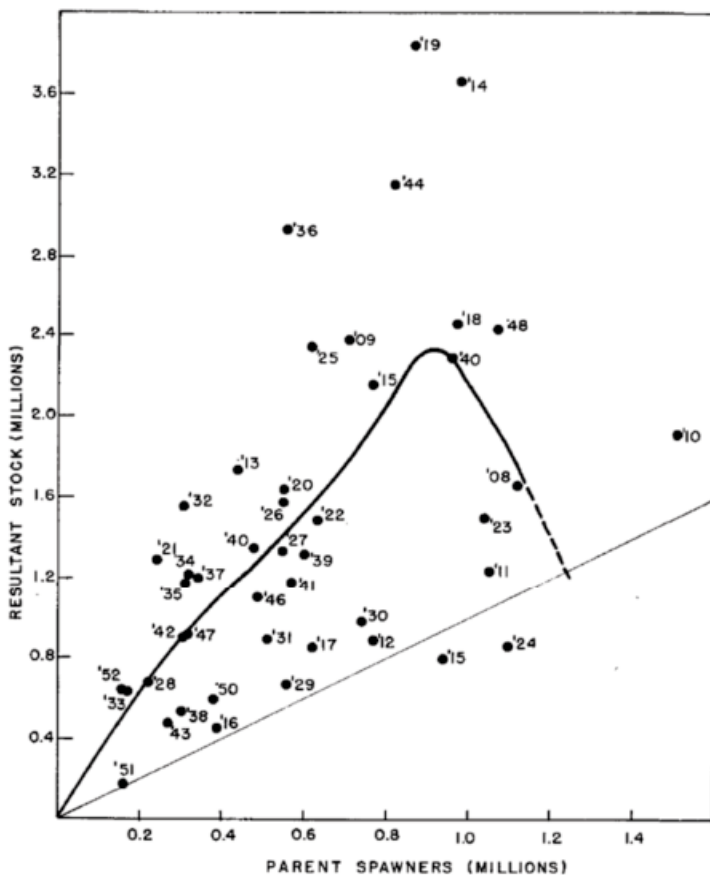


Рис. 3.6. Данные на графике запаса и пополнения для воспроизводства популяции нерки из [185]

Тут показаны в плоскости запас/пополнение данные о популяции нерки *Oncorhynchus nerka* в одной из рек Британской Колумбии с попыткой аппроксимации нерегулярно расположенных точек. Аперiodичность динамики – не значит отсутствие зависимости, так как хаотизация вполне может вытекать из сложных форм функциональных кривых. Аппроксимация

методом наименьших квадратов тут не сможет установить динамические свойства, лучше использовать метод скользящего среднего и восстановить траекторию. Построенная кривая по сгущениям точек в данном примере практически бесполезна, в окрестности равновесия, где биссектриса пересекается с гипотетической функцией воспроизводства, в данном примере совсем нет точек траектории. По имеющимся данным поведение биосистемы имеет аperiodический и флуктуационный характер. Некоторые точки выпадают из общего тренда, что часто случается из-за возмущающих внешних факторов среды. Динамику популяций, которая характеризуется переходами к флуктуациям, нужно моделировать специальными методами. Далее мы покажем, что развитие сценария коллапса с колебаниями по возникающим нелинейным эффектам принципиально отличается от последовательного сокращения численности родительской части популяции. Эти сценарии требуют разных моделей.

3.2. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РОЛИ И ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ В РАННЕМ ОНТОГЕНЕЗЕ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ)

Теория формирования пополнения промысловых популяций и идея построения кривых воспроизводства для прогнозирования допустимых улов базируется на связи смертности и избыточной (или недостаточной) численности. Влияние факторов исходной плотности особей на выживаемость гидробионтов установлено и достаточно хорошо документировано для разных видов и статистическими и экспериментальными методами. По данным из [186] соотношение живых и мёртвых зародышей в буграх перед их выходом из грунта для лососевых рыб изменяясь от 44 до 92% в зависимости от условий в местах размножения и плотности производителей.

Интересные экспериментальные исследования по выяснению влияния плотности на выживаемость особей видов со стадийным развитием проводились отечественными учеными. В работе Е.В. Дмитриевой [187] рассматривалось в лабораторных условиях влияние плотности икры на темпы развития и смертность серой жабы (*Bufo bufo*). В этой работе экспериментально показаны два вида зависимости выживаемости эмбрионов от плотности икры в лабораторном аквариуме. В первом случае найдена монотонная зависимость: с увеличением плотности увеличивается и эмбриональная смертность поколения. Во втором случае исследуемая зависимость имеет выраженный пороговый характер, тогда возникает второй максимум выживаемости эмбрионов уже при повышенной плотности. Данные результаты подтверждают ранее приведенные нами графики.

В работе белорусских ученых [188] исследовано влияние плотности посадки на рост и выживаемость речной креветки, на рис. 3.7. показаны полученные ими кривые выживаемости для аквариумов с высокой, средней и малой плотностью вылупляющихся креветок при одинаковой кормовой базе. Зависимость от исходной динамики убыли от исходной численности

очевидная, но в этих экспериментах не присутствовали хищники. Именно подобные убывающие кривые порождают решения используемых нами дифференциальных уравнений убыли численности. Зависимость, которую называю «кривая воспроизводства» на плоскости величин запаса и пополнения, формируется из совокупности всего множества решений для допустимых начальных условий из ограниченного справа подмножества натуральных чисел.

Опыты проводились с водными организмами, пригодными для лабораторного выращивания в аквариумах при различной плотности. Исследование подтвердило сильное влияние плотности особей вида креветок *Macrobrachium nipponense* на убыль их численности и рост организмов. В изолированной группе особей с высокой исходной плотностью итоговая выживаемость составила менее 40% и коррелировала с низкими темпами роста.

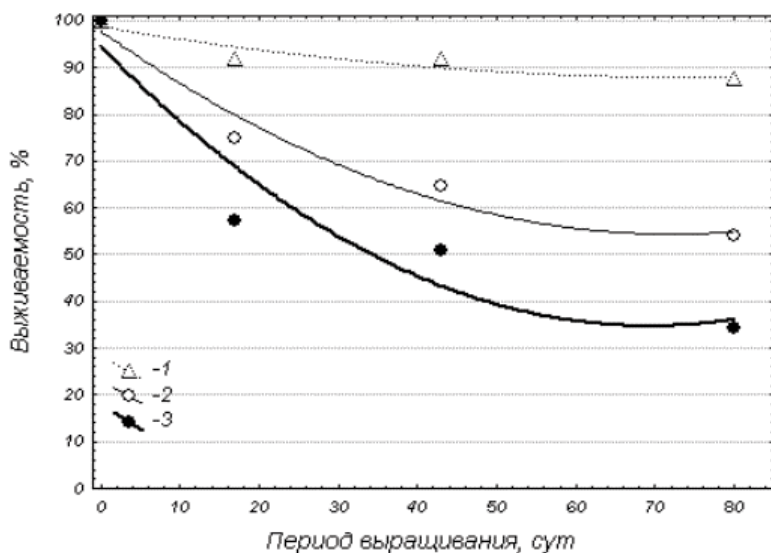


Рис. 3.7. Влияние исходной плотности на выживаемость особей креветки в трех лабораторных экспериментах по данным [188]

Выявленные экспериментально изменения выживаемости на ранних стадиях развития гидробионтов, которые связаны с *биотическими* факторами условий воспроизводства (конкуренция, каннибализм), будут критическим образом сказываться на популяционной динамике промыслового запаса. Наблюдаемое явление подтверждается разработанными нами методами моделирования динамики популяций, основанными на формализации внутривидовых конкурентных и биотических механизмов регуляции итоговой численности половозрелого поколения. Влияние абиотических факторов учитываем в моделях поправочными коэффициентами, имеющими значение 1 при оптимальных условиях размножения и больших единиц при росте отклонения от оптимума.

3.3. АНАЛИЗ ЗАВИСЯЩИХ ОТ ПЛОТНОСТИ ФАКТОРОВ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ПРИ РАЗВИТИИ ВСПЫШЕК НАСЕКОМЫХ ВРЕДИТЕЛЕЙ

Монография, обобщающая длительно проводимые автором исследования, посвящена не только проблеме эксплуатации водных биоресурсов, но охватывает проблематику системного характера – проявления нелинейных и пороговых явлений в очень разных биосистемах. Далее мы будем анализировать общность их механизмов регуляции, определяющую сходство динамики популяционных изменений для разных биологических видов, которые будем формально описывать в сценариях с применением гибридных динамических систем.

По имеющимся в литературе сведениям, плотность исходного поколения влияет на выживаемость в раннем онтогенезе не только у рыб и ракообразных гидробионтов, но и у насекомых разных семейств. Эффект подтвержден лабораторными экспериментами в работе [189]. Зависимость выживаемости от численности отмечалась для многих видов с выраженной стадийностью развития, но из-за действия различных биотических факторов. Изменение выживаемости у насекомых вредителей (помимо абиотических факторов) зависит от плотности особей из-за атак специфических паразитов, поражающих скопления яиц и личинок. Несколько видов таких атакующих яйца паразитических ос специально выращивают и успешно используют для биологической борьбы с бабочками вредителями в момент, когда чешуекрылые начали размножение. Способность к обнаружению кладок паразитической осой *Trichogramma evanescens* повышается по мере увеличения их плотности.

В работе [190] проведены полевые эксперименты с тремя видами паразитических перепончатокрылых. Паразитов выпускали при различной плотности скоплений яиц их жертв. Было показано повышение эффективности атак ос при высокой плотности яиц жертв – бабочек вида *Plodia interpunctella*.

В работе [191] были разработаны простые лабораторные тесты для оценки потенциальной эффективности паразитической осы *Trichogramma sacosae* для целенаправленной биологической борьбы с мотыльком *Lobesia botrana*, основным вредителем виноградников. При различных плотностях яиц листовертки на опытных участках были изучены уровни обнаружения яиц *Lobesia botrana* и подтвердили зависимость от плотности поведенческую реакцию паразитов. Сильная «плотностнозависимая» реакция на скопления характерна именно для ситуации искусственно интродуцированного естественного врага. Аналогичные результаты с поражающей способностью, зависимой от плотности целевой популяции, получены не только для выпускаемых ос-паразитов, но и при использовании гриба-нематофага *Verticillium chlamydosporium* в борьбе против популяции южной галловой нематоды, повреждающей корни растений [192].

Для насекомых отмечено действие аналога демографического эффекта Олли под названием «mate-finding Allee effect» в работе [193], связанного

с трудностью поиска партнера для размножения (у многих видов бабочек самки плохо летают) на больших площадях при малой плотности и, как следствие, ухудшением эффективности воспроизводства. Во время вспышек численности насекомых естественным образом наблюдаются противоположные триггерные эффекты зависимости от чрезмерной плотности и истощении ресурсов.

На графике рис. 3.8. показана удельная эффективность (в расчете на одну самку) воспроизводства лабораторной популяции мучного жука *Tribolium confusum* при разной численности взрослых особей [194].

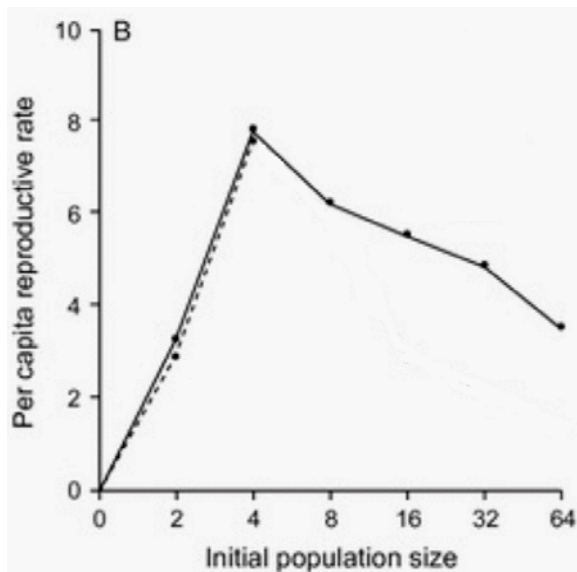


Рис. 3.8. Зависимость удельной эффективности воспроизводства в опытах с насекомым *Tribolium confusum* в [194]

Из приведенных примеров экспериментальных данных о воспроизводстве очевидно существование репродуктивного оптимума численности. Однако, популяция как динамическая система вряд ли оказывается в равновесном состоянии при максимально эффективном воспроизводстве. Равновесное состояние популяции (или устойчивый цикл) в реальных условиях оказывается расположенным явно правее максимума эффективности воспроизводства.

Паразитов или хищников не было в данных опытах с насекомыми, в форме нелинейности репродуктивного потенциала проявляется действие конкурентных факторов, а для некоторых видов наблюдается активный каннибализм в отношении преимагинальных стадий. Можно отметить, что приведенный пример взят из лабораторных условий. Воспроизводство насекомых в бореальных экосистемах, безусловно, сильно зависит от переменчивых климатических факторов, потому применение детерминированных моделей проблематично и резкие изменения можно связать с погодными обстоятельствами. Смежные поколения размножаются в разных условиях. Для анализа

ситуаций всплеск используем другие реальные примеры. Существуют интересные документированные примеры развития экстремальных популяционных процессов в вечнозеленых лесах, где условия относительно постоянны. В таких ареалах у насекомых нет разделения на зимующие и весенние поколения.

Таким образом, для задачи анализа сценариев экстремальных изменений в динамике насекомых потребуются применение в переопределяемой модели двух противоположных по смыслу разных триггерных функций и на разных стадиях. Второй триггер должен срабатывать в момент достижения предельно возможной численности на пике популяционной вспышки. Для насекомых потребуются несколько модифицировать уравнения с предикатами, сохраняя сам принцип построения. Динамику смены стадий развития насекомых можно привязать к интервалам времени. Стадий развития у насекомых либо три, либо четыре, в зависимости от вида: с полным или неполным циклом превращений. Отличаются наличием стадии куколки. Так как на стадии куколки нет активного питания и роста. Следовательно, феноменологически целесообразно будет объединить в модели убыли численности эту стадию с предыдущей.

Приведенные результаты исследований позволят нам биологически обоснованно использовать разработанные методы представления модельной структуры не только для моделирования гидробионтов, но и для анализа изменений численности видов других таксономических групп с выраженной стадийностью развития. Наибольший практический интерес представляет получение модельного описания сценария экстремальных изменений численности для популяций насекомых вредителей леса – кратких всплеск.

Динамика взаимодействия насекомых вредителей и их специфических паразитов представляет отдельный интерес для анализа адаптивного противодействия, который можно выполнить другими методами моделирования – используя непрерывные модели с отклоняющимся аргументом.

3.4. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕМПОВ РОСТА ЮВЕНИЛЬНЫХ СТАДИЙ РЫБ И ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЯ

В современных работах часто построить математическую модель в форме системы уравнений для вычислительного анализа оказывается более простой задачей, чем подтвердить адекватность её свойств. Для оценки реалистичности модели необходимо установить степень соответствия свойств экологическими наблюдениям. Нами в модели использована взаимосвязь динамики численности поколения и темпов роста. Для многих не заботящихся о потомстве видов – это до сих пор малоизученный вопрос, требующий дополнительных исследований особей в раннем онтогенезе. Классические работы о динамике роста посвящены обменным процессам и влиянию на них внешних факторов [161, 195]. Результаты, полученные в искусствен-

ных условиях выращивания интересны, но представляют специфический случай. При развитии метода представления гибридной структуры для моделирования мы использовали перестраиваемую в зависимости от стадий развития формализацию уравнений для скорости роста.

3.4.1. Экспериментальные подтверждения зависимости динамики убыли численности, плотности поколения и темпов роста

Существуют экспериментальные подтверждения заложенной в основу модели с двумя гибридными структурами гипотезы, что многие виды крупных рыб в ранних стадиях онтогенетического развития дважды резко изменяют темпы весового прироста. В работе А.В. Русакова с соавторами значения пороговых w для возрастных стадий определены на примере плотвы [13].

Подобные реальные наблюдения, показывающие динамику с двумя точками резкой перемены скорости роста особей, приведены в работе [196] для роста молоди одного из самых крупных морских хищников – тёмного групера *Epinephelus marginatus* рис. 3.9. Очевидно по графику, что при формировании организма и перехода на хищничество рост резко ускоряется дважды.

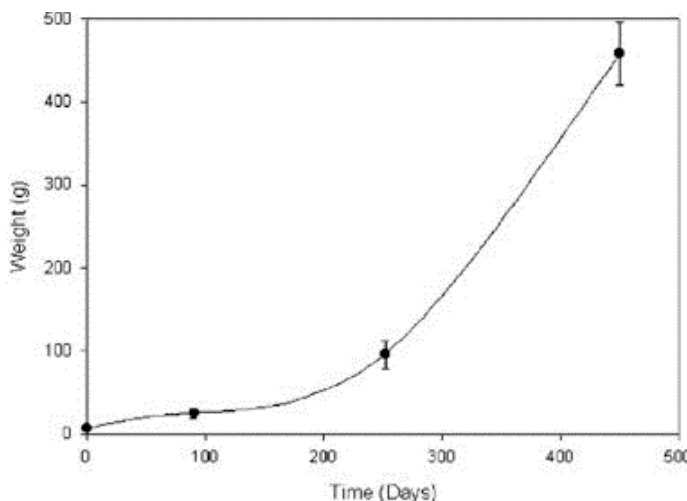


Рис. 3.9. Динамика скорости роста молоди групера *Epinephelus marginatus* [196]

При половом созревании скорость роста замедляется. В пределе до достижения максимально возможного возраста жизни для взрослого организма рыб динамика роста представляет асимптотическую S-образную кривую. В нашем методе моделирования мы рассматриваем скорость размерного развития именно организмов, проходящих последовательные стадии формирования до момента половозрелой особи. Метод не актуален для млекопитающих, рождающихся сформированными. Однако, востребован для рыб, когда первые стадии проходят при смешанном питании до резорбции желточного мешка.

Разработанные в наших исследованиях модели опираются на ряд достоверных биологических наблюдений. Показано для популяций рыб в [197], что смертность от хищничества является убывающей функцией размера особи и пропорциональна уровню потребления хищников, а естественная смертность молоди пропорциональна константе роста фон Берталанфи. В работе [198] взаимосвязь между живой массой и естественной смертностью молоди и взрослых рыб была проанализирована для различных водных экосистем. Смертность рыб моделировалась автором этой работы как степенная функция веса, где показатель степени был меньше нуля и существенно отличался в различных условиях, что согласовывалось с результатами длительных экологических исследований.

Изучение динамики роста молоди осетровых рыб проводили [199] Алтуфьев Ю.В., Романов А.А. Исследования, проводимые Г.Д. Рябовой для оптимизации заводского воспроизводства на основе анализа размерных характеристик выращиваемой в прудах молоди севрюги, позволяют говорить о наличии взаимозависимости плотности посадки, темпов роста и выживаемости поколения. В работе [200] анализировали генетические и размерно-весовые признаки молоди севрюги при выращивании в прудах рыбозаводов в условиях стандартной и вдвое более низкой плотности посадки.

3.4.2. Гибридная структура с переопределяемой правой частью для связи выживаемости стадий развития и темпов роста организмов

Предикаты, которые определяют последовательность включения форм правых частей уравнений, это мощное средство для увеличения разнообразия вариантов поведения гибридной модели. В предикаты можно включать несколько условий. Исследования выживаемости при различной плотности особей подтверждают достоверность использования показателя, отражающего темпы роста в ювенильном периоде онтогенеза. Все имеющиеся результаты не противоречат использованию темпов роста как важного сопутствующего фактора для моделирования формирования половозрелого поколения. Для развивающихся в искусственных условиях поколений используем в предикатах, ограничивающих активность уравнения, временные характеристики онтогенеза:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -\alpha_1 w(t)N(t) - \beta N(t), & t < \tau, \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & \tau < t < \tau + 7\eta, \\ -\alpha_3 N(t)N(t - \eta) / w(t - \eta), & t < T. \end{cases}$$

Формализованная данным образом связь убыли с показателями размерного развития в гибридной структуре остается и в таком варианте развитие на двух стадиях величина w уменьшает убыль. Так предложенные методы построения структуры уравнений можно адаптировать для моделирования

эффективности искусственного выращивания молоди рыб, варьируя предикаты согласно условиям, определяющим переходы к старшим стадиям развития поколения.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

В главе 3 рассмотрены основные биологические аспекты достоверности результатов применения формальных методов имитационного моделирования в исследовании экстремального характера развития процессов в биосистемах. Подтвердили обоснованность построения структуры уравнений и адекватности используемых при системном анализе гибридных моделей наблюдаемой экологической реальности. Данное обоснование специально необходимо для биологов и экспертов, работающих над выработкой стратегии эксплуатации биоресурсов.

Отмечены с точки зрения динамических систем типичные погрешности применения методов статистической обработки неполных данных для обоснования промысловых прогнозов. Полученные выводы только подтверждают высказанное ранее мнение многих специалистов, что в таких ситуациях эксперты основывают свое решение под влиянием дезинформации о состоянии популяции.

Показано соответствие реализованной в базовой системе уравнений зависимой от плотности динамики убыли известным экспериментальным результатам. Приведены по литературным источникам многочисленные примеры графиков нелинейных кривых воспроизводства (плоскость запас-пополнение), построенные по данным о размножении популяций рыб. Построение кривых воспроизводства на основе данных статистики «запас/пополнение» часто служит экспертам непосредственным инструментом прогнозирования воспроизводства и перспектив промысла. В трактовке динамики ситуации восстановление траектории между точками и идентификация типа аттрактора гораздо информативнее, чем построение кривых регрессий и способов аппроксимации сырых и приблизительных данных. Непосредственно увидеть форму кривой удастся в редких случаях: после кризиса используя метод скользящей средней при наличии данных о молоди рыб. Форма зависимости есть результат проявления комплексного взаимодействия популяции и среды.

Свойства приведенных на графиках реальных данных описываются модельными зависимостями, полученными при решении предложенных систем непрерывных уравнений на отрезках времени онтогенеза. Отмечено по реальным данным проявление пороговых эффектов. Для трех волжских популяций осетровых рыб Каспийского моря по результатам проведенной нами обработки данных о воспроизводстве в Волге выявлено действие порогового эффекта, выражающегося в резком снижении численности молоди. Эффект резкого порогового снижения темпов восполнения отмечен для трех популяций с разными формами зависимостей. Выполненное непосредственное исследование свойств наблюдаемой зависимости является очень

редким и важным примером для СА внутривидовых механизмов регуляции.

Метод представления модели с использованием гибридного автомата продемонстрировал значительную универсальность и широту описательных возможностей. Гибридная базовая Модель со вспомогательными уравнениями воспроизводит и традиционную «рикеровскую» куполообразную форму кривой пополнения, так и формы зависимости с несколькими экстремумами. Нетривиальные функциональные итерации порождают сложные динамические режимы поведения траектории в зависимости от сосуществования устойчивых и неустойчивых инвариантных множеств. Использование математически описанных трансформаций режимов поведения траектории для исследования практических сценариев – это отдельный важный результат для развития концепции СА в экологии природопользования.

Экологическое обоснование для метода с вычислениями на отрезках непрерывного времени с использованием представленных ранее базовых и вспомогательных уравнений и данная нами классификация наблюдавшихся форм нелинейных зависимостей на реальных примерах, свойства которых описываем при помощи предикативно-переопределяемых гибридных вычислительных структур, позволит развивать в следующей главе 4 методику системного анализа сценариев возникновения кризисных ситуаций. Предложенный подход даст возможность рассмотреть и подтвердить нетривиальные примеры со сложной колебательной и аperiodической динамикой популяционного процесса при кризисе, анализируя такие явления как прецеденты. По обоснованным еще в работах Рикера, Бивертон и Холта примерам разнообразие режимов динамики траектории функциональных итераций, в том числе с альтернативными инвариантными асимптотическими множествами, представляет больше описательных возможностей для задач моделирования ситуаций в области регулируемого природопользования, чем матричные модели или биостатистический метод.

ГЛАВА 4. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ И КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭКОДИНАМИКЕ ПРИ РЕГУЛИРУЕМОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Экстремальные явления в экодинамике сейчас развиваются стремительно из-за нарушений в многоуровневом механизме регуляции жизненного цикла популяций [201]. Сложные для прогнозирования и негативные для экономики явления возникают при разрушении сложившегося баланса ценной популяции и ее естественного окружения. Методы моделирования ситуаций с использованием сценарных моделей и прогнозирования развития ситуации на основе анализа прецедентов позволяют объяснить сходство ряда опасных ситуаций. Их модельное описание применимо для разных экологических явлений при существовании пороговых эффектов (как коллапс промысловых запасов или локальная вспышка численности насекомых).

Глава 4 посвящена технологии применения разработанного метода построения переопределяемой моделирующей структуры для анализа реального кризисного развития ситуаций в нетривиальной форме экодинамики.

Разработанный метод организации гибридной моделирующей структуры предназначен для *детализированного* имитационного описания в вычислительных средах актуальных ситуаций экстремального развития популяционных процессов, когда внешнее воздействие регулировалось по некоторым правилам, основанным на опыте и/или мотивации экспертов, и обработке получаемых с запаздыванием статистических данных.

Область применения переопределяемых структур уравнений не ограничивается известными подходами вычислительного моделирования и традиционного анализа устойчивости. В главе 4 отдельно проведем обсуждение практически важных ситуаций кризисной динамики с использованием теории нелинейных динамических систем, моделирующих изменения в регуляции популяционных процессов. Покажем преимущества разработанного метода представления переопределяемой вычислительной структуры на основе ограниченного набора нелинейных эффектов, доступных для возмущенных итерационных систем, при их экологически обоснованном применении.

Цель Главы 4 – анализ и классификация сценариев развития стремительных экологических процессов по данным о реальных ситуациях кризисов для реализации вычислительных модельных имитаций средствами разработанного нами в главе 2 метода организации переопределяемых гибридных структур.

Отдельно при сравнении собранных нами разнородных сведений о реальных ситуациях, перешедших в итоге к кризису, исследуем типичную логику выработки и обоснования решений об изменении воздействия. Представление об исследуемой методами гибридного моделирования кризисной для биоресурсов ситуации сформируем на основе графиков данных наблю-

дений о состоянии запасов, отчетов промысловой статистики об уловах, заключений экспертов о выделении квот для вылова.

Алгоритмы, обеспечивающие экономически оптимальное и неограниченно долгое неистощительное квотирование добычи, не внедрены по многим причинам. Проблема организации оптимальной эксплуатации в случае нелинейных характеристик зависимостей и эффектов, возникающих из-за существующих биотических механизмов регуляции воспроизводства популяций, не имеет по известному опыту исключительно математического решения, алгоритмически переносимого на практику как схема квотирования изъятия. Иначе проблема кризисов промысла перестала бы быть актуальной при усилиях многих ученых из разных стран по поиску оптимальной стратегии и с применением различных моделей. При существовании применимой универсальной стратегии организации оптимального природопользования исследования механизмов развития кризисов не требовали бы применения имитационных моделей и ситуационного анализа. Предлагаем трактовать выделенные последовательности происходивших качественных изменений на основе имитационного сценария с использованием теории бифуркаций нелинейных функциональных итераций и вырабатывая рекомендации для регуляции по минимизации риска развития сценария коллапса.

Мы продемонстрируем, что практическая задача регулирования воздействия на биоресурсы отличается от математической постановки. Усложняется из-за отмеченного выше аспекта *рефлексии* при принятии решений и прежде всего неполных данных. Решения при регуляции принимаются исходя из полученной текущей оценки состояния биоресурсов и существующих *ожиданиях* об их будущих изменениях. По причине вариативности мотивации при принятии регулирующих решений обоснованный в данной работе *метод исследования ситуаций* сосредоточен на сопоставлении имитационных сценариев и анализе вариантов исхода. Решения отразим событийными изменениями воздействия.

Отдельно рассмотрим проблему обобщения свойств сценариев, которые сопровождаются появлением резких изменений с целью показать неочевидное многим специалистам сходство кризисной динамики, которая фиксировалась в исследовании для разных ценных популяций рыб и промысловых ракообразных.

Математическая идея исследований Главы 4 предполагает использовать биологически интерпретируемые свойства траекторий динамических систем (их мы называем *описательными средствами* моделирования). Нужные математические свойства сформируем на основе переопределяемых гибридных вычислений, для отражения характеристик реальных быстро меняющихся популяционных процессов. Поведение траектории (дискретной составляющей) зависит от наличия и положения точек экстремумов и стационарных точек $f(x)=x$.

У функциональной зависимости, которая задает показатель эффективности воспроизводства, получаемой при численном решении уравнений на интервалах кодированного модельного времени, вариантов биологически обоснованных расположений несколько. Другой принцип (помимо стадий-

ности) построения нашего метода анализа ситуаций – вариативность моделирующих средств.

Для анализа вариантов кризисов используем полученную возможность целенаправленно генерировать нужную для ситуации конфигурацию свойств у получаемой зависимости, которую будем использовать как оператор эволюции итерации с введением внешнего регулируемого управляющего воздействия. Новизной подхода являются и критерии оценки модельной ситуации на основе показателей запаса за n сезонов при заданном алгоритме из вариантов динамики воздействия. Например, если уловы 5 лет стабильны, средний возраст не снижается, то имитируется сценарий с решением об увеличении квоты изъятия.

Это логичное решение, но далеко не очевиден ответ на вопрос о том, как отреагирует на это изменение популяция как адаптивная сущность в конкурентной среде? Так в момент реализации плана повышения рентабельности промысла вдруг возникает не предопределённость конечного состояния биоресурсов, которую автор связывает со сценариями, а регуляторы при неудаче их планов с действием непредвиденных ими обстоятельств. Бизнес-план получения прибыли уже утверждён для предприятий отрасли на следующие несколько лет, получены кредиты, потому будет непросто отменить это простое и логичное решение – поднять эффективность отрасли, если вдруг ситуация в сценарии будет развиваться не по плану и случая «что-то пошло не так».

На основе сравнения реальных динамических ситуаций обобщим типичные причины и отличия ситуаций коллапса при экспертной регуляции промысла.

4.1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭФФЕКТА КОЛЛАПСА БИОРЕСУРСОВ – ФАКТОРЫ, ОБЩНОСТЬ И РАЗЛИЧИЯ ДИНАМИКИ

Биологическое обоснование для развиваемого метода формализации динамики выживаемости с меняющимися на протяжении онтогенеза особей разными факторами убыли численности поколений позволит определить и принципы анализа ситуаций. В задачи данного исследования входит непосредственно описание стадий развития для важных реальных примеров кризисных явлений у промысловых популяций при их регулируемой эксплуатации. На взгляд стороннего наблюдателя из других областей прикладной математики проблема кризисов может показаться тривиальной – предприятия хищническое чрезмерное изъятие и популяции сократились или даже погибли. В реальности имеем дело с противоречивыми ситуациями с нетривиальной динамикой развития, так как никто из заинтересованных сторон не хотел допустить негативного развития ситуации при регулировании изъятия, учета и прогнозировании состояния биоресурсов математическими методами.

Для применения сценарной методологии выбраны примеры истощения запасов, имеющие, прежде всего, достаточно надежные данные

промыслового учета. Во-вторых, отличающиеся появлением нелинейных эффектов, которые регуляторы не смогли предвидеть. При проведении анализа сценариев развития опираемся на наиболее достоверные из имеющихся данных о динамике популяций. Многие явления деградации запасов в практике отечественного рыболовства стали следствием масштабного нелегального браконьерского промысла, соответственно, сопровождались неучтенным выловом, не попадавшим в официальную статистику. Пример, о котором мы писали ранее – каспийские осетровые, где невозможно оценить масштаб нелегального изъятия. Приводимые разными авторами экспертные оценки объема неучтенного официальной статистикой вылова различаются многократно. Формальный обзор ситуации не построим на недостоверных оценках биологического объекта.

Интересная для моделирования кризисная ситуация в природопользовании отличается непростой историей. Обычны противоречивые суждения экспертов о причинах, об истинной роли действующих фактов. Возникают альтернативные гипотезы, которыми оперируют заинтересованные стороны. Именно по причине неоднозначности трактовок сложных ситуаций и вклада разнонаправленно действующих факторов привлекаются формализованные методы системного анализа, позволяющие имитировать изменения математически. Наглядным примером развития планомерного кризиса является ситуация с деградацией каспийских осетровых, поддерживаемая искусственным воспроизводством в ситуации, когда реальная эффективность выпуска заводской молодежи оказалась значительно меньше прогнозов экспертов, которые были сделаны в работе [202]. Предложенные экспертами в [203] биологические основы изменения режима промысла осетровых рыб в Волге оказались крайне неудачным решением, когда давление было перенесено на исторически наиболее продуктивную «озимую» часть (субпопуляционную группу летне-осеннего хода) популяции.

Предсказать итоговую деградацию запасов осетровых в сложившейся обстановке не являлось сложной научной проблемой. Этот случай коллапса достаточно тривиальный с точки зрения причинно-следственных связей. Фиксировалось неуклонное сокращение числа рыб на нерестилищах [204], о неминуемой деградации биоресурсов Каспия предупреждали многие независимые специалисты, но промысел, в том числе браконьерство, не был остановлен по административно-хозяйственным причинам, не связанным с научными работами биологов. В работе Г.Ф. Зыковой [205] говорится даже о гипотетическом 12-кратном превышении объемов нелегального вылова официальной выданной квоты, но эта оценка вылова не может быть никем подтверждена.

Сравнение случаев кризисов с вынужденными остановками промысла при регулируемом изъятии подтверждают системность проблемы организации рациональной для экономики и при этом не истощительной эксплуатации биоресурсов. Схожие примеры из разных регионов интересны для апробации новых методов к регулированию нелинейных процессов в экодинамике. Известны значительно более быстро развивающиеся ситуации

с возникающими сложными нелинейными эффектами при смене стадий, которые оказываются при этом и действительно неожиданными для принимающих решения специалистов. Именно ситуации с неоднозначными трактовками развивающихся событий и противоречивостью факторов интересны для сценарных моделей и концепции СА в контексте задач научно регулируемого природопользования.

4.1.1. Понятие запаса стабильности для популяции под регулируемым воздействием

Теоретически в предложенной модельной трактовке воздействие на биоресурсы представляется регулируемым вмешательством в саморегулируемый процесс, формализованный нами как динамическая система. Представим, что биосистемы обладают некоторым «запасом стабильности» – отделяющим текущее состояние от критического и неизвестным заранее регуляторам воздействия. Под понятием о запасе стабильности биосистемы понимаем величину интервала, (в единицах численности или биомассы), который в терминах модели отделяет устойчивое инвариантное многообразие от критического неустойчивого. В модели важно максимальное расстояние на графике в плоскости «запас – пополнение» от области баланса со средой до границы области притяжения альтернативного равновесия (или цикла). В качестве критического равновесия в теоретической экологии понимается состояние при минимальной допустимой численности [206]. Процессы в этом состоянии сложны, как показали примеры существования реликтовых популяций, в некоторых случаях оно может сохранять устойчивость.

Опасное приближение к границе устойчивости трудно предвидеть, так нет возможности у ЛПП строить траектории в реальном времени. Под негативным воздействием интервал уменьшается, но биосистемы обладает адаптивностью, потому они могут долго компенсировать давление, а переход к кризису в таком варианте будет стремительным. Во многих различных биосистемных процессах наблюдаются динамически схожие изменения в их стремительном развитии, что делает принцип формирования моделей из гибридных структур универсальным.

4.1.2. Систематически наблюдаемые аспекты длительного процесса деградации биоресурсов при регулируемом воздействии

Каждое из описанных в научно-методической литературе явлений стремительной деградации запасов с точки зрения цепочки причинно-следственных связей оказывается в некоторых аспектах уникальным, но общих динамических аспектов достаточно много. На некоторые из популяций помимо промысла повлияли дополнительные неучтенные в прогнозах факторы смертности молоди и ухудшения условий воспроизводства. Часто промысловики на сопутствующие внезапно возникшие природные негативные обстоятельства пытаются переложить ответственность за деградацию экс-

плуатируемых ими биоресурсов. Мотивацию авторов используемых источников тоже нужно учитывать при проведении анализа на основе проверки этой информации.

Классифицировать ситуации актуально с точки зрения интерпретации ситуаций в терминологии теории дискретных динамических систем и бифуркаций с целью выбрать наиболее подходящие метаморфозы фазовых портретов для дальнейшего описания сценариев. Это важно для обоснования регулирующих решений из принципа классификации ситуаций аналогов.

В этом разделе работы выявим общие закономерности и подчеркнем сходства в развитии популяционных процессов, завершающихся одной из форм демографического кризиса истощения. Деградация эксплуатируемой популяции – снижение численности промыслового запаса (подразумевается числа и/или биомассы особей, попадающих под критерии разрешенного изъятия по возрасту и/или размерным характеристикам) до значения, при котором продолжение промысла становится бессмысленным, часто развивается различным образом даже для разных локальных популяций одного промыслового вида с широким ареалом. Наблюдаемые ситуации деградации могут развиваться и по естественным причинам, так как само по себе вымирание проигрывающих в эволюционной борьбе видов не уникально. Выберем ситуации с регулируемым антропогенным воздействием и ставшим явным ключевым фактором.

Для популяций при интенсивном промысле наблюдаются несколько вариантов возникновения проблем с восполнением, как по времени наступления, так и по длительности последствий. Отмечались временный преодолеваемый краткий кризис, резкий крах промысла или длительное неуклонное и очевидное истощение (динамика деградации каспийских осетровых и тюленя) без признаков восстановления после остановки воздействия.

Пример затянувшейся на долгих 60 лет деградации, вызванной чрезмерным промыслом и нарушением естественного речного стока при гидростроительстве каскада ГЭС, – ситуация с популяциями осетровых рыб бассейна Каспийского моря. Четыре ценных вида из-за систематического перелова включены с 2010 г. в «Красную книгу» как находящиеся под угрозой исчезновения.

Официальные данные в [207] по промысловой статистике на графике рис. 3.10 не включают нелегальное изъятие, которое активно проводилось с 1991 г. в Волге, и еще в 2000-е гг. и наблюдалось автором. Потому реальное падение уловов не было таким резким, как показывает график официально регистрируемых уловов. Ненадежность имеющейся информации по динамике общей численности осетровых (существенно завышенной), которую получали аппроксимацией случайных уловов в квадратах на всю акваторию моря, и явное занижение в статистике реальных объемов промыслового изъятия не позволяют нам использовать эти сведения для обоснования модельных сценариев кризиса.

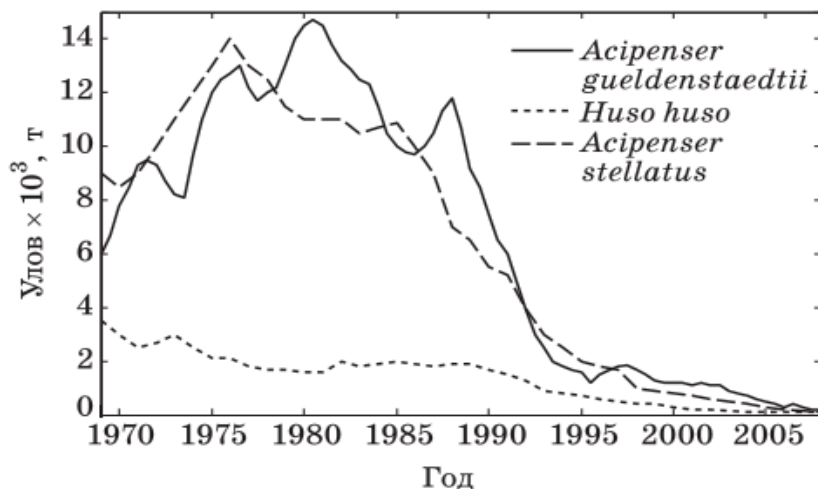


Рис. 3.10. Пример монотонного истощения запасов – случай деградации трех популяций осетровых рыб Каспийского моря (осетр *Acipenser gueldenstaedtii*, севрюга *Acipenser stellatus*, белуга *Huso huso*) по данным об официальных уловах без учета Ирана по [207]

Сейчас в международных документах ООН призывает страны бороться с «NNN-промыслом» – нелегальным, нерегулируемым и несообщаемым. Для управления необходимо знать при прогнозировании, сколько в реальности выловил субъект, даже имеющий легальное право на вылов. Более того, для долгосрочного прогнозирования допустимого уровня изъятия необходимо представлять размерно-возрастное распределение особей в улове. Методы прогнозирования достаточно развиты в современной промысловой ихтиологии, но страдают не только от неточности и неполноты информации о состоянии запасов, а иногда от сознательного искажения экологической реальности.

Причина столь длительного истощения запасов при хищническом вылове – сложная внутривидовая структура у этих рыб с сезонными расами [208]. Это выработанная эволюционная адаптация у осетровых рыб к размножению на ограниченных русловых нерестилищах Нижней Волги. Для установления роли внутривидовых группировок в воспроизводстве биоресурсов Каспия применялись иммунохимические методы дифференциации П.П. Гераскиным и Т. Ю. Борисовой [209]. Заходящие для нереста в реки Волгу, Куру или Урал субпопуляционные группы рыб раньше или позже основной нерестовой группы получали шансы избежать промысла в реке. При снижении вероятности промысловой гибели рыб эффективность их воспроизводства была очевидно ниже, чем при исторически оптимальном уровне половодья и температуре воды. Анализом данных о миграции молоди методами скользящего среднего мы впервые установили наличие двух максимумов для показателя эффективности нереста севрюги *Acipenser stellatus* в Волге, следовательно и глубокого минимума – этот фактор не был учтен никем из составлявших промысловые прогнозы.

На протяжении 15 лет равновесное состояние планомерно приближалось к критической точке, после которой популяция не восстанавливает убыль. Ситуация соответствует простому варианту нашей модели с двумя равновесиями. Как мы показали ранее, для осетра *Acipenser gueldenstaedtii* установлен единственный куполообразный максимум с асимптотой на половинном уровне от максимума.

Форма кривой зависимости запаса и пополнения у белуги *Huso huso* не имела экстремума, но используемый нами интервал данных наблюдений был неполон. Запасы белуги были истощены еще в начале XX века, а в современных условиях долавливали остатки некогда очень многочисленного вида. Биосистема Каспия переживает общий системный кризис, сокращаются запасы многих видов рыб. У экспертов имеются в распоряжении различные предложенные методы комплексной оценки состояния популяций, и генетические, и иммунологические [210]. Ухудшение состояния популяции можно выявлять по снижению накопления жировой ткани и развитию у особей вторичного иммунодефицита. Снижение генетического разнообразия в популяции, которое неминуемо происходит при искусственном воспроизводстве, и ослабление иммунной реактивности – это медленно действующие факторы, но свидетельствующие о длительном кумулятивном накоплении негативного влияния, которое суммируясь приводит к кризису.

Проблемный аспект достоверной оценки в том, что сложные методики многофакторной оценки состояния биоресурсов Каспия не применялись ответственными за выбор стратегии эксплуатации экспертами и при обосновании прогнозов вылова. Наличие разработанных современных методов (в том числе математических) комплексной оценки состояния биоресурсов не гарантирует их грамотного применения. Более того, и в других ситуациях при наличии альтернативы лица принимающие решения часто склоняются к использованию того метода, который покажет более желаемый для них результат оценки.

Схожая ситуация долгой последовательной деградации наблюдалась для судака *Stizostedion lucioperca* в Азовском море по данным Ю.В. Тютюнова [211]. Согласно исследованиям профессора Аллы Никитиной и её учениц азовская экосистема и планктонное сообщество Таганрогского залива подвержена негативному влиянию из-за нарушения сложившегося ранее гидрологического режима из-за избыточного притока соленой воды из Черного моря [212].

4.1.3. Эффект стремительного коллапса запасов и его общие повторяющиеся особенности для разных биоресурсов

Ситуация деградации осетровых рыб Каспия не является уникальной в практике регулирования уловов с попыткой максимизации прибыли от эксплуатации. В ситуации осетровых рыб имелись очевидные возможности директивно остановить промысел (включая нелегальный) задолго до констатации безвозвратной деградации и попадания в 2010 г. в «Красную

книгу». Основной отличающий аспект этой ситуации от других кризисов – организованный искусственный выпуск молодежи без достаточной проработки его методики не оправдал оптимистичных ожиданий по промысловому возврату.

Важнейший аспект для регулирования эксплуатации оказывается в том, деградация биоресурсов происходит не только постепенно и очевидно для специалистов, формируя череду уменьшающихся поколений. Последовательной деградацией будем считать убыль промыслового запаса, которая ежегодно не превышает 10% по отчетам промысловой статистики. Есть иные сценарии.

Все чаще наблюдается нехарактерное для естественных популяционных процессов явление для многочисленных промысловых популяций – чрезвычайно стремительное сокращение численности, когда большая длина жизненного цикла и множество сосуществующих поколений не становятся предохраняющими факторами. Тогда быстро возникший кризис не скоро преодолевается и воспроизводство очень долго не восстанавливается естественным образом. Подобное особое явление в экодинамике нелинейного характера получило название популяционного коллапса. В современных работах «эффект коллапса» является устоявшимся научным понятием не только в астрофизике, но и в популяционной экологии и особенно при управлении промысловым рыболовством для обозначения резкого прекращения промысла.

Целью разработки модельных сценариев является в том числе выделение аспектов динамики траектории как характерных признаков, которые способны *предсказывать* скорую реализацию эффекта коллапса для эксплуатируемых биоресурсов. Признаки ситуации, которые предшествуют констатации явления коллапса, целесообразно сравнивать на различных примерах. С точки зрения теории динамических систем для имитации коллапса требуются *качественно иные изменения* поведения траектории в фазовой плоскости, чем в известных нелинейных моделях промысловых популяций (Рикера, Кушинга, Шепарда).

Резкий коллапс запасов принципиально отличен от известных случаев затянувшегося монотонного истощения ценных промысловых биоресурсов, когда промысел часто ведется вопреки здравому смыслу. Ситуации продолжительного упорного и очевидного экспертам истощения биоресурсов характерны не только рыбного промысла, можно вспомнить истребление популяции сайгаков. Отличие разных ситуаций деградации популяций не объясняется только экологическими причинами или только экономическими мотивами и ошибками регуляции и прогнозов. Ситуации обычно результат стечения двух негативных обстоятельств, включая «человеческий фактор».

Понятие «коллапса» популяции применимо не только к динамике промысловых видов. В экологической работе [213], которая не посвящена непосредственно промысловым объектам, явление популяционного коллапса трактуется как снижение численности взрослых особей на 90% за 3 года, и этот кризис длится не менее 10 лет. Коллапс возможен не только из-за непосредственного промысла, в работе [213] изучалось влияние чужеродных агрессивных видов на снижение численности автохтонных популяций

птиц. Коллапс инвазионной популяции возникает, когда ее численность превышает емкость экосистемы, при этом часто емкость среды сама резко сокращается из-за разрушительного воздействия на среду обитания [214]. Ресурсы среды восстанавливаются значительно медленнее, чем происходит рост потребностей не адаптированной популяции с высоким репродуктивным потенциалом.

Для обобщённой отличительной трактовки ситуации приведем пример наглядного отличия коллапса от монотонного истощения запасов для двух близких видов, по которым имеется надежная статистика. Отличительная динамика показанных двух типов развития ситуации кризиса с эксплуатируемыми водными биоресурсами показана графиками на рис. 3.11 из [215]. На этом рисунке показаны два графика – динамика деградации двух американских промысловых анадромных видов семейства сельдевых. Отличия в динамике развития процессов очевидны, хотя финал этих двух популяций одинаков – биоресурсы критически истощены. Процесс, который ведет к точке безвозвратного истощения для ситуаций различен по очень многим аспектам и факторам. Универсальность нужно искать в динамике пороговых эффектов.

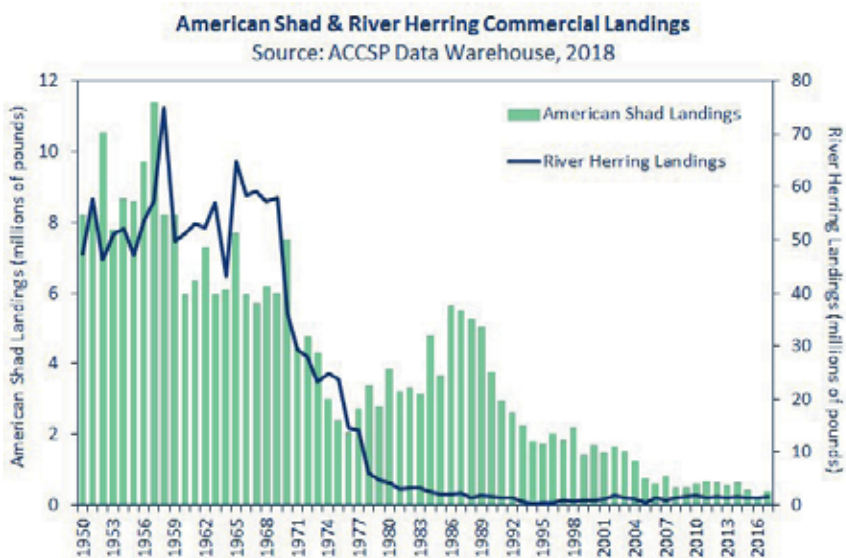


Рис. 3. 11. Отличие сценария коллапса от монотонного истощения биоресурсов на примере динамики эксплуатации двух промысловых популяций рыб

Для вида *Alosa sapidissima* происходит постепенное, но немонотонное убывание уловов – видим флуктуации, затухающие в окрестности нуля. Уловы значительно снижаются из-за систематического перелова. Потом следует обманчивые тренд их восстановления. Популяции обладают компенсационными возможностями, но ограниченными. Снижается внутривидовая конкуренция за пищевые ресурсы. Фактор ослабления конкуренции и адаптации к воздействию (увеличение доли особей с ранним

созреванием) позволяют некоторое время поддерживать воспроизводство этой популяции при снижении численности нерестового запаса. Короткое временное увеличение сменяется длительным плавным, но неуклонным сокращением запасов при отсутствии моратория.

Подобным образом с видимой сменой трендов систематического падения и временного повышения могут развиваться кризисные процессы не только в экодинамике, но и в региональной экономике. На финансовых рынках известно явление «отскок дохлой кошки» – ситуация ложного тренда начавшегося увеличения «отскока» стоимости активов, после которого цена продолжает идти вниз, так как эти активы никому не нужны даже при минимальной их цене.

Для озерной сельди наблюдается быстрое сокращение запасов в 1971–73-х гг. Этот эффект именно резкий стремительный коллапс. Описание эффекта коллапса требует качественно иных свойств фазового портрета динамической системы.

Обратим внимание на немонотонную динамику истощения биоресурсов. Всплески колебаний интересны для описания характера изменения режимов поведения траектории. Исходя из графиков, процесс деградации разбивается на несколько промежуточных этапов. Уловы перед сокращением достаточно существенно колеблются. Перед кризисом тренд падения уловов останавливается в окрестности неустойчивого равновесия, и в этот момент промысловое давление из предосторожности должно было быть временно остановлено. К сожалению, прогнозирование порогового эффекта в популяционной динамике чрезвычайно сложная задача для статистических методов и интуиции регулирующих изъятие экспертов. Коллапс фиксируют по моменту моратория на промысел.

Возможны промежуточные варианты кризисной динамики, например, как для ситуации промысла каспийского тюленя, популяция испытывала несколько резких сокращений до современного состояния деградации рис. 3.12.

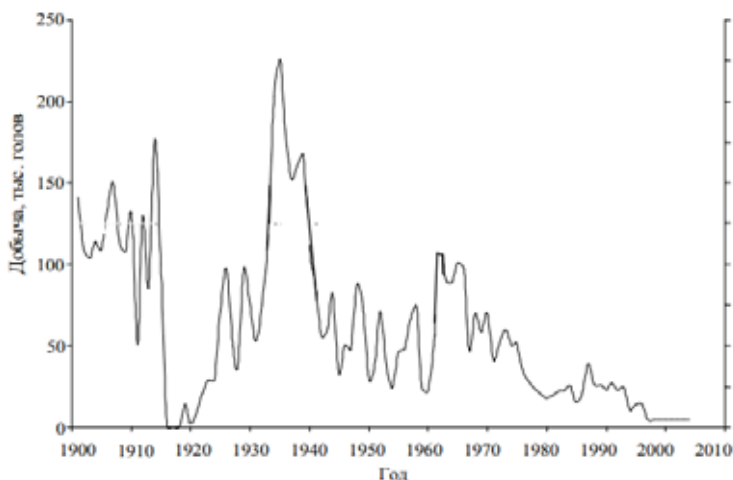


Рис. 3.12. Динамика добычи каспийской популяции тюленя *Phoca caspica* до итоговой деградации [216]

Популяция периодически испытывала влияние эпизоотий неустановленной этиологии и фиксировались явления массовой гибели тюленей. Мы видим максимум добычи, после которого популяция переходит в режим флуктуаций, следовательно, промысловые запасы были подорваны очень давно – полвека назад. Сейчас каспийская популяция стабильная, но малочисленная и промысловой ценности не имеет в ближайшем десятилетии.

После первого истощения популяция не смогла восстановить свое былое обилие при продолжающемся чрезмерном истреблении тюленей, хотя этот промысел регулировался. Популяция не могла устойчиво восстанавливать свою численность, но и не переходила в состояние, когда воспроизводство было достоверно на уровне ниже восстановления. Для такой ситуации предполагается не одна точка-репеллер на модельной кривой воспроизводства, но некоторая достаточно широкая область неустойчивости. В такой области, не содержащей устойчивых инвариантных множеств, воспроизводство может оказываться с большой долей вероятности меньшим, чем исходная численность запаса. С точки зрения теории динамических систем в данной ситуации наблюдали асимптотическое приближение к тривиальному равновесию в заключительной фазе длительно развивавшегося популяционного кризиса. На основе рассмотренных примеров сделаем вывод, что даже малый процент $q < 5\%$ продолжающегося изъятия в случае начавшегося процесса систематической деградации хоть не сразу ведет к истощению, но становится в итоге критическим.

Случаям промыслового коллапса гидробионтов, его причинам и выявляемым признакам посвящено значительное число работ. Исследовались биологами события не только для рыб, но для очень разных объектов промысла, например, кризис популяции моллюска *Chlamys islandica* в работе [217]. В современных исследованиях понятие коллапса распространяется не только на отдельные популяции, но уже на экосистемный уровень [218].

Делались попытки обобщения принципов развития ситуации коллапса. Одна из возможных принципиальных схем развития итогового коллапса биоресурсов от начала эксплуатации по графику уловов при повышении уровня изъятия согласно обзору [219] приведена на рис. 3.13.

Процесс начинается с решения увеличить изъятие, когда биоресурсы явно используются недостаточно эффективно и действительно есть возможность увеличить прибыль от эксплуатации. Дальнейший ход событий зависит от того, как было принято решение об увеличении квоты и как отреагировала популяция. В схеме коллапса от решения до начала кризисных проявлений достаточно длительный отрезок времени, за который можно заново оценить ситуацию и корректировать принятое решение, однако своевременной корректировки воздействия не происходит вплоть до очевидных признаков неблагополучия.

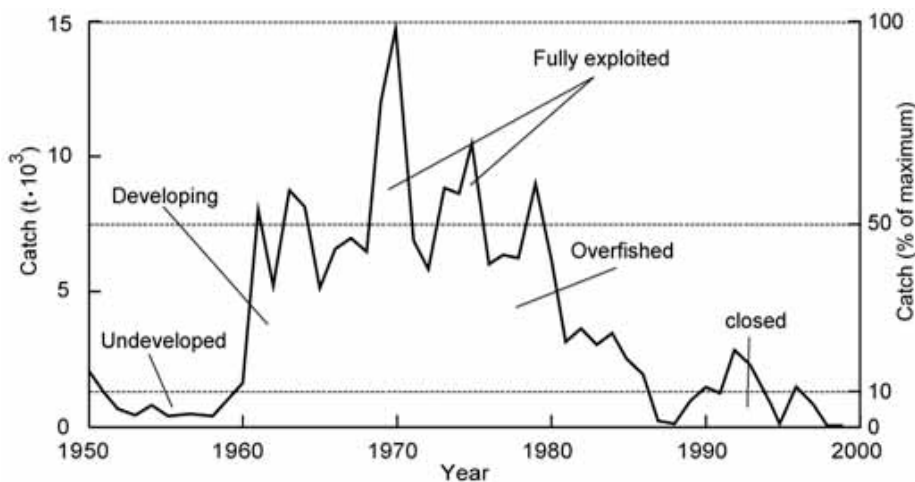


Рис. 3.13. Обобщенная схема развития коллапса запасов по динамике уловов по [219]

На показанной схеме коллапса динамика представляется волатильной и с нерегулярными пиками. В реальных случаях промысел может иметь стабильные показатели, что более логично в таком подходе к регулированию. Например, стабильность наблюдалась в случае осетровых рыб Каспия, поддерживавших в 1980-е годы относительно высокие объемы вылова до признаков кризиса 1990 г. Согласно полученным нами выводам, основной удар по нерестовой части популяций осетровых рыб был нанесен промыслом значительно раньше – в 1977–86-ых гг. при регулируемом официальном вылове.

Обратим внимание, что непосредственно перед фактом коллапса, уловы прошли пики, но еще достаточно высоки. Следовательно, анализируемая популяция могла длительное время выдерживать высокий уровень доли изъятия $q > 0.6$, и это бы считалось нормой. Свойства динамики подтверждают случаи и тюленя, и озерной сельди, и севрюги. Для волжской севрюги в отдельные маловодные годы изъятие из нерестовой части популяции доходило до $q \approx 0.8$. В этом случае эксперты рассматривали многовозрастной запас, с ожиданием резерва. Надежды на восстановительный резерв за счет еще не вступивших в промысловый возраст поколений в итоге нивелируются долгим созреванием молоди этих видов. Дополнительно отметим фактор неоптимального гендерного распределения из-за разного времени созревания у самцов и самок многих видов, которые будут представлять в момент первого нереста поколения, для которых будет существенно отличаться численность. На нересте окажутся самцы из более многочисленных поколений, и дольше созревающие самки из малочисленных поколений, что вызовет неравномерное распределение гендерной структуры в нерестовых группах и усилит конкуренцию. В дальнейшем развитии возникнет обратная ситуация сдвига гендерного баланса.

Мы отмечаем на реальных примерах данных наблюдений и промысловой статистики, что *видимая* стремительная деградация биоресурсов переменный и многоэтапный процесс, где собственно коллапс – только *терминальная*

фаза. Для развития ситуации, определяемой в итоге как «коллапс» должно реализовываться систематическое превышение допустимого уровня изъятия. Однако при регулируемом изъятии это превышение не будет долго вызывать быстрых последствий и очевидных для квалифицированных экспертов.

Отметим, явление коллапса часто выглядит стремительным сокращением численности в отражении ведущейся статистики учета запаса. Используемые данные о численности запаса и состоянии его воспроизводства могут быть завышенными по сравнению с реальностью. В таком случае коллапс предстает как момент приведения в соответствие реальности и некоторых полученных ранее приблизительных оценок состояния эксплуатируемых популяций.

Назовем описанное ведение промысла перед коллапсом квазиоптимальным режимом, – особым динамическим состоянием, который возникает при стремлении максимизировать выгоду от эксплуатации биоресурсов, но при этом оказывается, что зависимость в эффективности воспроизводства запасов подчиняется нелинейной функции.

Далее рассмотрим наиболее значимые и документированные ситуации популяционного кризиса, которые относятся к явлению коллапса, и представим наблюдаемые изменения в форме модельных сценариев. Для понимания последовательности принимаемых решений при регуляции промысла уделим внимание важному аспекту при принятии регулирующих промысел решений – особенностям методов оценки запасов и допустимого изъятия, которые в реальности применялись экспертами при организации промысла и, соответственно, повлияли на последовательность их решений.

4.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИТУАЦИИ ВНУТРИВИДОВОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ СУБПОПУЛЯЦИОННЫХ РЕПРОДУКТИВНЫХ ГРУПП

В этом разделе монографии рассмотрим еще одно преимущество гибридных структур – совмещение вариантов компоновки уравнений в одной модели. Пластичность свойственна биофизическим системам и изменчивость видов основа их эволюционного прогресса. Сосуществование вариантов репродуктивного поведения трудно отразить в классических моделях.

Комплекс поведенческих и биохимических приспособлений позволял популяциям Каспийского моря эффективно использовать ограниченные ресурсы и выдержать конкуренцию. При длительной совместной эволюции в сообществах организмов возникла специфическая адаптация, оптимальная именно для условий Каспия стратегия выживания. Важная форма адаптации осетровых рыб Каспия – образование субпопуляционных репродуктивно обособленных группировок, совершающих нерестовые миграции в разное время и разными маршрутами. Обособленные группы у многих видов становятся единицами видообразования, медленно накапливая различия из-за репродуктивной изоляции и не обязательно географической. Фактором для разделения становятся оптимальные условия для размножения в одной реке.

Вмешательство в сложившиеся гидрологические условия региона Волги моментально разрушило преимущества эволюционной стратегии группировок. Современная задача регулирования состоит уже не в том, чтобы выбрать наилучшую стратегию и добиться оптимальной эксплуатации, а в том, чтобы постараться не допустить развития необратимого и худшего сценария.

Для оптимального управления ресурсами ценных для экономики популяций необходимо совершенствование методов прогнозирования соотношения обособленных групп, так как при регуляции промысла определяющим квоты экспертам часто не известно их исходное распределение в общей популяции и вклад в восполнение биоресурсов. Актуальная задача для биокибернетики заключается в анализе влияния сложной популяционной структуры, под которой нами понимается разделение на несколько отличающихся по репродуктивному поведению групп особей данного вида, на длительность выдерживания нерационального изъятия и сценарий коллапса.

Для осетровых рыб в ареале Каспия образование субпопуляционных группировок форма адаптации, позволяющая им использовать ограниченные пригодные для размножения площади максимально. Высокая адаптивная способность и большая индивидуальная плодовитость позволяла осетровым видам рыб длительно с середины XIX века и до 1990 г. выдерживать необоснованное и чрезвычайно интенсивное антропогенное воздействие.

Ранние стадии жизни у особей двух репродуктивных групп осетровых рыб при их естественном размножении в Волге проходят в различных условиях. Адаптацию к жизни в морской воде молодые особи из двух групп (озимые и яровые) претерпевают в различном возрасте, так как молодые особи проходят в реке путь до солоноватоводного эстуария существенно разной длины. В результате неадекватной регуляции промысла в условиях нарушения среды воспроизводства и гидрологического режима рек к 1991 г. произошел стремительный коллапс четырех популяций. Однако, в это время с 1978 г. проводилась массовая интродукция искусственно выращенной молоди. Вопрос о том, куда исчезала выпускаемая в Волгу молодь осетровых рыб остается без официального ответа. Методология реинтродукции осетровых должна учесть репродуктивные особенности разных по поведению групп. Важен различный уровень реактивности генеративной ткани к гормонам.

4.2.1. Структуры уравнений для случая двух репродуктивных групп

Актуально оценить в сценарной модели вклад каждой из групп в восполнение общего «промыслового запаса» и потери воспроизводства при деградации одной из групп. Из вышесказанного логично, что у двух групп отличается функциональная зависимость эффективности воспроизводства из-за разных миграционных путей, вероятности гибели и уровня конкуренции.

Гибридная модель позволяет учесть различия в репродуктивном цикле групп, модифицировав уравнения соответственно важным для динамики выживания поколений вариациям особенностей их раннего онтогенеза.

Функциональной основой для моделирования эффектов спорадически возникшей дифференциации репродуктивного процесса осетровых Каспия на группы внутри структурированной популяции является совокупность

физиологических и биохимических процессов. Эти процессы у сезонных рас определяют интенсивность активного и генеративного обменов, различную динамику накопления, а главное, последующего расходования энергетических запасов организма в условиях повышенных мышечных нагрузок. Основным у осетровых рыб является отбор по физиологическим и биохимическим параметрам, позволяющим оптимальным образом приспособиться к длительному нахождению в осмотически различных средах (море, река).

Набор вспомогательных уравнений для сопутствующих показателей развития поколений позволяют гибко настраивать гибридную вычислительную структуру для специфических ситуаций наличия популяционной дифференциации или включения действия дополнительных факторов физической среды, связанных обычно с влиянием температуры, скорости течения и площади нерестилищ. Модель диверсифицированной репродуктивной активности построим на основе формализации различного жизненного цикла у размножающихся групп. Логично задать динамику численности поколений двух субпопуляционных групп двумя гибридными структурами, описывающими отличия переходов между стадиями развития.

Используем следующую организацию структуры ранее предложенной модели формирования поколений популяции для двух групп, где стадийность будет задана различным образом. Длительность стадий развития у двух групп различается значительно из-за разных миграционных маршрутов. Осенняя группа поднималась высоко по течению реки Волги на тысячу километров и молодь этой группы проходила обратный маршрут на пути к морю, взрослея и набирая массу в реке, но потом все равно приспособлялась к морской воде.

Для моделирования ситуации при длительной миграции задействуем в гибридной системе модели выживаемости поколения от начальной численности икры $N(0)$ до полового созревания на отрезке гибридного времени $t \in [0, T]$ три стадии развития с различной формой записи убыли численности поколения. Включим в уравнение для скорости роста особей $w(t)$ в зависимости от плотности особей и вспомогательное логистическое уравнение динамики кормовых организмов $g(t)$, тоже влияющей на рост особей поколения. Сформируем гибридную структуру для озимой формы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \beta)N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t - \xi)N(t - \xi) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g(t)}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}}, w(0) = w_0 \\ \frac{dg}{dt} = rg(t) \left(1 - \frac{g(t)}{K} \right), g(0) = g_0 \end{array} \right.$$

Для второй группы N_1 используем только две стадии с влиянием на убыль поколения начальной численности $N_1(0)$ – конкурентные факторы плотности более выраженные. Добавим температурную поправку $+\chi_C$ и включим коэффициент потребления молодью кормовых организмов $-\zeta N_1(t)$:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N_1(0) + \beta)N_1(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N_1(t) / w(\tau) - \beta N_1(t), & P_2(t, w(t)) \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g(t)}{\sqrt[3]{(N_1(t) + \delta)^2}} + \chi_N, w(0) = w_0 \\ \frac{dg}{dt} = rg(t) \left(1 - \frac{g(t)}{K}\right) - \zeta N_1(t), g(0) = g_0 \end{cases}$$

Соответственно, общий запас для оценки будет формироваться аддитивно: $S=N(T)+N_1(T_1)$. Озимая мигрирующая осень группа, согласно модели, обладала значительно большим запасом стабильности по кривой воспроизводства, потому интенсивный осенний лов в 1980 гг. действительно способен был привести к резкому сокращению естественного восполнения.

Дифференциация репродуктивного поведения внутри большой популяции ускользала ранее от внимания математической биологии. Во всех классических моделях популяции однородные. В естественной среде отношения видов сложнее, чем формализуется в модельных уравнениях.

Далеко не 100% особей одного поколения осетровых достигают зрелости и размножаются одновременно. Группы особей пропускают сезоны размножения. Периодически нарушается гендерный баланс в местах размножения, так как время полового созревания самцов и самок осетровых рыб из одного поколения существенно различается. Самцы северяги созревают на 2 года раньше самок, но самцы не интересны для промысла. Разрешенную квоту на вылов стремились выбрать за счет самок из-за их ценной икры, что губило восстановление многих водных биоресурсов. Квотирование промысла тоннами не гарантирует минимизацию риска деградации популяции, что показывают модельные сценарии. Квотирование изъятия по массе ненадежный метод регулирования природопользования по многим причинам. В случае осетровых рыб (когда они еще были промысловыми видами) квоты нужно было экологически грамотно разграничивать и по гендерному, и по субпопуляционному признаку.

Территориальная разобщенность нерестилищ и разновременность нереста приводит к тому, что в результате создаётся экологическая дифференциация на самом важном этапе онтогенеза – периоде размножения. Различия между сезонными расами у рыб результат длительной эволюции популяций в конкретных условиях. Изолирующие механизмы групп сходные у нескольких видов рыб. У некоторых лососёвых существуют субпопуляции четных и нечетных годов. Для точной оценки соотношения численности и вклада групп в общий уровень воспроизводства необходимы были способы определения принадлежности к ним выловленных особей. Методы анти-

генной дифференциации разрабатывались еще в 1970 гг. Ю.Н. Переварюха (отец автора монографии) получил авторское свидетельство (патент RU 2253970) на определение популяционной дифференциации иммунохимическим методом.

Генетические признаки, обличительные маркеры в ДНК и наследование репродуктивного поведения групп вопросы в настоящее время никак не исследованные и в связи с критическим сокращением численности осетровых рыб Каспия трудноосуществимые, так как негде взять материалы для анализа.

4.3. О РЕАЛЬНОЙ ДОСТИЖИМОСТИ СТАБИЛЬНОГО МАКСИМАЛЬНО ЭФФЕКТИВНОГО РЕЖИМА ВЕДЕНИЯ ПРОМЫСЛА БИОРЕСУРСОВ

В предыдущем разделе рассмотрен аспект мотивации при регуляции природопользования, где часто отмечается стремление к оптимальности при организации данной экономической деятельности. Отметим важный для принятия решений аспект, что обсуждавшиеся ранее формальные методы (VPA и бистатистический) долгие годы служили экспертам для прогнозирования состояния промыслового запаса. Лучших методов никто не предложил. Эти методы оказались не улучшаемые как конструкция гребного весла.

По полученным оценкам далее ЛПП определяли квоты для вылова. Квоты на вылов осетровых рыб (белуги) выдавали, даже когда ловить было фактически нечего, но нужно было выдать квоты, так как по оценкам существовал какой-то гипотетический промысловый запас, способный выдерживать некоторую долю изъятия. Без вмешательства международных организаций так бы продолжалось сейчас выделение квот вылова на несуществующую более популяцию.

Применявшиеся методы недостаточно отвечают на вопрос о максимальном возможном проценте изъятия особей из запаса (достигших промыслового возраста и размеров), которую способна выдерживать данная популяция. Этот уровень полагается установить при решении задачи об оптимальном ведении промысла по стратегии MSY максимального поддерживаемого вылова. Экспериментальная проверка рассчитанного максимально возможного процента изъятия особей из запаса осетровых рыб завершилась деградацией этого запаса.

В общепринятой трактовке стратегии MSY по [220] под оптимальным управлением понимают: «такой режим вылова рыбы, который позволял бы наилучшим образом использовать естественные возможности популяции, не приводя ни к подрыву, ни к недоэксплуатации рыбных запасов». Задача об оптимальной эксплуатации решалась при моделировании множеством раз различными математическими методами и аналитическими, и статистическими и вычислительными моделями и просто мнением авторитетного деятеля.

Проблема организации оптимального изъятия как максимального вылова, которое данная популяция выдерживает неограниченное время, практи-

чески трудно решаемая в реальных условиях по многим причинам. Более того, мы покажем, что мотивация ЛППР при регуляции на достижение этой оптимальности оказывается фактором риска развития сценария, который приводит к коллапсу.

Для целей данной работы интересно анализировать кризисы и крах промысла по фундаментальным причинам биокибернетики – наличия нелинейных и пороговых эффектов в экодинамике, которые становятся следствием внутренней регуляции популяционных процессов в конкурентных биосистемах, являющихся продуктом длительной совместной эволюции многих видов. Вмешательство при достижении некоторого порогового уровня резко нарушает сложившийся баланс в сообществе, значит биосистема уже не имеет тех изначальных свойств, на которых ЛППР основывали свои прогнозы.

Возможны многие сопутствующие причины, изменение среднего возраста и плодовитости из-за селективного изъятия, усиление конкуренции видов из-за нового агрессивного вселенца и др. причины, не являющиеся доминирующими при развитии кризиса, но осложняющие восстановление биоресурсов после их истощения, так как деградация популяции – это еще и разрушение сложившегося размерно-возрастного распределения. Данные сопутствующие интенсивному изъятию дополнительные последствия можно учитывать непосредственным изменением параметров в вычислительных сценариях. Схему изменения популяционных характеристик при перелове (возраста созревания и плодовитости особей) можно алгоритмически реализовать в вычислительной структуре при непосредственном включении предикатов, зависящих от времени и от предшествующей доли изъятия.

Исходя из изложенных целей сценарного анализа кризисных ситуаций в данной работе автор считает неактуальным в современных условиях пытаться далее совершенствовать теорию оптимальной эксплуатации, достаточно теоретически разработанную, но сложно практически применимую. Выбрано основным направлением развития идей сравнительного логико-вычислительного исследования сценариев развития разных типов критических ситуаций.

В разработанном подходе воздействие смещает положение устойчивого равновесия или даже полностью устраняет его. В этом отношении по-иному видится задача достижения оптимального уровня изъятия – максимального улова, который можно изымать неограниченно долгое время. Устойчивое равновесие (или цикл в балансе с биотической средой) в разработанном модельном представлении не будет априори присущим динамической системе. Очевидно, это состояние может разрушаться при чрезмерном воздействии – зависимость трансформируется в невыгодную для экономики форму. Подобный вариант развития событий отражает изменчивость свойств модельной зависимости, которая получена в разработанном методе с перепределяемой правой частью. Рассматриваемый эффект с потерей основного притягивающего равновесия можно получить и в других популяционных моделях. Вопрос в том, какое асимптотическое множество образуется после потери исходного аттрактора и куда движется траектория системы после разрушения равновесия?

Мгновенный переход модельной траектории сразу в состояние неотличимого от нуля не выглядит экологически обоснованным для описания промысловых кризисов. Деграция популяции (таких как осетровые, треска) из-за перелова может растягиваться на десятилетия. В таком случае ЛПР не всегда могут определить приближающиеся последствия истощения. Уловы снижаются медленно, что сглаживается усреднением в отчетности и эксперты предпочитают не замечать негативные признаки, когда они невелики. В такой трактовке для квалифицированных ЛПР неожиданно оказывается проще принимать решения при регулировании запасов короткоциклового вида, запасы которых снижаются для экспертов очевидно и наглядно отражены на графиках. Тогда как запасы (точнее оценка) таких биоресурсов как треска, камчатский краб, на графиках внезапно и резко исчезают после длительного стабильного промысла. Осетровые рыбы Каспия на графиках оценки численности продолжают существовать, только некоторых видов (как взрослой каспийской белуги) давно никто не видел.

4.3.1. Аспект выбора оптимизационной модели для данных биоресурсов

Оптимизация промысла – одна из старейших задач для применения математических методов в попытке анализа поведения живых систем. Если представить, что задача оптимизации состояния популяции в действительности так элегантно решалась, как находится решение точки максимального прироста для популяционной модели на основе уравнения П.-Ф. Ферхюльста с изъятием $\delta N(t)$ или Дж. Хатчинсона с включением запаздывания (или современной модели ограниченного роста численности вида) в таком виде:

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t-\tau)}{K} \right) - \delta N(t),$$

то проблема рационального промысла без рисков деграции была бы исчерпывающе решена, если регуляторы знают начальные условия и оценили K . Для практического применения оптимизационного алгоритма необходимо предварительно убедительно показать, что экодинамика именно регулируемых биоресурсов подчиняется решению выбранного уравнения.

Автор принял решение не вести исследования в направлении стратегий оптимизации именно по причине того, что не видит возможности предложить принципиально лучшее решение после работ известных математиков. По тематике оптимизации эксплуатации продолжают публиковаться новые работы отечественных авторов [221]. Многие известные ученые предлагали свои оригинальные математические оптимизационные решения. В том числе рассчитывали уже оптимум вылова на основе комплексного моделирования экосистемы, как в работе [220] академика Воровича И.И., Суркова Ф.А. и соавторов для популяций хамсы и тюльки Азовского моря как массовых видов планктонофагов после построения модели сезонной динамики планктона.

К оптимизации много подходов. Один из вариантов усложненной оптимизационной задачи в том, что бы представить промышленные популяции, используя параболическое уравнение для плотности биомассы $y(t,x)$, $t \in T$ [35]:

$$\partial_t y + \nabla \cdot (wy) = \Delta(y) + F(t,x,u,y),$$

где $w(t,x)$ задает скорость роста особей, $u(t,x) \in U$ – управляющее воздействие интенсивности промысла, а $x \in D$ – линейный размер особей. Тогда критерий оптимальности определяется максимизацией функции $\tilde{\omega}(t,x,y,u)$ для дохода:

$$\iint_{T,D} \tilde{\omega}(t,x,y,u) dt dx \rightarrow \max.$$

Математики сейчас умеют решать подобные теоретические задачи. Находится оптимизация даже для случаев неоднородного пространственного распределения. Вопрос актуальных исследований СА в том, к чему ведет на практике реального регулирования мотивация на максимизацию функции дохода? В результате частота фиксируемых кризисов рыболовства не снижается и проблема сохраняет актуальность особенно для трансграничных биоресурсов.

Основная сложность практики максимизации прибыли – нахождение оптимальных значений для рассмотренной функции еще не дает алгоритма выработки ЛПР решений при регуляции, которые строятся на ограничениях.

У ЛПР нет возможности в нужный момент непосредственно вмешаться в репродуктивный процесс, улучшить условия воспроизводства популяции в естественной среде (искусственное воспроизводство требует длительных капиталовложений) или нивелировать конкуренцию видов. Функциональные возможности вмешательства со стороны ЛПР ограничены независимо от их мотивации (разрешения, ограничения). По данным причинам в рамках работы говорим о стратегии регуляции, но не об управлении природными биоресурсами.

Цель максимизации экономической выгоды от эксплуатации как таковая не является по мнению многих специалистов сейчас актуальной [222], а по мнению некоторых экологов совсем не считается разрешимой проблемой. П. Ларкин назвал свою работу «Эпитафия концепции максимального уравновешенного улова» MSY [223], где обосновал неминуемые риски для биоразнообразия экосистем при следовании идеям стратегии «Maximum Sustained Yield». Ларкин среди недостатков концепции помимо пространственной изменчивости и биотических факторов конкуренции видов отметил и аспект чувствительность при принятии решений ЛПР в природопользовании к политическому давлению.

Технические возможности отрасли эксплуатации биоресурсов возросли многократно в том числе появились методы быстрого поиска объектов

промысла в том числе с использованием данных ДЗЗ и алгоритмов распознавания. Теперь при ошибочной оценке допустимого изъятия или потере контроля может очень стремительно развиться ситуация критического истощения запасов.

4.3.2. Альтернативный подход регуляции с фиксированным минимально сохраняемым уровнем репродуктивного запаса

Согласно основополагающей для научного рыболовства работе [224] управляемая биосистема в типичном случае реагирует на воздействие линейно: «для поддержания нормального воспроизводства достаточно ограничить интенсивность промысла на уровне минимально допустимой величины нерестового запаса; тогда если не были нарушены условия воспроизводства, то эксплуатируемая популяция всегда приходит в стабильное состояние».

Математически процитированный постулат из трудов Ф.И. Баранова означает – Уверенное ведение промысла возможно только при условии отождествления популяции с динамической системой с существованием глобального аттрактора и отличного от нуля (ограниченного, замкнутого инвариантного множества траектории, математически строгое определение аттрактора дано в работах Милнора). Более того, долгосрочное прогнозирование промысла достоверно только для популяции, если отражающая ее свойства динамическая система не испытывает бифуркаций состояний равновесия с появлением циклов при изменении некоторых из важнейших параметров (плодовитости и выживаемости в раннем онтогенезе). Работы по теории бифуркаций Андронова и Витта появились несколько позднее трудов Баранова по формальным научным основам организации эксплуатации запасов рыб. С тех пор нелинейная теория динамических систем и формальные методы в регулируемом природопользовании длительно не пересекались. Потому такая, казалось бы, очевидная идея поддержания минимально необходимой величины хорошо исполнима только в редких случаях линейных зависимостей и становится трудной с эффектом появления регулярных флуктуаций со значительной амплитуды или присутствия альтернативных устойчивых состояний для динамической системы, интерпретирующей динамику популяций.

Многочисленные примеры в том числе безвозвратного краха промысла, согласно проведенному анализу примеров развития кризисов, свидетельствуют о сложных и главное разнообразных механизмах в регуляции эффективности воспроизводства разных биоресурсов, отражающихся в нелинейных эффектах.

Отметим, что возможности появления альтернативных устойчивых режимов (отражаемых в разработанных моделях сосуществующими инвариантными замкнутыми притягивающими множествами – аттракторами) не укладываются в традиционные представления о свойствах регуляции эксплуатируемой популяции, для которых обязательно должно находиться исходное состояние максимальной продуктивности согласно теории асимптотического роста. Популяция способна оказаться в результате воздействия в циклическом режиме с глубокими минимумами, что противоречит пове-

дению итераций модели Рикера, но такое поведение итераций этой модели есть следствие проявления сценария хаотизации Фейгенбаума, общего для целого функций и не имеющего биологической интерпретации.

Возможность появления цикличности не опровергается реальными наблюдениями. Циклические промысловые популяции известны (дальневосточная сардина иваси), но мы не знаем, как изменялась численность популяции до времени интенсивного промысла, и соответственно организации статистического учета изъятия. Сейчас при анализе ситуаций оперируем данными о популяциях, уже долго находящихся под интенсивным воздействием.

В современных условиях нарастающего давления важнее для экономики отрасли поддержание долговременного «неистощающего» уровня эксплуатации биоресурсов. Стратегически принятие фактора нелинейной регуляции и вероятности пороговых скачкообразных эффектов означает замещение концепции оптимизации промысла методиками *минимизации риска* ситуации деградации биоресурсов. Многие авторы, как в [225], например, академик Г.Г. Матишов и Г.Д. Титова, называют тактику избегания риска предосторожным подходом. Есть мнение, что принцип предосторожности станет помимо желания экономистов единственно верным в современных условиях. У подхода минимизации риска перелома много противников из-за заведомой экономической неэффективности осторожного природопользования. Ведется работа по внесению понятий данного принципа в международные правовые документы. Ведь регуляция промысла основывается на принципах, имеющих юридическую силу, а не решения математических задач. В работе [226] анализируется юридическая категория «предосторожность» и ее трактовка в документации применительно к совокупности международных правовых норм, которые действуют при эксплуатации морских трансграничных биоресурсов.

Ведущую роль в рассматриваемой проблеме сохранения морских трансграничных биоресурсов играют именно международные организации, создающие нормативную базу для регулируемого природопользования.

4.3.3. Роль методов моделирования биосистемных процессов в формировании нормативной базы регулирования природопользования

В международных правовых документах законодотворцы должны совершенствовать формализованные принципы регуляции природопользования в соответствии с изменяющейся экологической ситуацией, которую необходимо отслеживать средствами мониторинга и прогнозировать дальнейшее развитие процессов. Сценарные имитационные модели с включаемой логикой выработки воздействия выполняют консультативную функцию научного сопровождения для параметров принимаемых документов и обоснования нужности включенных ограничительных мер. Практические результаты моделирования процессов должны отражаться в форме рекомендаций для регулирующих органов, чья деятельность основана на международных нормативных документах.

Моделирование показывает, что в долгосрочной перспективе двухлетний своевременный мораторий оказывается экономически выгоднее четвертьвековой деградации запасов. Часто моратории на промысел вводят уже постфактум, после очевидной деградации популяции. В некоторых случаях при малой плотности морской популяции промысел становился экономически нерентабельным и прекращался даже без указаний регуляторов. Ситуацию уменьшения промыслового давления (количества траулеров) из-за снижения выгоды ниже порога рентабельности можно считать гибким опосредованным механизмом регуляции воздействия. Мелкие рыболовецкие предприятия обанкротятся или сменят регион работы. До стадии «коллапса запасов» ситуация перелома после сокращения числа рыболовных судов не доходит, но в результате популяция после перелома будет восстанавливаться длительное время.

Без внесения в документы обязательных и ясных для всех промысловых организаций предписаний и ограничительных мер исчерпание запасов повторится по аналогичному сценарию. Необходимо разработать универсальную юридическую формализацию ситуации последствий коллапса биоресурсов в нормативных актах, где ввести понятия перелома и сценария коллапса запасов.

Сейчас в международных конвенциях отдельно оговариваются запреты на виды, находящиеся под угрозой исчезновения. Треска и анчоус к таким видам в настоящее время не относятся, но локальные популяции морских рыб регулярно испытывают чрезмерное промысловое давление.

Из простых моделей ограниченного «логистического» роста численности следует очевидное решение по созданию «предосторожности» при промысле –подход «Threshold harvesting» [227], когда эксплуатация разрешена только при состоянии запасов выше установленного порога биомассы запаса. При таком подходе минимальный порог для разрешенного изъятия не должен быть отождествлен с неустойчивым критическим равновесием, точкой L из уравнения А.Д. Базыкина. Проблема применения (особенно для популяций, которым свойственна цикличность) тоже очевидная, – разные методы дают различные оценки состояния запаса. Состояние популяции в окрестности L неустойчиво.

В настоящей работе предлагается выявлять динамические признаки развития кризисной ситуации, которые продемонстрированы далее в модельных сценариях. Согласно одной из идей работы целесообразно уделять внимание нелинейным особенностям динамики запас-промысел, которые с высокой долей вероятности могут быть *предвестниками приближения* к критическому порогу и коллапса. Даже если такие изменения происходили 5 или даже 10 лет назад. Для этого в данной работе было введено понятие об общем тренде развития ситуации, которая задается набором параметров, начальных условий, правил переключения для гибридного автомата и логикой изменения воздействия.

Сокращение ценных запасов до исторического минимума при хищническом отношении к биоресурсам повлечет остановку промысла на годы, потерю капиталовложений, невозврат кредитов для банков. Неизбежны экономические убытки и социальная депрессия для регионов, где морской

промысел был важнейшим доходом, как для долгой эксплуатации трески в водах канадской провинции Ньюфаундленд и Лабрадор.

На основе анализа целей и типичной мотивации у ЛПР при регуляции природопользования рассмотрим пример регулирования изъятия трески вплоть до коллапса запасов. Ситуация данного коллапса выбрана как наиболее заслуживающая отдельного изучения по причине наличия информации, но это далеко не уникальный пример подобного критического развития регулируемого природопользования. Ситуации с итоговым коллапсом биоресурсов имеют и существенные отличия в своей динамике, затрудняющие своевременное принятие необходимых решений по заранее определенному шаблону.

4.4. КОЛЛАПС ЗАПАСОВ ТРЕСКИ СЕВЕРО-ЗАПАДА АТЛАНТИКИ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СТАДИЙ ПРОЦЕССА

Исследования методами системного анализа в области регулируемого природопользования, требующие формализации проблемной ситуации, предполагают в том числе сопоставление типов развития схожих реально наблюдавшихся ситуаций в экодинамике и набора действующих факторов на основе свойств математических объектов (в данном исследовании гибридных систем с предикативным переопределением). Данным аспектом сравнительного обзора случаев наша работа в рамках системного анализа отличается от традиционных уже и неоднократно решавшихся задач моделирования популяций гидробионтов.

В настоящем разделе рассмотрим нелинейные аспекты наиболее значимого, достоверно и подробно описанного по данным статистики случая критической популяционной динамики при регулируемой эксплуатации запасов трески.

Соответственно поставленной общей цели развития методов анализа ситуаций, для оценки последовательности событий реальных ситуаций кризисов при ведении промысла биоресурсов необходимо выбирать сведения, наиболее полные и достоверные из всех возможных описаний популяционных процессов, развивавшихся при воздействии квотируемой эксплуатации. Данные учета и промысловой статистики по вылову атлантической трески в канадских водах и камчатского краба отвечают необходимым критериям. Только достоверные данные по промысловой статистике и квотированию могут получить обоснование при моделировании сценариев с событийными изменениями.

Как было отмечено ранее, к эффекту коллапса приводит не монотонное истощение. До того момента, как промысловая популяция окончательно перешла через критическое значение к стадии коллапса, уловы могут возрастать и снова падать и так вплоть до минимальной воспроизводящей убыль численности.

Началом отсчета развивающейся ситуации, которая приведет потом запас к деградации, лучше всего считать тот момент, когда определяемая доля изъятия начинает трансформировать существовавшее устойчивое состояние (цикл или равновесие). Как мы показали, при рассмотрении случаев коллапса важна длительная предыстория, соответственно для анализа необходимы сведения – долгосрочный ряд данных наблюдений за популяцией и промыслом.

Среди всех ситуаций деградации запасов при регулируемом промысле существуют наиболее интересные для практического применения разработанных нами методов построения структуры модели с триггерными функциями моделирования. Данная оригинальная методика моделирования специально предназначена для описания нелинейных эффектов быстрых изменений, возникающих в реальной популяционной динамике.

Коллапс запасов атлантической трески *Gadus morhua* в Северо-Западной Атлантике зафиксированный 2 июля 1992 г. регулирующими рыболовство организациями провинций Канады считается самым масштабным по экономическим последствиям крахом рыболовства [228]. Событие было названо «Великий канадский рыбный коллапс» (The great Canadian fishery collapse).

Предлагаемая нами идея анализа ситуации в том, за подобными событиями помимо внешних и *регулируемых* факторов кроются нелинейные эффекты в саморегуляции воспроизводства, которые не были вовремя учтены в прогнозах. Именно СА неожиданного трескового коллапса привел автора к идее наличия принципиальных и качественных отличий резкой коллапсирующей динамики от постепенного и монотонного истощения запасов – распространенного в рыболовстве явления «перелова запасов», как правило обратимого явления.

Из всех имеющихся материалов с описаниями событий трескового кризиса наиболее интересны для анализа принимаемых при управлении запасом решений три графика на одном рис. 3.14 из обзорной работы по данной проблеме [229]. Коллапсу трески посвящено много и научных работ и публицистических статей, выступлений политиков и экономистов. Сокращение запасов без их восстановления такого ценного вида биоресурсов это не региональная, но международная проблема.

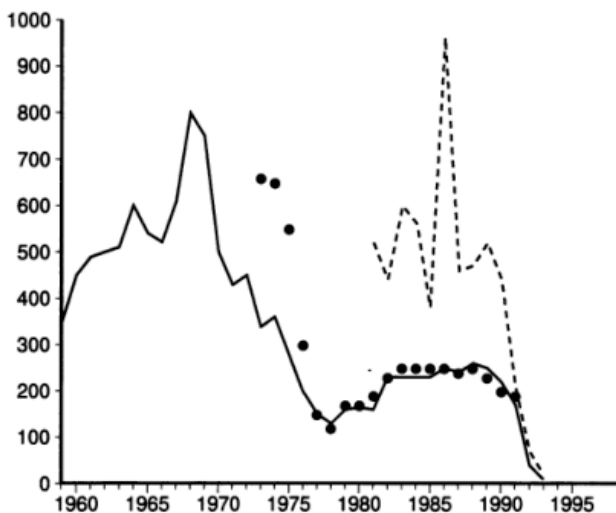


Рис. 3.14 а. Данные об уловах, оценках запаса и выделенных для промысла квотах для ситуации коллапса трески у побережья Канады по данным [229]

На следующем рисунке показана динамика уловов трески за весь период ведения в регионе контролируемого промысла.



Рис. 3.14 б. Данные об уловах трески с 1850 г. вплоть до ситуации коллапса трески у побережья Канады 1992 г. по данным [229]

На графике данных с 1850 г. по 2011 г. отчетливо виден выраженный пик уловов 1968–1971 годов. Во время краткого пика уловы резко отличались по сравнению с ровными среднесулетними показателями за столетие, что не было связано с улучшением «условий нагула». В это время появляются мощные траулеры с большим запасом горючего способные облавливать большую акваторию. Стабильно получаемые более ста лет в этом регионе медленно увеличивавшиеся уловы (падение вылова связано с войнами) и так были достаточно высокими для популяции и промысел трески у атлантического побережья Канады был рентабельный. Летом 1992 г. рыбообрабатывающие заводы закрылись, лодки и траулеры остались в доках, а сотни прибрежных хозяйств, поколениями зависевших от рыболовства, наблюдали, как в одночасье с новым словом «коллапс» исчезла экономическая опора их жизни. После введения моратория 12% трудоспособного населения Ньюфаундленда и Лабрадора потеряли работу, а за 10 лет население провинции сократилось на рекордные 10%. Треска не вернулась к былому обилию спустя три десятилетия. Вылов деликатесных и дорогостоящих донных беспозвоночных, теперь размножившихся без доминирующего хищника, позволил смягчить экономический эффект [230]. Однако к 2009 г. биоресурсы креветок и крабов снова оказались критически истощены. Учитывая прошлый опыт, регулирование изъятия донной фауны их пришлось резко ужесточить и минимизировать квоты.

По современным оценкам промысловый запас трески к 2020 г. составляет около 7% от исторически максимального в данном регионе. Популяции трески в Атлантике существуют южнее, так что в перспективе за счет медленной миграции и диффузии групп особей постепенно запас должен восстанавливаться.

4.4.1. Обоснование регулирующих воздействие решений при неполной информации о состоянии биоресурсов

На рисунке 3.14 *a* сплошной линией показана динамика уловов трески. Точками размеры квоты, предназначенной для вылова, в тысячах тонн. Пунктиром обозначена рассчитанная предполагаемая величина запасов трески.

В анализе сценария отметим пять важных моментов до точки коллапса:

1. Оценка численности (что выяснилось только после коллапса в 1995 г.) была завышена. Показатель объема доступных запасов, полученный по когортным моделям был сдвинут вверх, что специалисты подтвердили достаточно скоро в работе [231]. Применяемая методика оценки запаса была излишне оптимистична. Иначе специалистам столь внезапное исчезновение большой популяции объяснить было невозможно, огромные запасы существовали только на бумаге.

Аналогичную переоценку общей численности запаса, которую получали аппроксимированием данных траловых съемок (обловов траллом с коэффициентом уловистости определенных квадратов акватории), мы ранее установили в анализе причин деградации осетровых рыб Каспия. Основную погрешность вносит коэффициент уловистости орудий лова для каждого вида разный. Иногда для оценки состояния популяции лучше относительные величины: количество пойманных рыб за 100 часов тралления стандартизованным траллом. В случае трески по всей видимости не учли увеличение площади облова мощных эффективных траулера в расчете на одну вылавливаемую ими тонну улова.

2. Значительных в процентном отношении падений уловов трески у берегов Канады без их полного восстановления на всех имеющихся графиках отмечено два. Коллапсом считается только второй по времени. Сравнение динамики оценок запаса трески и её вылова с данными о других ситуациях кризиса промысловых видов говорит о том, что первое падение уловов было важнее.

Сравнивая с другими ситуациями, мы можем уверенно констатировать – деструктивные процессы для популяции трески начались именно с момента исторического максимума уловов, спровоцировавшего промежуточный кризис.

3. После первого падения уловов выделенная квота четыре года не осваивалась промыслом, что не было своевременно расценено как повод для корректировки методики расчета допустимых уловов. Такая *десинхронизация регулирующих решений* возможна, если при принятии решений ориентироваться на усреднённые за 5 лет показатели объема уловов и возраста рыб.

4. После первого кризиса популяция не смогла выдержать таких объемов изъятия, которую она ранее до интенсификации вылова успешно выдерживала много лет.

5. Репродуктивный потенциал популяции изменился достаточно резко, так как восстановления запасов трески не произошло вопреки экспертным прогнозам.

В результате первого падения уловов в 1978–79-е годы промысловики не могли несколько лет освоить выделенную им квоту. Потом реальные уловы пришли к консенсусу с выделенными промыслу объемами квоты вылова. Долго в 1980-е годы квота успешно осваивалась, почти не менялась, так как не было видимых статистикам причин для упреждающего регулирования снижения квот. Не наблюдалось очевидного для ЛПР повода для более жесткого регулирования.

Онтогенетическое развитие и экология воспроизводства трески сильно отличается от жизненного цикла лососевых рыб. Именно в этот отрезок времени вылавливали не затронутые первым переловом поколения трески, которые по экспертным оценкам должны были размножиться после коллапса. Доля изъятия трески в это время превышала 0.445.

Правительства провинций Канады строго регулируют сейчас морской промысел, но в сезоны непосредственно перед коллапсом выделенные ими квоты полностью не осваивались, что говорит о системных переоценках состояния запасов. Многие авторы обсуждали ситуацию с деградацией этого массового доминирующего хищника в водах провинции Ньюфаундленд и Лабрадор. В качестве причин рассматривались ошибки в регуляции рыболовства, недостоверность оценки пополнения поколений из-за погрешности методов учета, селективность изъятия крупных рыб, сопутствующие природные факторы течений у берегов Северной Америки. Гипотетическое сильное влияние негативных климатических факторов среды и океанических течений на выживаемость молоди трески опровергнуто в аналитической работе Хагчингса и Мэйерса [232]. Методика достоверной оценки промыслового запаса представляет отдельную важную научно-практическую проблему, не разрешимую только математическими методами, нужны средства мониторинга.

Получение недостоверной оценки запаса и особенно завышение реального состояния запаса экспертами чрезвычайно негативно влияет на развитие кризисных сценариев. Важна не величина % исходного превышения оценки реальной численности, но ее систематический характер, так как ошибочная оценка в результате с течением времени увеличивает расхождение при использовании когортных методов.

На рисунке 3.15 длительный ряд данных об уловах трески с 1850 г. Из этих сведений очевидно, что популяция выдерживала долгое время достаточно высокий процент промыслового изъятия, но который показался не оптимальным. При успехе и наличии средств резко формируется мотивация у ЛПР на получение еще большей прибыли (что в обыденной жизни называется словом «соблазн») – так для данной цели обосновывают решение по увеличению квоты изъятия. Это решение ЛПР вполне может быть рациональным. Вопрос в том – как именно начать увеличивать разрешенное изъятие, постепенно или одномоментно.

Экономическая мотивация по принципу «здесь и сейчас» в конце 1960-х гг. возобладала у ЛПР над осторожностью. Из графика ясно, что принято решение не осторожничать, но одномоментно резко увеличить уловы трески, так как запас считался стабильным и необходимо было оправдать капиталовложения в модернизацию рыболовной отрасли. Альтернативный

вариант регуляции – увеличивать изъятие поэтапно, что могло быть тоже экономически рационально с точки зрения сбыта рыбной продукции – такой товар не может храниться долго, а внезапный избыток товара на рынке снижает его цену, порождает ненужную конкуренцию поставщиков.

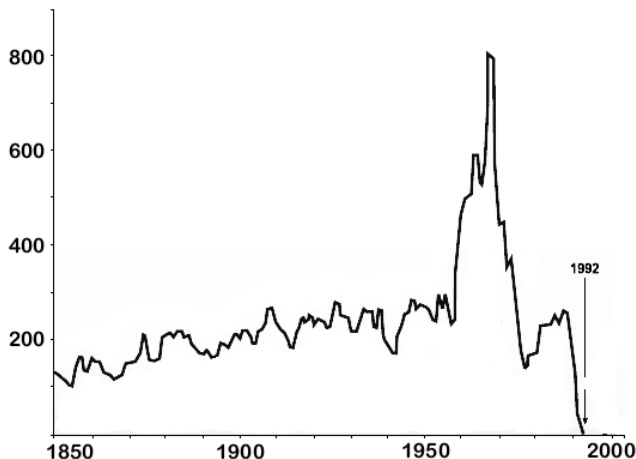


Рис. 3.15. Динамика уловов трески у побережья Ньюфаундленда и Лабрадора (тыс. т) с 1850 г. с промежуточным кризисом и коллапсом в 1992 г.

В описываемой ситуации ЛПР не рассматривали сравнительно альтернативные сценарии увеличения изъятия. Можно предложить варианты, которые будут более гибкими и оставят возможности пересмотра и корректировки решений без фатальных последствий, чем наиболее простое решение – моментальное увеличение квоты до величины, которая кажется ЛПР оптимальной. В качестве одного из выводов СА отметим, в рассмотренном случае ЛПР переоценили роль ситуативной экономической выгоды от эксплуатации объекта, не рассмотрев альтернативные алгоритмы долгосрочного повышения прибыльности от природопользования и выбрали наиболее рискованный вариант максимизации прибыли.

Традиционные методы математического моделирования при прогнозировании состояния биоресурсов не учитывали изменчивую мотивацию ЛПР и приоритетность целей при природопользовании. По изложенным причинам изменения мотивации ЛПР при принятии решений и стратегии регулирования в модели динамики эксплуатируемых биоресурсов важны и рассматривать их варианты позволяют сценарные методы СА и развитые в данной работе предикативно-переопределяемые вычислительные структуры.

4.4.2. Экономические и экологические последствия коллапса трески

Крах промысла популяции на большой акватории такого долгоживущего вида и доминирующего хищника как треска был внезапным и для ответственных регуляторов, и для простых работников отрасли. Тресковый кри-

зис стал социальной проблемой региона. Рыболовецкие ресурсы удалось частично перенаправить на добычу донных беспозвоночных, размножившихся и ставших в среднем крупнее из-за изъятия из среды их доминирующего хищника.

Для популяционной экологии данного промыслового вида ситуация коллапса не остается без длительных последствий. Именно изменения в адаптированности популяции предопределяют более длительные сроки восстановления, чем предсказывали эксперты (в данном случае это делали уже независимые специалисты, а не ЛПР при природопользовании), ориентировавшиеся на хорошо им известные, но уже не актуальные значения основных популяционных характеристик.

Сравнивая ситуацию трески с ранее изученной нами деградацией осетровых рыб, отметим, что первый кризис перелова, после которого произошло промежуточное падение уловов, запустил деструктивные внутривидовые процессы, которые должны быть вовремя замечены. Селективность изъятия крупных и плодовитых особей приводит к последствию, когда в популяции станут преобладать «тугорослые» и быстросозревающие генетические формы. Переход к быстрому созреванию порождает короткоцикловые формы, но они отличаются, к сожалению, повышенной посленерестовой смертностью, так как ресурсы организма тратятся на скорейшее половое созревание (у рыб на сложный процесс формирование репродуктивных желез гонад).

Полиморфизм жизненного цикла и «краткоцикловость» это адаптация вида к сложным ограниченным условиям. Известный отечественным рыболовам пример: крупная балтийская корюшка *Osmerus eperlanus*, нерестящаяся в Неве, и короткоцикловая форма этого же вида – мелкий озерный снеток. Популяция короткоцикловой формы вида – это малоценный объект промысла.

Сделаем выводы о необходимом поведении моделирующей динамической системы. Промысел атлантической трески *Gadus morhua* в водах Канады показал максимальные результаты на рубеже 1970-х гг., но далее не удержался на среднемноголетнем уровне. Как мы видим на графике полувековой динамики промысла, неотвратимое истощение в форме коллапса последовало не сразу вслед за годами рекордных уловов. Первичное падение уловов приостановилось в некотором новом равновесии. Промысел преодолел локальный минимум. Уловы продемонстрировали тенденцию к росту и поводов для усиления ограничений или моратория экспертами не было отмечено. Ранее такие объемы изъятия не представляли проблемы, и популяция их долго выдерживала. Наблюдалось десятилетие 1981–90-е гг. не столь обильных, но приемлемых колеблющихся объемов вылова и оптимистичных ожиданий по его наращиванию перед крахом промысла. В сезоны перед мораторием уловы даже показали тренд к увеличению. Исходя из динамики оценок запаса и уловов в вычислительном модельном сценарии коллапса у траектории тоже должно быть две трансформации фазового портрета.

Можно долго дискутировать о совершенных ЛПР ошибках. В данном случае взаимодействие (в форме эксплуатации) происходит с частью био-

системы, для которой характерны адаптация и саморегулирование. Экология сообществ устроена так, что освобождающая ниша и место трофической цепи будет занимать конкурирующими видами. Биосистема начинает меняться под новым воздействием. Один из факторов обратной связи – каннибализм трески в отношении собственной молоди, если поколение молоди обильно.

В анализе Рэнсома Майерса [233] развитие событий объяснялось тем, что естественный тренд снижения численности трески мог совпасть с увеличением реального процента промысловой смертности из-за системной переоценки ее запасов. В литературе есть аналогичные примеры, как с мониторингом запасов минтая Охотского моря в работе Л.М. Зверькова [234], где выявлены ситуации, в которых применяемые методы расчета завышают ожидаемое пополнение от переоцененного нерестового запаса, когда в реальности уже происходит его существенное убывание.

До какой степени глубоким является возникший популяционный кризис эксперты поняли через пять лет. Изначальный мораторий был введен на восемнадцать месяцев. Биологи Рафгарден и Смит [229] с оптимизмом прогнозировали в 1996 г. восстановление промысла трески у берегов Ньюфаундленда и Лабрадора через девять лет, но возобновления промысла не произошло. Темпы восстановления популяции трески оказались гораздо ниже всех прогнозов, что составляет главную научную проблему данного сценария. Никто из авторитетных экспертов не смог предсказать 27-летнюю деградацию ценной локальной популяции. Единственное логическое объяснение ситуации – воспроизводство запаса (пополнение в расчете на нерестующую самку) сокращалось непропорционально резко убыли нерестового запаса.

Осмысленный опыт кризиса 1992 г. не улучшил методiku организации предосторожного промысла. Самые свежие сведения [235] говорят о признаках сходного истощения запасов южной популяции трески в заливе Мэн, где при определении промысловой нагрузки не были учтены негативные для неё изменения течения Гольфстрима. Численность трески залива Мэн продвигалась к деградации, испытывая при этом значительные по амплитуде флуктуации.

Эксперты не выработали консенсуса о причинах коллапса для случая трески, но много было выдвинуто версий и гипотез, в том числе для оправдания своих просчетов. Для обоих случаев коллапса трески важный методический аспект в том, что специалисты не смогли представить реалистичный прогноз о темпах регенерации запасов. Введенный властями в 1992 г. Ньюфаундленде и Лабрадоре изначально краткосрочный мораторий выразился в неожиданных для ихтиологов четверть вековых вынужденных и угнетающих экономику Востока Канады промысловом локауте.

В результате анализа ситуации сформулируем вопрос, на который нужно ответить в модельных экспериментах. Какое необходимо превышение уровня изъятия в процентах над критически допустимым (или оптимальным с точки зрения концепции MSY) для реализации сценария коллапса с выявленными нами аспектами динамики на основе приведенных графиков оценок квот и запасов?

Согласно выдвинутой в данной работе гипотезе на основе общения ситуаций кризисов биоресурсов, такое опасное превышение может в процентном отношении быть незначительным и не достигать даже 5%, когда запас ранее выдерживал более 60%. В результате малое, с точки зрения регулятора, превышение допустимого изъятия своевременно не корректируется при регулировании квот. В случае, если регуляторы не видят угроз согласно их методам оценки, то установленное чрезмерное воздействие становится не ситуативным, но систематическим.

4.4.3. Выявление действия порогового эффекта в воспроизводстве при снижении биомассы нерестового запаса

Изложенные аспекты регулирования промысла запасов с нелинейной регуляцией воспроизводства подтверждают, что перспективным направлением является дальнейшее развитие сценарного моделирования как комплексного подхода на основе сравнительного *анализа исследуемых ситуаций*. Однако, динамика ситуаций известных кризисов эксплуатируемых биоресурсов имеет качественные отличия и биологические, и с точки зрения теории динамических систем. Из-за разнообразия кризисных явлений сравнивать сценарии обосновано *внутри группы* каждого классифицируемого по возникновению различных нелинейных эффектов конкретного *типа развития популяционного* процесса.

Популяции крупных и ценных для экономики гидробионтов (рыб, моллюсков, крабов) после резко возникшего кризиса восстанавливается совсем не так быстро, как должно следовать из полученной при благополучном состоянии популяции статистики и расчета численности в череде облавливаемых поколений. Именно отсутствие статистически достоверного тренда восстановления истощенных запасов, ожидаемых согласно модельным прогнозам, основная проблема в сценарии кризиса у крупных и долгоживущих видов. Предполагалось скорое восстановление за счет еще неиспользуемых промыслом гипотетически многочисленных резервных поколений трески, но их численности неожиданно не хватило. Проблема исчерпания запасов трески не сводится к своевременному выявлению признаков истощения. Есть основания полагать, что за стремительным развитием событий скрыты нетривиальные особенности репродуктивного процесса.

Исходя из вышеизложенного, мы вправе предположить действие описанного ранее порогового эффекта. Приведем еще один интересный график, показывающий динамику расчетной биомассы нерестового запаса трески SSB рис. 3.16. Современные оценки из отчета [236] непосредственным образом подтверждают сильно выраженное действие порогового эффекта в воспроизводстве трески. Данное явление следствие существования критического уровня численности, после которого воспроизводство резко уменьшается. До трескового кризиса ранее такое стремительное проявление эффекта Олли было труднообъяснимым для подобного многовозрастного запаса, и угроза не рассматривалась экспертами при принятии решения о продолжении промысла.

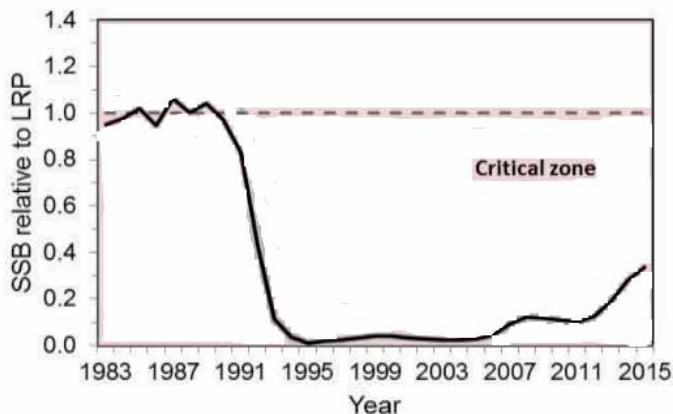


Рис. 3.16. Данные о динамике биомассы нерестового запаса SSB трески у провинции Ньюфаундленд и Лабрадор относительно критической уровня LRP млн т по оценкам из [236] с явным пороговым эффектом

С 2015 г. отмечается уверенный рост SSB популяции и к 2030 г. промысловики ждут достижение критической отметки запаса для открытия промысла. Вымирание треске не грозит, что отличает эту ситуацию от деградации волжских осетровых. Мораторий соблюдается. Популяция не погибла полностью и медленно восстанавливается, но на восстановление влияют и стохастические факторы. Возможен постепенный приток особей из соседних регионов, так как треска в океане образует несколько локальных популяций.

Коллапс привел к изменениям во всей трофической цепи прибрежных вод. После деградации популяции доминирующего хищника качественные изменения произошли в сообществе донных гидробионтов. Поток энергии стал в большей степени оставаться в бентосной фауне. Промысел у берегов Лабрадора переориентировался на донных беспозвоночных, увеличивших биомассу без пресса основного хищника. Креветки и моллюски вырастают значительно крупнее. Аналогичная ситуация наблюдалась и для фауны в Каспийском море, где начался промысел ставших крупными бычков, [237] они заняли нишу после истощения осетровых рыб, их хищников и основных потребителей бентоса. Изменилась размерно-возрастная структура популяций моллюсков, которые ранее потреблялись осетровыми. К 2000 г. стали преобладать крупные особи.

Отметим негативный аспект реакции трофической цепи на коллапс хищника. Высокую продуктивность обеспечивают молодые организмы. Исторически запасы осетровых рыб поддерживала кормовая база бентоса с низкой биомассой, но с высокой продуктивностью. Бентосные организмы так приспособились к прессу выедания рыбами. Укрупнение средних размеров объектов кормовой базы негативно сказывается на воспроизводстве рыб. Доступный рацион для молоди осетровых и трески в реальности сократился.

4.4.4. Сравнение аспектов динамики коллапса запасов трески с другими ситуациями деградации промысловых биоресурсов

В ситуации с коллапсом трески эксперты не приняли необходимого решения своевременно. Ошибочные решения в теории экспертного управления бывают *случайные*, а бывают *систематические*. С целью подтвердить наш вывод о систематическом характере сценариев коллапса достаточно сравнить ситуации.

Оказалось, что нетрудно указать аналогичные примеры развития ситуаций, что описанный сценарий не является следствием редкого стечения обстоятельств в море или казусом отображения разнородно собранной статистики. С точки зрения теории о нелинейном характере зависимости запаса и пополнения, которая математически отражается функцией с более чем одним экстремумом и неединственной стационарной точкой-равновесием, это явление коллапса *закономерное следствие* методики экспертного регулирования на основе обработки недостоверной информации и экстраполяции популяционных трендов. Как мы отмечали, эффективность воспроизводства может быть высокой достаточно близко от критического состояния запаса.

О ситуации с кризисом волжских популяций осетровых рыб в 1989–91-е г. с последующей затянувшейся долгой деградацией писалось нами и другими авторами достаточно подробно. Обратим внимание, что деградация локальных куринских популяций в Азербайджане произошла аналогично резко еще 1960-е годы.

Для обоснования *закономерности развития* процесса, который ведет биоресурсы к коллапсу, мы приведем еще один нетривиальный пример случившегося коллапса после выраженного пика улова и последовавшего двенадцатилетнего интервала промысла с перемежающимся трендом увеличения и снижения уловов и отмеченной нами ранее как важный признак ситуации предшествующей коллапсу – псевдостабильзацией динамики уловов перед финальным коллапсом запасом, за которым следует запрет на промысел.

Динамически схожая ситуация развивалась для промысла сига *Coregonus clupeaformis* в озере Онтарио, но с последующим восстановлением – рис. 3.17 (где отдельно показана разрешенная квота на вылов) [238]. Как и треска популяция сига долгое время выдерживала высокую долю изъятия. Потом при росте уловов и благополучном состоянии запаса доля разрешенного изъятия увеличивается. Уловы значительно возрастают на несколько лет, потом добыча резко падает, но падение стабилизируется на приемлемом для промысла уровне достаточно долго, около 15 лет уловы выглядят стабильными. Развитие этого процесса завершается коллапсом, когда «псевдостабильзация» завершается.

Повтор явления популяционного кризиса сига в 1990-е годы и случаи остановки промысла свидетельствуют о *систематическом* характере переоценки способности данных биоресурсов к самовосстановлению и некорректности применяемого экспертного метода установления допустимого изъятия. Запас не достиг стабильного состояния при высокой численности,

но находился ближе к окрестности не устойчивого, когда промысел был возобновлён.

Пример деградации сига динамически схож с ситуацией коллапса трески.

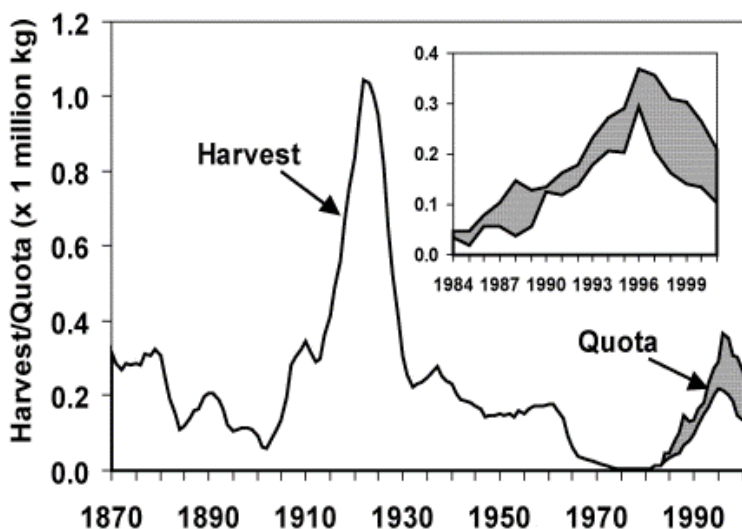


Рис. 3.17. Динамика уловов сига озера Онтарио в млн кг. с коллапсом в 1965 г. и восстановлением популяции к 1985 г. [238]

Если выделенная квота не может быть освоена промыслом на 20% и более процентов, то это признак неточности используемых данных и неверной интерпретации статистики. Каждая ситуация кризиса имеет собственные аспекты дополнительной смертности. Для трески это был каннибализм, а для сига инвазия естественного врага. Дополнительным неучтенным в промысловых прогнозах фактором смертности в случае сига Онтарио стала инвазия в Великие Озера паразита – морской миноги *Petromyzon marinus*. С чужеродной миногой активно и целенаправленно боролись. Через 20 лет популяция сига в Онтарио начала восстанавливаться, вновь открыли промысел, но выделенная квота для вылова снова оказалась чрезмерной (и разрешенная квота даже не смогла быть полностью освоена промыслом). После возобновления промысла ситуация с переловом запасов озерного сига повторилась, как и предсказывает принципиальная схема развития коллапса при экспертном регулировании, которое отличается от традиционного понимания задачи управления. Воздействие изменяет состояние живой системы не с таким результатом, как можно было ожидать, и не может повлиять на принципы их функционирования.

Отметим, что согласно графикам промысловой статистики на рис. 3.18 популяции сига в некоторых из Великих Озер не восстановились до промыслового уровня. В таких ситуациях требуются искусственные меры, интродукция особей. Пример показывает, что восстановление запасов после коллапса бывает различным. Сценарии отличаются для случаев, если популяция полностью или не полностью репродуктивно изолированная.

Большинство вариантов прохождения кризиса популяций в других озерах особенные и требует отдельного обсуждения, так как материалы учета имеются по Великим Озерам, но этот сугубо экологический вопрос оставим вне рамок данной монографии.

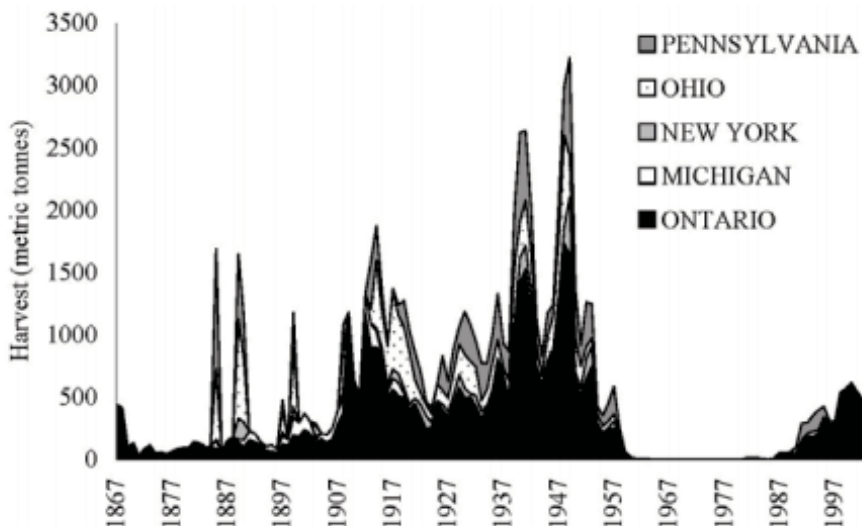


Рис. 3.18. Различная динамика восстановления пяти локальных популяций сига Великих Озер после коллапса запасов

Стохастические факторы среды размножения могут вмешаться и сделать в любой момент рассчитанное оптимальное изъятие чрезмерным. При этом опасный режим, когда превышение изъятия оказывается на первый взгляд незначительным и малозаметным. При остановке ведения промысла после административного моратория. Весьма вероятно влияние стохастических факторов среды на улучшение условий восстановления запасов. Из приведенных на рисунке графиков динамики промысла сига по пяти Великим озерам Северной Америки начиная с 1867 г. мы видим, что состояние, которое можно определить термином «псевдостабильзация» далеко не единственный вариант динамики после первого этапа чрезмерного вылова на пути к итоговому коллапсу. Для многих популяций отчетливо наблюдается сразу после двух или трех сезонов пиковых уловов флуктуационный (но не в строгом смысле циклический режим) режим изменений численности. Динамика таких запасов характеризуется значительной волатильностью, отражающейся на объемах промысла.

4.4.5. Роль алгоритма принятия регулирующих решений в возникновении коллапса при экономическом использовании популяций

Развитие метода модельного анализа сложных ситуаций в экодинамике требует не только математической формализации факторов изменения

состояния объекта при воздействии. Для анализа причин развития экстремальной ситуации важна идентификация принципов регуляции и алгоритмов выработки применявшегося уровня воздействия на биосистему. Информация о ситуации коллапса трески позволят обсудить применявшиеся принципы и оценить их релевантность.

В ситуациях масштабных кризисов возникает вопрос о том, насколько грамотными были решения и компетентными те ЛПР, кто их принимал и актуальными методы, которые ЛПР использовали. Отметим, что к моменту трескового коллапса к 1992 г. у экспертов из ответственных за регулирование промысла организаций имелись уже достаточные для работы с уравнениями вычислительные мощности (по сравнению с работой над ИС «Азовское море» в 1982 г.) и разнообразный развитый математический аппарат для моделирования динамики запасов. Существовали два десятилетия международные научные школы в данной области оптимальной эксплуатации биоресурсов, опубликовавшие много теоретических работ по решению проблемы рационального природопользования. Именно канадская научная школа экологического моделирования для задач рыболовства считалась ведущей. Можно отметить обобщающую работу Барроумена и Маейрса [239] о роли и разновидностях кривых зависимостей в эффективности воспроизводства, но на практике эту теорию применить не удалось. В Канаде издавались основные тематические научные журналы по управлению биоресурсами. Следовательно, ситуацию, которая завершилась итоговым коллапсом трески, нельзя отнести к последствиям низкой научной квалификации и заведомой некомпетентности или явной ангажированности принимающих решения ответственных лиц.

После коллапса и вынужденного моратория на промысел специалисты естественно рассматривали причины того, что промысловое давление на популяцию трески не было уменьшено регуляторами ранее. Данная обобщающая наши результаты работа не ставит задачи установления виновных и степени их вины. Потому для данных исследований более интересен другой вопрос, – по каким критериям регуляторы определили, что запас используется недостаточно и уровень изъятия следует увеличить? Сам коллапс запасов трески в сравнении с другими случаями сейчас не представляется нам экстраординарным явлением.

Промысел трески в международных водах между Гренландией и Лабрадором вели несколько стран, потому обвинять в крахе только власти провинций Канады неправильно. Экология нерестовых миграций и взаимоотношения локальных субпопуляционных групп трески Севера Атлантики не были хорошо изучены в период интенсивного вылова.

В водах Новой Англии коллапса трески удавалось избегать. Регулирующим органом по эксплуатации биоресурсов в США является Национальное управление океанических и атмосферных исследований (НООА), все члены этой организации приведены к присяге Сенатом США. Отдельно существует Национальная служба морских рыб (NMFS) как подразделение НОАА.

Некоторые страны ведут жесткую политику в отношении биоресурсов, при том, что формально эти морские виды мигрируют в международных

водах. Показательны «тресковые войны», что упорно вела Исландия и одержала в дипломатическом конфликте победу над Великобританией. В результате Исландии в 1976 г. удалось установить вокруг острова 200-мильную исключительную экономическую зону. Великобритания понесла значительные убытки, отрасль лишилась рабочих мест. Время показало, что упорство Исландии было правильным решением, чем варианты достижения компромисса на основе международного договорного квотирования. Промысел трески в водах Исландии теперь стабилен и успешно регулируется национальными ведомствами страны.

Интересное наблюдение высказано в работе [240] «занимавшиеся оценкой запасов трески ученые, следившие за промысловой статистикой, игнорировали мелких промысловиков и полагались только на данные траулеров, которые, однако, не отражали сокращения запасов трески, потому что траулеры могли следовать за треской дальше, чем мелкие промысловики». Если снижается плотность запаса, то первое, что вынужден сделать промысел – увеличить так называемое промысловое усилие, отражаемое в часах тралления. В таком случае при оценке запасов нужно было учесть расход горючего на вылов тонны рыбы. Тогда стало бы понятно, что видимая стабильность уловов иллюзорна, так как затрачиваемые промыслом усилия на вылов квоты существенно увеличились.

Данное наблюдение о роли средств промысла в искажении оценки состояния запасов логически приводит нас к вопросу, как развивалась бы ситуация, если запас топлива у мощных траулеров (соответственно и площадь обловленной ими акватории) был заведомо ограничен? Скорее всего, при лимите запаса топлива выходить на промысел уже истощенных биоресурсов стало бы многим бизнесменам экономически невыгодно до точки коллапса.

Череда коллапсов и практика систематических переловов показывает, что только средствами математического моделирования проблема поддержания долговременного экономически оправданного уровня изъятия не решается.

Согласно проведенному в данном разделе сравнительному анализу реальных ситуаций возникновения кризисов при регулируемой эксплуатации биоресурсов и деградации ценных популяций, существуют фундаментальные аспекты не предсказуемой экодинамики для использовавшихся ЛПР методов. Одной из основных причин являются пороговые состояния в развитии процессов.

К проблемным последствиям мы отнесем выявленное нами существование режимов состояния биоресурсов, которые похожи на стабильные при оптимальном изъятии, но в реальности не являются стабильными. Эти эфемерные стабильные состояния временно существуют в окрестности неустойчивых равновесий или наблюдаются по причине аperiodической флуктуационной динамики небольшой амплитуды. Сложную флуктуационную динамику в некоторых случаях эксперты и ЛПР усредняя данные трактуют как устойчивый естественный популяционный цикл, но это временный режим.

4.4.6. Псевдостабилизация популяции и квазиоптимальный уровень изъятия в оценках состояния биоресурсов

В данной работе предложено использовать для описанных ситуаций ошибочных суждений и неверных трактовок происходящих изменений при оценке состояния биоресурсов подходящие для ситуации термины: псевдостабилизация популяции и квазиоптимальный уровень изъятия из запаса.

Предлагаемые термины отражают восприятие информации и оценку ситуации со стороны ЛПР, которая приводит к кризисам. Псевдостабилизация характеризуется относительным постоянством получаемых уловов, которое можно достичь, увеличив интенсивность промысла. Квазиоптимальный уровень изъятия после его установления приводит периоду высоких по сравнению со среднемноголетними результатами уловов, но заканчивается промежуточным обратимым кризисом с резким сокращением уловов после того, как численность популяции оказывается в уже в неоптимальном для воспроизводства состоянии, но еще не переходит через критический порог. При уменьшении ниже порогового состояния реализуется сценарий коллапса с длительной деградацией.

Таким образом, можно сделать на основе обзора многих ситуаций вывод – развитие сценария коллапса базируется в рассматриваемой ситуации на принятии двух решений:

1. Увеличение изъятия при оценке биоресурсов как используемого недостаточно эффективно и завышения реального репродуктивного потенциала.
2. Возращение уровня изъятия к прежнему после признаков ситуативного кризиса, падения объема уловов после максимума и снижения среднего возраста.

Следствие этих решений – данное воздействие популяция в новом состоянии уже не способна долго выдерживать, далее развивается системная деградация.

Популяции трески вокруг Ньюфаундленда и Лабрадора эксплуатировались более 300 лет. Данные об уловах есть с 1850 г., когда промысел был не регулируемым на научной основе. При этом нельзя считать, что промысел в те годы не был лимитированным. Изъятие биоресурсов лимитировалось техническими возможностями и применявшимися технологиями промыслового рыболовства. Технические возможности промысловиков резко выросли в 1960-е годы и было введено квотирование на научной основе, но как оказалось, такое лимитирование изъятия не предохраняет от деградации биоресурсов.

Перспективная схема регулирования эксплуатации биоресурсов может выглядеть как циклическое решение уравнений в модели Лотки–Вольтерра. Теоретически истощение биоресурсов и уменьшающаяся плотность популяции увеличивает себестоимость добычи. Тогда промысловое давление ослабляется из-за нерентабельности промысла. Снижение ниже порога рентабельности произойдет не у всех предприятий, так что отрасль продолжит существовать в конкурентном режиме. При расчете на гибкие рыночные механизмы регуляции важное влияние на мотивацию оказывает стоимость единицы улова на рынке. Редкий деликатесный вид может сохранить интерес промысла.

Увеличение себестоимости тонны улова можно организовать дополнительными административными мерами ограничений на технологию ведения промысла, не связанными с квотированием улова. Один из вариантов – ограничить технологические нововведения в области природопользования для его сохранения в долгой перспективе. Эффективность современных орудий лова и так оказывается опасно велика.

После анализа ряда примеров кризисов, применявшихся современных методов оценки запасов и допустимого изъятия, нет уверенности в том, что сложные алгоритмы регулирования на основе математических моделей окажутся эффективными и исключат развитие сценариев коллапса биоресурсов. Фактор коммерческих ожиданий и мотивации ЛПП не исключен из данного процесса.

На основе изложенного анализа реальных сценариев в дальнейших разделах рационально перейти от традиционного вычисления траектории системы уравнений к исследованию возможного развития параметрически заданных ситуаций при включении некоторой логики регуляции воздействия. Таким способом мы, зная ход развития экологической ситуации, сможем даже восстановить последовательность принимаемых решений при регуляции воздействия исходя из принципа аналогии, и оценки сходств и различий.

4.4.7. Предложения о принципах регуляции экономического использования популяций на основе анализа коллапсов

Описанные ситуации развития коллапса ставят под сомнение целесообразность регулирования промысла с помощью квот. Практика показала, такая регуляция не защищает биоресурсы от истощения. Перед рыбопромышленной отраслью должна быть поставлена задача поиска и обоснования *альтернативных методов регуляции* изъятия водных биоресурсов.

Основной принцип – гибкая регуляция возможностей промысла. Можно устанавливать квоту не на тоннаж улова, а ограничения на площадь облова. Обловленную траулером акваторию нельзя было контролировать в 1980-х гг., но с развитием средств спутниковой навигации и GPS сейчас это решаемая проблема.

Основная цель такой регуляции – сделать так, что при снижении плотности популяции промысел стал бы экономически нерентабельным в данном районе. Тогда у промысловых организаций не будет мотивов для хищнического лова.

4.5. АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИОННОГО СЦЕНАРИЯ КОЛЛАПСА НА ПРИМЕРЕ ДЕГРАДАЦИИ ПОПУЛЯЦИИ КРАБА КАДЬЯКСКОГО АРХИПЕЛАГА

Анализ одного частного варианта развития кризисного явления и даже значительного по своим последствиям еще недостаточно для утверждения о систематическом характере развития коллапса. Удалось обнаружить ре-

альные данные о других сценариях коллапса промысловых биоресурсов. Рассмотрим альтернативные ситуации кризисов в практике регулирования эксплуатации биоресурсов и определим их систематическую общность, не смотря на некоторые характерные особенности. Выделим и сходства, и динамические различия.

Понимание взаимосвязей между наблюдавшимися событиями и представление о разнообразии и о вариантах развития ведущего к коллапсу процесса позволит составлять вычислительные сценарии с ведением алгоритмов регуляции воздействия. Вычислительный сценарий, помимо исходно заданных состояний и параметров, составит последовательность решений, имитируемых изменением воздействия в промежутках между кадрами модельного времени.

Обсуждение правильности и своевременности решений по квотированию при эксплуатации водных биоресурсов должно строиться вокруг комплексной оценки тренда изменяющейся обстановки, включая климатические факторы.

4.5.1. Влияние популяционной цикличности на определение регулируемого воздействия

Появление выраженных колебаний (даже без строгой периодичности) после максимизации уловов говорит нам о качественно иной динамике развития ситуации, чем при случае относительной стабилизации. Значит функциональные связи имеют другие отражающиеся на динамике свойства. Задача возвращает нас к проблеме популяционной цикличности. Цикл может стать альтернативным устойчивым режимом существования биосистемы, наряду с равновесием, но в другом диапазоне значений численности составляющих ее популяций (в терминологии динамических систем – в отдельной области притяжения). Интерпретируя следствия из теорем Фейгенбаума и А.Н. Шарковского колебания в переделе роста периода цикла переходят в аperiodические флуктуации.

Проблема регулирования уровня эксплуатации в ситуации в том, что определяющие уровень промыслового изъятия (ежегодные или месячные квоты вылова) эксперты не всегда готовы к сменам естественных трендов. В данном случае особенность выбора решения ЛПР в том, что если эксперты отчетливо отметили увеличение воспроизводства и многочисленность поколений, наблюдая стадию процесса на восходящей ветви популяционного цикла, то склонны экстраполировать увиденную позитивную тенденцию роста запаса в прогнозах на последующие сезоны. Специалисты эмпирическим путем постфактум могут выявить циклическую динамику только по длительным рядам данных. В ситуации возникновения циклического (флуктуационного) режима изменений появляется дополнительная сложность, так как основная проблема при выборе регуляции тут в оценках состояния и прогнозе динамики регулируемого объекта. Начавшуюся деградацию перед коллапсом регуляторы могут принять за очередной естественный минимум состояния биоресурсов.

Соответственно, разумно при данных оценках ЛПП несколько уменьшить изъятие и прогнозировать в сценарии ожидаемое естественное восстановление популяций при выходе из минимума популяционных осцилляций. Экспертам легче проецировать вновь развивающуюся ситуацию на свой предыдущий опыт (это можно сравнить с анализом анамнеза, когда текущие вновь возникшие проблемы медик ищет в предшествующих заболеваниях). Данные решения при регуляции можно формализовать, как и другие варианты выбора действия на основе операторов ветвления языка программирования (в инструментальной среде AnyLogic используется стандартный синтаксис Java), включающих проверку выполнения условий появления колебательных режимов.

Установив признаки отличия кризисных ситуаций, можно отразить логику регуляции (которая соответственно будет несколько отличаться для видимой стабилизации и для колебаний) при оценке ситуации со стороны ЛПП при использовании известных методов анализа промысловой статистики в представлении модели на основе разработанной нами гибридной структуры с предикативно изменяемым воздействием.

4.5.2. Качественные отличия сценариев динамики коллапсов биоресурсов влияющие на выбор стратегии регуляции

Выделяя ряд качественных различий у сценариев деградации промысловых популяций, мы подразумеваем разницу с точки зрения теории функциональных итераций – генерирующих в этих случаях различные режимы поведения траекторий. Соответственно, такие итерации будут иметь топологически отличные инвариантные множества траектории. В данном случае ситуация предполагает обсуждать расположение непритягивающих подмножеств в фазовом пространстве функциональных итераций. Неустойчивые многообразия интересны для динамических систем, моделирующих существования популяций в переходных режимах изменений, далеких от эволюционного оптимума.

При усреднении ряда величин сезонных уловов и оперировании средне-многолетними величинами пополнения при анализе данных промысловых отчетов можно не обнаружить качественную разницу между рассматриваемыми ситуациями стадий кризиса по сглаженной статистике. Однако такие различия важны при принятии экспертных решений по продолжению эксплуатации, оценке состояния запасов, и своевременного выявления признаков надвигающейся деградации. Существенное омоложение популяции, согласно разработанной модели, может быть одним из таких промежуточных признаков.

Рассмотрим другой динамический тип деградации в форме стремительного коллапса на основе наиболее интересных сведений о ценных биоресурсах. Несколько отличных по динамике ситуаций вынужденной остановки промысла биоресурсов случались ранее, но эти кризиса события привлекли только локальное внимание, так как считались случайными и несистемными эпизодами. Потому анализируем интересный с точки зрения моделиро-

вания и нелинейных эффектов, но не столь известный специалистам пример динамики деградации экономически ценных запасов «нерыбного» объекта промысла.

Таксономическая близость биологических видов не определяет сходство или отличие действующих механизмов биокибернетики, определяющих их приспособленность к новым условиям. На рис. 3.19 представлен график данных промысловой статистики, полученной при эксплуатации запасов камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в Тихом океане (по-английски этот деликатесный крупный хищник называется «red king crab») с итоговым коллапсом и остановкой промысла к 1985 г. [241]. Промысел интенсивно велся в регионе Алеутского полуострова штата Аляски: акватории пролива Шелихова и в богатых рыбой водах соседних с полуостровом островов Кадьякского архипелага. У краба и у трески есть общие особенности. Краб (как и треска) доминирующий хищник в своем бентосном сообществе, и (как и треска) образует вдоль океанского побережья несколько локальных популяций. Тем интереснее на этом графике увидеть очевидные качественные различия сценариев деградации запасов из-за чрезмерного, но регулируемого квотами изъятия канадской атлантической трески и камчатского краба алеутской популяции.

По приведенным данным мы видим чрезвычайно выраженный максимум уловов после увеличения разрешенной доли изъятия, – типичный характерный признак чрезмерной эксплуатации «перелова», после которого запасы резко снижаются. Однако при очевидном сокращении численности нерестового запаса и последующих неминуемых проблемах с воспроизводством, промысел краба на следующий сезон не останавливается (причины решения ЛПР нам не понятны).

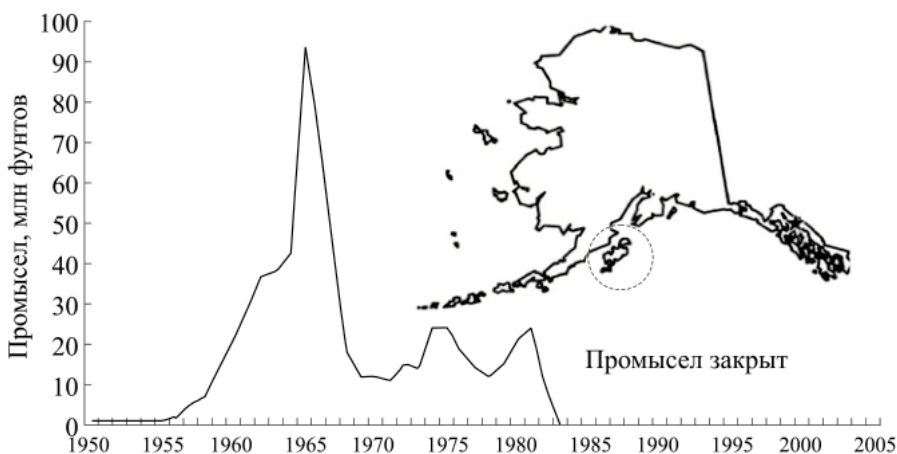


Рис. 3.19. Пример флуктуационного сценария коллапса: динамика промысла краба *Paralithodes camtschaticus* у берегов Алеутского полуострова Аляски и островов Кадьякского архипелага с кризисом в 1984 г. [241]

Отметим отличительные особенности ситуации. Многочисленная в Тихом океане популяция краба деградировала за 35 лет эксплуатации при ведении регулируемого квотами и селективного по размерам особей промысла и не восстановилась несмотря на предпринимаемые меры. Пиковый объем вылова краба был достигнут в 1966 г. В итоге процесс от пика вылова до точки коллапса и моратория на промысел занял 20 лет 1965–85-е г. В алеутском сценарии деградации до момента коллапса прошло больше времени активного промысла, чем в случае атлантической трески в водах у берегов Ньюфаундленда и Лабрадора. Перед коллапсом уловы краба прошли локальный минимум и пять лет стабильно увеличивались до локального максимума. Экспертами популяция считалась благополучной, не было видимых статистикам причин корректировать изъятие. На графике (показана динамика массы уловов фунтов краба кадьякской популяции) видны два резких падения, связанные со снижением величины запаса S . В это время квота не осваивалась промыслом. Первое падение уловов в 3.8 раза случилось в 1968 г. Аналогичный пик уловов с резким промежуточным падением отмечался и для сига Онтарио, и для канадской трески. Между кризисами прошло 17 лет ведения промысла со значительными 50% колебаниями величины уловов краба. Очевидны явные «флуктуационные» отличия этой ситуации – возникновение режима колебаний. Значит, вместо точки равновесия необходимо использование в модели более сложной структуры в фазовом портрете итераций.

Следовательно, можно сделать вывод, для всех случаев коллапса характерно прохождение двух кризисов, но с разными переходными режимами между ними.

Восстановление запасов краба оказалось сложнее, чем у трески, пока нет данных о появлении позитивной динамики в этом промысловом районе. Мешает восстановлению гибель крабов в потерянных ранее орудиях лова рыб. Длина жизненного цикла камчатского краба и трески Северо-запада Атлантики и их роль доминирующего хищника в сообществе сравнимы. Пищевое поведение двух сравниваемых видов отличается выраженным каннибализмом.

Изъятие не было бесконтрольным и отчетность промысловиков фиксировалась. Промысел регулируется для деликатесных донных ракообразных даже в большей мере строго, чем для массовых промысловых видов рыб как сиг, треска или анчоус, где погрешность может быть в тысячи центнеров. Однако успешно планировать будущие уловы можно при стабильной доле промыслового возврата от исходных объемов икры. Только если связь нерестового запаса и пополнения $R=f(S)$ удачно аппроксимируется дробно-линейной зависимостью задача выглядит предсказуемой корреляционными методами. Для волжских осетровых рыб поправки вносят параметры половодья на нерестилищах, рассчитываемые корреляционным методом по длительным рядам данных мониторинга. Долгосрочное управление эксплуатацией биоресурсов становится сложной проблемой, в случае если эффективность воспроизводства у управляемой популяции подчиняется асимптотической зависимости, имеющей экстремумы, что обусловлено конкуренцией за ресурсы и каннибализмом.

С точки зрения системного анализа процессов регулирования (по некоторым аспектам принятия решений данная проблема отличается от классических задач поиска оптимального управления) биоресурсами случай коллапса краба сложнее математически по количеству возникающих нелинейных эффектов. После сокращения численности из-за чрезмерного изъятия 1965–67-е гг. очевидна резкая потеря равновесия, но сразу возникает колебательный режим у численности запаса. Между первым и окончательным кризисом промысла динамика флуктуационная. Сценарий локальной деградации популяции камчатского краба отличается от динамики трескового кризиса именно происходящим осциллирующим переходом, который вносит обманчивые ожидания для экспертов, ориентирующихся на многолетние данные уловов и биостатистический метод оценки запаса.

Если сравнить между собой ситуации известных коллапсов, то с точки зрения нелинейной динамики, видимые метаморфозы фазовых портретов имеют и очевидные сходства, но и некоторые отличия. У далеких по таксономической классификации видов гидробионтов регуляция демографических процессов может отражаться математически схожим функционалом. Именно проявление пороговых нелинейных эффектов и режимов спорадических флуктуаций в рассматриваемых сценариях делают нереальным установление некой универсальной стратегии ведения оптимального промысла. Для трески наблюдался длительный интервал времени, который мы назвали «псевдостабильзация численности нерестового запаса», оказавшегося в неустойчивом равновесии при существовании возмущающих факторов.

Из-за режима колебаний предсказать надвигающийся коллапс и тем более понять его причины статистикам оказалось сложно. Атлантическая треска *Gadus morhua* и донное ракообразное краб *Paralithodes camtschaticus* это долгоживущие крупные хищники. Популяции до истощения имели резерв репродуктивного потенциала, как считали ранее, такие популяции не должны незамедлительно коллапсировать как сардина или анчоус, но как мы видим – основной популяционный кризис случился задолго до окончательного краха промысла.

4.5.3. О необходимых и достаточных факторах для развития ситуаций коллапса биоресурсов

Теперь можно выделить необходимые и достаточные факторы для развития популяционного коллапса. Все три рассмотренных нами в моделях реальных сценария деградации в форме коллапса имеют свои динамические особенности и сходства выбора регулирующих решений. Безусловная общность ситуаций заключается в стремительности финальной стадии внезапного для ЛПР исчерпания «коллапсирования» биоресурсов, но к таким катастрофическим последствием вел различный длительный путь.

Ситуации коллапса возникли в условиях неопределенности и существования пороговых эффектов. Такие явления нетривиальные задачи для принимающих решения об уровне эксплуатации специалистов. Пороговое значение биомассы запаса трески не могло быть предсказа-

но экспертами, это предсказание можно было сделать на основании исследования аналогий. В большинстве случаев коллапса можно избежать и для этого просто достаточно ответственным регуляторам получить представление и типичных подобных явлениях – прежде всего проблему нужно перестать игнорировать и понять, что популяционные изменения действительно могут происходить стремительно и у ЛПР нет в запасе времени для откладывания решений. Факт, что промысел не может освоить выделенную квоту, говорит о необходимости срочного пересмотра применяемых ЛПР методов оценки состояния биоресурсов, что не было сделано вовремя в Канаде. Ситуацию можно сравнить с критериями необходимости срочного хирургического вмешательства, когда врач должен убедить пациента, и если пациент не испытывает острую боль, то задача врача осложняется.

В этом отношении продолжавшееся упорно и долго истощение запасов осетровых рыб Каспийского моря выглядит тривиальным примером преднамеренного доведения до уничтожения популяций, так как о неминуемой деградации этих популяций писали очень много известных ученых.

В данной главе рассмотрены особенности с точки зрения нелинейной динамики ряда специально выбранных нами реальных ситуаций коллапса биоресурсов, имеющих характерные признаки. В результате анализа выделены общие систематически проявляющиеся аспекты таких явлений, и важнейшее состоит в реализации предварительного кризиса промысла, который отделен по времени от финальной стадии деградации. Понимание хода развития реальных событий позволяет нам перейти к моделированию вариантов развития ситуаций при регулировании уровня изъятия из популяции с применением разработанных нами предикативно-переопределяемых гибридных вычислительных структур.

Результаты анализа модельных сценариев могут быть использованы для совершенствования нормативной правовой основы регуляции и принятия решений в области коммерческого использования биоресурсов, так как в последнее годы понимание необходимости формализации и стандартизации процедур принятия решений выражается уже в работе над документацией ГОСТ.

4.6. ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ БИОРЕСУРСОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ДЛЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ

Необходимо отметить различие нормативной базы, на которой основывались при принятии решений в рассматриваемых ситуациях. Принципы регулирования эксплуатации биоресурсов в разных странах различаются существенно и унифицировать нормативную базу определения уровня изъятия не представляется возможным, хотя работы в этом направлении для трансграничных биоресурсов ведутся давно международными организациями.

Эксплуатация трансграничных популяций регулируется международными соглашениями. В Российской Федерации согласно базовому документу: Федеральный закон Российской Федерации от 20 декабря 2004 г. № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» утверждение общего допустимого улова водных биологических ресурсов проводится приказами Министерства сельского хозяйства на основе материалов заключений *экспертных комиссий государственной экологической экспертизы*. Экспертные комиссии обосновывают общий допустимый улов водных биоресурсов «во внутренних морских водах Российской Федерации, в территориальном море Российской Федерации, на континентальном шельфе Российской Федерации, в исключительной экономической зоне Российской Федерации и Каспийском море». Перечень промысловых видов водных биоресурсов и допустимый улов (но не планируемый процент изъятия из запаса) указывается в приложении, эти данные публикуются в таблице отдельно для каждой промысловой зоны.

4.6.1. Нормативные основы работы экспертных комиссий РФ по биоресурсам

Деятельность экспертных комиссий основана на нормативном документе: Федеральный закон от 23.11.1995 № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе». Ведущая роль в работе экспертных комиссий для определения ОДУ (общий допустимый улов) по водным биоресурсам в России принадлежит специалистам бассейновых филиалов отраслевой научной организации Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО). Проблемы, связанные с таким способом принятия решений, известны и понятны всем участникам, но лучшей процедуры выработки решений найти не смогли. Автору не известны описанные примеры использования формальных методов обработки экспертных знаний (опросы, рейтинговые анкеты) в подобных целях.

Законодательством РФ предполагается, что к работе комиссий будут привлекаться наиболее авторитетные специалисты по данному виду биоресурсов, как долгие годы работал профессор Ю.С. Решетников по сиговым видам рыб, которому автор благодарен за консультацию о структуре и принципах функционирования регулирующих эксплуатацию биоресурсов органов. Опытные ЛПР, осуществляющие экспертизу имеющейся информации о биоресурсах, действительно могут во многих ситуациях предотвратить перелов, указав на его явные признаки. Почему решение не принято в некоторых случаях и промысел не был приостановлен – отдельный вопрос и не только научный.

Проблема поддержания рационального уровня эксплуатации на основе работы экспертных комиссий по квотам по опыту автора состоит не в наличии необходимых экспертов, их квалификации и оплате их труда, но в том, что в итоге заинтересованные организации будут стараться привлечь лояльных, а не принципиальных людей. Излишне активно высказывающих своё сомнение в обоснованности повышения квот специалистов просто

в итоге перестают приглашать на заседания в административные органы. Эксперт по своему опыту может отменить несоответствие в представленных данных о биоресурсах и выявить признаки надвигающегося ухудшения состояния популяции, как например, сокращение среднего возраста заходящих на нерест самок.

Открытого доступа к исходным данным, используемым при оценках допустимых уловов экспертами филиалов ВНИРО в настоящее время у нас нет. При анализе ситуаций кризисов рыболовства мы ориентируемся на ситуации в других странах, где отчеты регулирующих организаций и результаты мониторинга за состоянием биоресурсов публикуются на сайтах в сети Интернет в открытом доступе. Со сведениями об оценках состояния популяций осетровых рыб и методах расчетов квот их вылова автор ознакомился во время работы программистом в ВЦ при Каспийском НИИ рыбного хозяйства и учебы в АГТУ.

Алгоритм непосредственной выработки решений экспертными комиссиями и методология не регулируется законодательной базой на федеральном уровне. На практике эксперт может предложить для обоснования увеличения квоты вылова некоторые благоприятные для популяции факторы или наоборот отметить негативные и рекомендовать не увеличивать объем вылова. Проблема в том, что у одного фактора есть и благоприятные, и неблагоприятные составляющие. Например, увеличение сброса воды увеличивает площадь доступных нерестилищ на Нижней Волге, но увеличение скорости течения негативно влияет на выживаемость молоди, которая уносится слишком быстро.

Во многих случаях не используется селективное и детальное разделение квот на разные субпопуляционные группы и даже не разделялась квота на добычу морфологически близких видов, как, например, русский и персидский осетр в то время, когда в Каспийском бассейне еще велся активный промысел осетровых рыб. Игнорирование эволюционных аспектов в гетерогенной популяции, в частности, приводит к тому, что субпопуляционные группы, совершающие длительные миграции (озимые осетровые) испытывают более сильное воздействие промысла. В таком случае эволюционная приспособленность группы становится негативным для выживаемости фактором.

Эксплуатация трансграничных биоресурсов подчиняется международным соглашениям (по Федеральному закону № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» дано определение «Трансграничные виды рыб и других водных животных – виды рыб и других водных животных, которые воспроизводятся и проводят большую часть своего жизненного цикла в исключительной экономической зоне Российской Федерации и могут временно мигрировать за пределы такой зоны и в прилегающий к такой зоне район открытого моря».) В экспертные советы входят представители заинтересованных стран. Основными международными договорами в сфере сохранения и справедливого использования ресурсов международных вод морей и океанов является Конвенция ООН по морскому праву от 1982 г. и Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер 1992 г.

Регуляция эксплуатации ценных трансграничных популяций, которые размножаются в территориальных водах одной страны, а мигрируют и нагуливаются в других акваториях (как каспийские осетровые), – сложный раздел международного права и не раз по причинам интенсивного промысла возникали споры и межгосударственные конфликты со взаимными обвинениями в истощении ценных рыбных запасов, причина разногласий во многом заключается в отсутствии признанного всеми сторонами алгоритма регуляции.

4.6.2. Разработка и унификация в РФ стандартов принятия решений в природопользовании (ГОСТ Р 56828.34–2017)

Обсуждаемая проблема осмысленно воспринята специалистами по организации рыбного хозяйства и управлению промыслом, имеется понимание недостатков. Ведутся работы по улучшению технологии принятия решений в природопользовании [28]. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 сентября 2017 г. № 1115 введен стандарт «Методология принятия управленческих решений для сохранения водных биоресурсов и среды их обитания» ГОСТ Р 56828.34–2017 [242]. Документ сформирован на основе нормативной документации и отечественной правовой базы с учетом рекомендаций «Европейского парламента», регулирующей охрану окружающей среды, и коммерческое использование водных биологических ресурсов. Многие разделы данного стандарта (который сам по себе уже является позитивным нововведением), очевидно, требуют дальнейшего развития – разработки точных критериев и показателей эффективности проводимых мероприятий. Пункт 3.2 ГОСТ Р 56828.34–2017 сохранение водных биоресурсов расшифровывает этот аспект так: «Поддержание водных биоресурсов или их восстановление до уровней, при которых могут быть обеспечены максимальная устойчивая добыча (вылов) водных биоресурсов и их биологическое разнообразие, посредством осуществления на основе научных данных мер по изучению, охране, воспроизводству, рациональному использованию водных биоресурсов и охране среды их обитания», что не является конкретным практическим руководством или набором правил к обоснованию регулирующих решений при эксплуатации биоресурсов. В настоящее время рамочный ГОСТ нельзя использовать как алгоритм регуляции, но к чему необходимо стремиться.

Основной задачей ГОСТ Р 56828.34–2017 его авторы видели процедуру оценки наносимого вреда и мероприятия по возмещению ущерба водным биоресурсам и их среде обитания от хозяйственной деятельности. Основное внимание в документе уделено проблемам водозабора и сбросу сточных вод.

Стандарт создавался с расчетом на перспективу дальнейших работ и конкретизации, что там явно было отмечено: «В настоящий стандарт могут вноситься изменения и дополнения, что связано с новыми достижениями научно-технического прогресса и с появлением новых подходов и технологий в области сохранения водных биоресурсов». К работам по принципам

совершенствования, систематике и дополнению методов, на которых строится принятие решений и выработка стратегии природопользования, относится данная монография.

Формулировки о нормировании эксплуатации в ГОСТ Р 56828.34–2017 представлены контурные, введены в виде общих пожеланий. Требуется выработка отдельного ГОСТ по методам решений при ведении промысла и оценке состояния биоресурсов. Целесообразно разделить задачи ГОСТ по принятию решений о контроле за хозяйственной деятельностью и возмещении вреда от ограничительных мер при ведении промысла. Для стандартизованных правил регулирования непосредственной эксплуатации объектов промысла необходим специальный ГОСТ.

В подобный новый стандарт должны войти описание ситуаций коллапсов запасов, их типичных стадий развития, выделенных в настоящей работе и, главное, явные критерии по введению моратория на вылов до стадии деградации. Когда моратории вводили уже в стадии очевидной деградации по факту коллапса, то позитивный эффект от таких запоздалых решений оказывался минимален.

Отметим, что несмотря на позитивные тенденции алгоритмизации и попыток стандартизации при принятии решений у специалистов остается ограниченный арсенал методов, которые не могут выявлять особые нелинейные ситуации, например, рассмотренный эффект коллапса.

Полученные в результате проводимого в следующих разделах анализа модельных сценариев рекомендации по дополнительным регулирующим мерам, направленным на минимизацию риска коллапса и избежания долгого моратория. Выводы о поведении биосистем с пороговыми эффектами в ситуации, когда воздействие ненамного превосходит максимально допустимое, целесообразно использовать при подготовке нормативных документов по процедурам принятия решений. Особенность предложенного подхода в том, что анализ модельных сценариев на основе вычислительных структур можно перевести в термины практических рекомендаций и правил введения мораториев для совершенствования принципов предосторожной стратегии регуляции.

4.7. РОЛЬ ПРИМЕНЯВШИХСЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ БИОСИСТЕМЫ И ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ В КРИЗИСНЫХ СЛУЧАЯХ

Развитию подходов к формированию ежегодных прогнозов допустимых уловов для биоресурсов в зависимости от особенностей их жизненного цикла (коротко, средне или длинноцикловых видов рыб) посвящены многие работы отечественных специалистов В.К. Бабаяна [243], А.И. Михайлова. С.В. Шibaев обосновал необходимость развития методов СА для специфической области природопользования [244]. Д.А. Васильевым и О.А. Булатовым в [245] отмечены значимые системные ошибки в принимаемых в организации Международный Совет по исследованию моря (ИКЕС) решениях,

касающихся оценки ОДУ. По мнению авторов работы, существующая экспертная процедура имеет избыточные бюрократические уровни и со значительным *запаздыванием* реагирует на изменения в системах «запас-промысел». Аспект бюрократической задержки в принятии важных решений по регуляции воздействия тоже необходимо учитывать в модельных сценариях для реальных ситуаций.

Анализ работ в данной области показывает, что специалистам прекрасно понятны ключевые недостатки методов оценки величины запасов и снижение точности промысловых прогнозов и сложности контроля за реальным изъятием. Скрытых проблем в применении известных теоретических методов для ученых, занимающихся основами организации рационального природопользования, давно не существует. Методы продолжают совершенствоваться десятилетиями. Сложные модели трофических цепей теряют прогностические возможности по причине ненадежных методов получения исходных данных в волатильной среде – в арктических морях нереалистично предсказывать выживаемость молоди массовых видов рыб. Требуются постоянные мониторинговые исследования.

Цель раздела – показать значимость выбираемых методик оценки состояния биоресурсов при принятии решений. Получение оценки по ряду характеристик, пользуясь спортивной терминологией, составляет базовую сложность в задаче. Исходя из данной предпосылки в анализе сценариев логика должна включать не некоторое вычисляемое положение траектории, а получаемое представление наблюдателем о примерном положении, что похоже на идеи квантовой физики.

В данной монографии, помимо известных ранее проблем применения формальных методов и алгоритмов регуляции в природопользовании, нами рассмотрено влияние нелинейных пороговых эффектов в эффективности воспроизводства популяций на возникновение стремительных кризисов и показано, что примявшиеся методы регрессионного анализа данных наблюдений не могут прогнозировать опасный эффект, мешающий восстановлению запасов.

4.7.1. Критерии адекватности для принимаемых решений при регуляции природопользования

Методы, работавшие в одних биосистемах, не оправдывают себя в других условиях. В СССР существовала практика целенаправленного преобразования природы. Специально переселяли и акклиматизировали полезные виды (иногда случайно переселяя и бесполезные) с целью увеличения продуктивности экосистем, но, например, опыт Ладожского озера не удалось повторить при интродукции рыб в Севан. Наборы универсальных решений для них отсутствуют.

Ранее отмечали развитие предосторожного подхода в качестве альтернативы для стратегии оптимизации. В работах С.В. Шибаева [246] определены возникающие на практике и неразрешенные на настоящий момент проблемы при регуляции эксплуатации с точки зрения теории предосторож-

ного природопользования. По мнению Шибаяева «Опыт практической реализации показал, что безусловно правильная с теоретической точки зрения идеология предосторожного подхода оказывается не всегда адекватной для применения в специфических условиях». Аргумент подтверждает наш тезис об отсутствии некоторого «волшебного» математического решения или универсальной стратегии управления для природопользования в нарушенных биосистемах.

Ученым, экспертам и ЛПР приходится работать в условиях дефицита информации о текущем состоянии биосистемных процессов. Информация стоит дорого. Для проведения мониторинговых исследований необходимы регулярные организации дорогостоящих экспедиций, собирающих фактический материал, и не для каждого объекта эксплуатации эти работы экономически оправданы.

Специалисты по рыбному хозяйству считают [247], что ведение рационального промысла во внутренних пресноводных водоемах оказывается по организационным причинам неожиданно более сложной задачей, чем эксплуатация морских биоресурсов. Регуляция тут включает не только биомассу для каждого вида, сроки и места изъятия, и параметры орудий лова.

Регуляция в рассматриваемом в данном исследовании контексте промысловой эксплуатации биоресурсов (систематической экономической деятельности) представляет собой набор ограничений для этой экономической деятельности (потому автор избегает термина «управление»). Цель регуляции максимально длительное выгодное хозяйственное использование биоресурсов.

Без понимания причин проблем, возникающих при создании регулирующих алгоритмов и правил эксплуатации, нереально предлагать рекомендации только на основании свойств некоторого разработанного математического аппарата поведения процессов. Именно по данной причине задача рациональной регуляции эксплуатации биоресурсов относится к области СА: разработки формальных средств моделирования и методов принятия решений на основе разработанных средств, что составляет суть задачи системного анализа.

Проблема критериев адекватности вырабатываемых экспертными комиссиями решений остается актуален. Очевидный критерий для выявления случаев явного существенного превышения утвержденного объема ОДУ над реальным состоянием запасов – невозможность освоения усилиями промысла выделенных квот, что случалось достаточно часто в практике отечественного рыболовства и не только в Каспийском бассейне. Промысел просто не находит в море столько биоресурсов, сколько ему было выделено регуляторами, что отмечено канадскими специалистами и для случая коллапса трески.

Осетровых рыб Каспия предохраняла от немедленного коллапса по сценарию трески сложная внутрипопуляционная структура, когда на нерест в реки приходит относительно небольшая часть от общей численности и нерестилища используют несколько нерестовых групп. В этой повышенной адаптивности и создании обособленных репродуктивных групп есть безусловные преимущества, но и неожиданная сложность при принятии решений. Работающие над распределением квот вылова эксперты, зная вы-

сокий репродуктивный потенциал и наличие репродуктивных групп, долго могут считать, что с такими биоресурсами будет все благополучно, данные запасы обладают надежным резервом и обязательно восстановятся в случае истощения. Нами показано на основе моделей с триггерными функциями, что подобные завышенные оценки на практике приводят к избыточно оптимистичным прогнозам и рискованному выбору стратегии эксплуатации биоресурсов, так как эффективное воспроизводство это не априори присущее биологическому виду свойство, но поддерживается при необходимой плотности особей в группе.

У выработки решений при организации природопользования, куда включается собственно определение режима промысла биоресурсов, есть несколько достаточно специфических особенностей, некоторые из которых выходят за рамки настоящих исследований. Важная особенность обоснования регулирующих решений экспертами при организации эксплуатации биоресурсов (и в более общем плане это особенность работ в отечественной популяционной экологии), – практика ссылаться на мнение «непререкаемых авторитетов» прошлого, хотя их оценки были получены давно и при других условиях существования биосистем. По наблюдениям автора, в данной предметной области при обосновании собственных выводов у экспертов нормальный подход ссылаться на мнение и оценки авторитетов вековой давности. В случае осетровых рыб оценка (учета и прогнозирование) оптимального изъятия % из нерестового запаса была обоснована наиболее авторитетным ученым, и это закрепившееся мнение долго не подвергали ревизии, продолжая ссылаться на работы Ю.Ю. Марти [248], хотя экология нереста рыб кардинально изменялась из-за неестественного гидрологического режима после регулирования стока Волги.

Таким образом, развиваемый автором метод представления моделей позволит перевести *слабоформализованную проблему* – анализ коллективного принятия регулирующих решений (например, в ИКЕС 20 стран участниц) в условиях неопределенности оценки состояния контролируемых биосистем в форму интерпретации графиков сравниваемых модельных сценариев.

В отечественной практике для обоснования увеличения ОДУ эксперты могут оперировать не отразимыми математически показателями и формулировками изменения состояния как: повышение общего «благополучия популяций», соответствие гидрологической обстановки или заметное специалистам «улучшение условий нагула рыб». С подобной мотивировкой решений автор сталкивался при написании дипломной работы по созданию СИС статистического анализа данных ихтиологического мониторинга для ВЦ Каспийского НИИ Рыбного хозяйства, куда вносились записи с полевых работ.

Далеко не всеми сведениями о состоянии биоресурсов можно пользоваться при верификации моделей, особенно если нам не известно какими методами эти данные получены. Данные об общей численности осетровых рыб Каспия существуют и опубликованы в справочниках, там бросаются в глаза резкие изменения. Однако, автору известно, что с начала учетных мероприятий «тралловых съемок» с 1960-х гг. несколько раз менялась их мето-

дика (орудия лова, сетка квадратов лова), что коренным образом отражалось на полученной в итоге оценке запасов по сведениям [249] Переварюха Ю.Н. Потому не имеет смысла основывать прогнозы или делать выводы о происходивших ранее изменениях на таких методически разнородных и вторичных данных после перерасчетов.

Если бы проблему расчета рациональной эксплуатации биоресурсов можно было решить только методами вычислительного моделирования и исключить риски стремительных кризисов в форме «коллапса запасов», получая надёжные данные мониторинга, то проблема была бы уже решена при затраченных усилиях. Вычислительные мощности возросли многократно по сравнению с пионерскими работами 1970-х гг., теперь позволяют решать системы дифференциальных уравнений большой размерности. Технологии ДЗЗ и гидроакустика развиваются постоянно и давно стали доступны для коммерческого использования в задачах мониторинга морских экосистем.

Изначально идея некоторой постоянной оптимальной доли изъятия противоречит принципам экологии. Цели достижения оптимальности необоснованные и рискованные, например, в случае циклической популяции и регулярных малочисленных поколений, когда может действовать негативный эффект Олли – при численности нерестовой группы значительно ниже оптимальной. Численность оптимальной группы для воспроизводства можно установить только многолетними мониторинговыми наблюдениями, как сделано в работах П.В. Вещева и Г.И. Гутеневой для волжской севрюги. Оптимальная численность может варьироваться в зависимости от половодья.

В ситуации действия эффекта Олли необходимо пропускать больше особей для размножения, так как эффективность их воспроизводства (в количестве мигрирующей молоди на одну самку) в создавшихся условиях снизится. Однако доля (квота) вылова для промысла уже утверждена заранее, хотя, как показано в модельных сценариях, выявление снижения эффективности воспроизводства – это повод для радикального сокращения квоты вылова из нерестовой части популяции. Несмотря на проводимые более чем полвека исследования экологии нереста севрюги и имеющиеся данные о воспроизводстве, деградация популяции не была предотвращена и действие эффекта Олли не было вовремя выявлено.

Известные примеры говорят о том, что даже длительные исследования экологии воспроизводства промысловых популяций и получение учеными данных мониторинга не предотвращают риска коллапса промысловых запасов.

В реальной практике добиться выполнения всех научных рекомендаций по ведению оптимального промысла нереалистично, что тоже было понятно экспертам. При существовавших методах ведения промысла строго выдерживать и не превышать порог максимально возможной для данного запаса (оптимальной) заданной доли изъятия осетровых рыб и трески не представлялось возможным.

4.7.2. Особенности биостатистического метода прогнозирования состояния биоресурсов и оценки допустимых уловов

Рассматриваемая в работе проблема возникновения популяционных кризисов из-за систематической переоценки обилия биоресурсов и темпов и их восполнения, когда следствием ошибок становится завышения уровня изъятия и установленного *квазиоптимального* режима эксплуатации, сохранит актуальность еще долго. Проблема остра не по причине того, что было предложено недостаточно математических методов прогнозирования состояния запасов или не выполнялись требования регуляторов по методике оптимизации ведения промысла. Тематике прогнозирования уловов, моделированию динамики биоресурсов и задаче оптимизации рыбного хозяйства уделялось много внимания ученых в разных странах. Нами не ставится задача обзора работ, важнее поиск общности проблем при принятии решений для разных ситуаций.

Способам прогнозирования состояния запасов и методам достижения оптимальной эксплуатации биоресурсов посвящено множество работ. Именно по данной причине автор в настоящей работе не акцентирует основные усилия на моделировании воспроизводства с задачей оптимизации эксплуатации, так как очень сложно предложить в этом направлении что-то принципиально новое из-за большого числа работ многих ученых с разными математическими подходами к целевому функционалу. Автор в данной главе анализировал именно реальные примеры кризисов, и было показано, что итоговое неудачное завершение получилось в результате попытки оптимизации. Режим популяционной динамики «запас-промысел» оказывается в результате *псевдоустойчивым* (по введенной нами классификации) состоянием для эксплуатируемых популяций.

Многие работы по моделированию алгоритма оптимального изъятия для промысловых популяций имеют абстрактно математический характер. Необходимо отметить, что проводились и совместные исследования экосистем биологами совместно с математиками, как в интересной коллективной работе В.В. Михайлова, Ю.С. Решетникова, Е.А. Криксунова, и собранного коллектива гидробиологов по моделированию экосистемы озера Севан [250] в меняющихся гидрологических условиях из-за гидростроительства и нужд мелиорации.

Существуют и активно используются несколько традиционных формальных методов, которые применяются для прогнозирования состояния биоресурсов и оценки допустимого уровня изъятия в разных странах. Эти подходы для понимания логики регулирующих решений необходимо представлять и охарактеризовать их особенности. По данной тематике существует обширная литература, например, работа [251], так что отметим кратко основные аспекты.

Моделирующие методы расчетов применяются для прогностических оценок далеко не всегда. Законодательством в области природопользования аспекты выбора методики не регулируются. Сейчас разработано много формальных методик определения гипотетической численности запасов и подходов к оценкам допустимого уровня изъятия. Применялись на практике

оценки численности запасов рыб, полученные на основе усреднения и экстраполяции результатов контрольных траллений в выбранных квадратах акватории водоема на всю площадь акватории. В таких методах используются коэффициенты уловистости орудий лова, но это противоречиво определяемые величины. Для каспийских осетровых применялся способ, основанный на подсчете рыб, прошедших по руслу при миграции реки за определенный промежуток времени, и далее проводилась экстраполяция этих данных на все время миграции рыб [252] (способ применялся и для подсчета взрослых производителей при миграции из моря на нерест в реку и при миграции молоди обратно в море).

В федеральном законодательстве не определены математические методы и формальные подходы, которыми должны пользоваться экспертные комиссии при оценке состояния биоресурсов и определении величины допустимого изъятия.

Как справедливо отметил Е.М. Малкин в [253], разработка «формальной теории жизни рыб» основана на математическом моделировании взаимосвязей, *предположительно* отражающих результат воздействия реально существующих внутривидовых процессов. Действительно, по опыту работ автора с разными экологическими ситуациями, Математическая модель взаимосвязи выявленных популяционных изменений – это всегда разработанная и обоснованная нами на фактическом материале гипотеза, не всегда сохраняющая качественную достоверность в иных экологических реалиях.

Аспект непостоянства и нескольких возможных форм зависимостей необходимо принимать во внимание при выборе методики формализации динамики процесса.

Выбранный нами подход к построению динамической модели предполагает вариативность важнейших математических свойств у моделируемой зависимости эффективности воспроизводства, используемой в качестве оператора эволюции для дискретной части гибридной динамической системы.

Кратко отметим особенности наиболее популярной методологии построения оценок и прогнозов пополнения запасов, которые становятся важными при принятии регулирующих промысел решений.

В отечественной практике организации научно обоснованного промысла основой формального анализа состояния промысловых популяций служит развиваемый, начиная с работ Ф.И. Баранова и А.Н. Державина [254] 1920-х годов, биостатистический метод. Первые теоретические работы Ф.И. Баранова опубликованы в 1914 г. «К вопросу о перелове» и «К вопросу о динамике рыбного промысла» 1918 г. Появление работ с формальными методами было связано с резким истощением биоресурсов в начале XX века. В дальнейшем изложенные идеи стали научной основой для промысловой ихтиологии [255]. Из положений теории Баранова не был подтвержден практикой тезис «если не нарушены условия воспроизводства и пополнение стабильно, эксплуатируемая популяция всегда приходит в стабильное состояние, давая постоянную величину улова». Пополнение трески после коллапса относительно стабильно, но малочисленно

и не всегда восполняет даже естественную убыль. Каспийская белуга не восстановила былое обилие и уловы XIX в., несмотря на перерывы в промысле, связанные с военными действиями – запас подорван безвозвратно.

В работах североамериканской школы промыслового моделирования развивается метод «анализа виртуальной популяции» (VPA) с 1949 г., когда Ф. Фрай [256] предложил понятие модели «виртуальной популяции».

Данные формальные подходы оценок запаса развиваются более полувека и трудно уже называть их «современными методами» прогнозирования, но принципиально новое в этой области, удобно применимое для хозяйственной практики разработать и успешно внедрить крайне проблематично. Модификаций и имитационных комплексных реализаций метода VPA существует много, но основная проблема подобных методов расчетов состояния запаса – оценка реальных коэффициентов убыли численности поколений. Данная проблема метода решается только при сопоставлении с данными полевых наблюдений, мониторинга или систематического проведения тралловых съемок.

Подобные многолетние сведения имеются всего для нескольких популяций, как, например, для тюльки Азовского моря. Е.М. Малкин сравнил в цитированной работе [253] получаемые результаты по оценке показателей естественной убыли исходя из анализа данных, и полученные в результате применения формальных методов (VPA, Ф.И. Баранова, Бивертон-Холта) и подтвердил значительное расхождение полученных «теоретических» и «практических» результатов. Интересно, что использованный для расчета показателей убыли известный метод Силлимана, использующий зависимость между средней длиной особей в популяции и коэффициентом мгновенной смертности на основе связи линейных размеров с возрастом:

$$L = a + b(t + M)^3,$$

где M – предельный возраст показал противоречащие реальности результаты для данной азовской популяции. Результаты наблюдаемой и рассчитываемой смертности для тюльки оказались отрицательно коррелированы, величины на графике представляются в противофазе. Для тюльки связь размера и убыли показала прямой, а не обратный характер. Отметим, что популяции мелких короткоцикловых рыб априори волатильные, и потому не лучший объект для апробации результатов моделирования, и применения новых математических методов оценки. Описанная ситуация с анализом динамики промысловой популяции тюльки Азова известными методами оценки запасов еще раз подтверждает заявленный нами тезис о чрезвычайной вариабельности популяционных процессов и необходимости рассмотрения сценариев для каждой ситуации отдельно.

Выявленное на примере азовской тюльки увеличивающиеся со временем расхождение реальной/оценочной смертности поколений очевидно критически повлияет на оценку допустимого уровня изъятия. Существенно отличаются по данным астраханских исследователей [252] от результатов применения биостатистического метода оценки запаса, получаемые путем

экстраполяции на все время миграции нерестующей рыбы данных от контрольных обловов неводом в створе небольших рек, когда рыба поднимается против течения вверх.

Особенно риск получения завышенной оценки возрастает для длительно эксплуатируемого ранее многовозрастного запаса, такой запас кажется стабильнее. Автору известен пример подобного опрометчивого экспертного решения при регуляции на основе некорректных оценок для популяции севрюги. В 1986 г. в работе [257] её автор высказала оптимистичный прогноз о ближайшей перспективе «незначительного увеличения уловов волжской севрюги», фактически этот экспертный прогноз специалиста был дан за два года до начала длительной деградации популяции и хищническом неостановленном вылове. Промысел севрюги не был остановлен и позднее, когда состояние волжской популяции уже было для всех знакомых с обстановкой очевидно критическим.

Метод VPA гипотетически может дать более обширную информацию о популяции, тогда как биостатистический метод для оценки промыслового запаса (группы особей, достигших разрешенных для промысла размеров и/или возраста) считается специалистами более точным. В основе биостатистического метода положена алгоритмически простая идея отслеживания межгодовых изменений поколений, составляющих промысловый запас. Метод не требует моделирования со знанием теории динамических систем. Для данного метода необходимо составление и ведение расчетной таблицы, куда будут сведены актуальные данные об уловах анализируемых биоресурсов в количественном выражении и, что немаловажно, распределенные по возрастным категориям. При распространении так называемого ННН-вылова (незаконный, нерегулируемый, несообщаемый) эти методики потеряют адекватность. На настоящее время биостатистический метод достаточно формализован в известных работах. По нашему мнению, направление дальнейшего развития метода выглядит не очевидно, так как принципиального усовершенствования в этом направлении получить нереально. Корреляционные взаимоотношения с факторами среды тоже предлагалось учитывать. Камнем преткновения для подобных методов являются нелинейные пороговые эффекты в экодинамике, резко непропорционально снижающие рождаемость или увеличивающие смертность.

Простая и очевидная алгоритмическая методика расчетов часто оказывается не модифицируемой в дальнейшем. Тогда как показывает опыт, модельные системы дифференциальных уравнений можно развивать и обобщать. Подразумевается именно метод оценки промысловых запасов, который нельзя в полной мере считать алгоритмом популяционного моделирования, в отличие от, например, проведенной на основе рекуррентных уравнений работ по построению дискретной алгоритмической модели выростного озерного рыбобитомника в озере Мужа в Ленинградской области [258] В.В. Михайловым и А.Б. Казанским на основе данных сезонного биомониторинга – такая модель включает рост и особенности питания особей с учетом температурных поправок.

Если с математической точки зрения методы прогностической оценки промыслового запаса, впервые предложенные Ф.И. Барановым после работ

А.Н. Державина, В.К. Бабаяна и Е.М. Малкина, не выглядят перспективным для системного развития, то практическое их применение подлежит корректировке. Для применения метода промыслу необходимо предоставлять достоверную статистику улова и обязательно сведения по возрастному распределению выловленных рыб. Связь длина–возраст не всегда надежна. Для анадромных видов лососевых и других короткоцикловых это не является принципиальной сложностью. Для осетровых рыб и атлантической трески или камчатского краба представить такие данные не столь просто, «на глаз» возраст пойманных рыб не определяется и требуется лабораторное оборудование, значит, необходим еще быстрый метод определения возраста выловленных особей по спилам плавника.

Развитием современных подходов к оценкам промысловых запасов занимаются ученые из институтов ВНИРО и ГосНИРХ. Исследования автора не составляют этим разработкам научную конкуренцию, так как у исследований автора другие цели системного анализа ситуаций и используются иные оригинальные математические методы. При этом автор в ряде ситуаций считает необходимым регулярно следить за получаемыми в биологических институтах результатами моделирования, мониторинговых наблюдений и публикуемыми прогнозами по ведению промысла. Эти сведения важнейший фактический материал для анализа реальных экспертных решений и их последствий.

Отметим, что специалистам хорошо известны все недостатки применяемых ими методов оценки и прогнозирования, никакого секрета для них тут нет и эти проблемы не раз обсуждали. Как врачам известны побочные эффекты лекарств, которые они все равно нам назначают, так как лучших средств у них не имеется. Баланса между побочными эффектами и эффективностью действия удается достичь не всегда, как и нахождении компромиссной стратегии в области природопользования, где стратегия оптимизации при эксплуатации биоресурсов доказала высокую степень риска их деградации.

Флуктуационные режимы изменений популяции под воздействием рассмотрим отдельно, так как их реализация требует иных метаморфоз фазового портрета и границ областей притяжения. На основе анализа хода развития событий в модельных сценариях будем имитировать этапы развития и логику принятия решений для таких сценариев с динамической регуляцией.

Отметим, что к основным принципам регулирования эксплуатации водных биоресурсов, сформулированным в работах Ф. Баранова, Рассела, Фрая, Рикера, Бивертонна и Холта к середине XX века практически невозможно добавить принципиальное усовершенствование, как внести нечто новое в конструкцию самоката. Построение альтернативной теории на иных принципах регуляции сравнимо с разработкой неевклидовой геометрии, – где получим другие свойства знакомых фигур. В отношении перспектив интересна относительно новая и не полностью формально сформированная теория репродуктивной изменчивости.

4.7.3. Принципы регуляции на основе концепции репродуктивной изменчивости и логика предосторожного подхода к воздействию

В отечественной промысловой ихтиологии существуют теоретические подходы к оценке той доли изъятия из запаса – не из общей численности, а именно из половозрелой части (или достигшего промыслового возраста), которую способна выдержать та или иная популяция. Репродуктивный потенциал видов различен, как и естественная убыль поколений, а в данной работе показана роль нелинейного изменения репродуктивного потенциала.

Существуют методы оценки возможной доли вылова без использования математического моделирования и статистической обработки данных, представляющих состояние водных биоресурсов только приблизительно. Развивается подход на основе теории репродуктивной изменчивости. Предложенный в работах Е.М. Малкина [259] принцип регулирования промысла рыбных запасов на основе концепции репродуктивной изменчивости популяций. Согласно данному принципу регулирования годовой объем изъятия из запаса зависит от среднего возраста массового полового созревания самок – чем дольше созревание самок в среднем, тем меньше должна быть доля изъятия. У северных популяций вида созревание медленнее. Малкин ввел в анализ промысловой статистики зависимость годовой скорости роста численности популяции от скорости созревания в аналитическом виде степенного закона: $u = at^b$, где $b < 0$, t – возраст массового полового созревания самок популяции, а коэффициенты кривой зависимости оценены её автором по имеющимся эмпирическим данным: $a = 1.6$, $b = -0.14$. Согласно данной теоретической идее репродуктивный потенциал снижается по мере возрастания возраста созревания, что необходимо учитывать при построении стратегии регуляции.

Отметим, что осетровые рыбы Каспия выбиваются и такой формулировки концепции. До перекрытия миграционных путей в реках эти виды имели высокий репродуктивный потенциал при длительном созревании, используя другие свои эволюционные преимущества, как большую плодовитость самок и многократное использование речных нерестилищ разными субпопуляционными группами.

Полученные из репродуктивного подхода оценки допустимого изъятия оказываются существенно ниже ранее применявшихся при регулируемом промысле. Такие оценки невыгодны для промысла, но могут служить теоретическим ориентиром для верификации решений. Например, величина изъятия от промыслового запаса для охотской популяции тихоокеанской сельди согласно работе Г.М. Гаврилова [260] при оцененном по данным мониторинга возрасте массового полового созревания самок 5 лет составляет всего 23,4%. Для гижигинско-камчатской сельди согласно принципу Е.М. Малкина (средний возраст массового полового созревания самок этой популяции сельди уже 6 лет) определяется возможный вылов в 20,7% от биомассы промыслового запаса.

В свете вышеизложенного принципа ситуация с промыслом волжской севрюги (созревание самок от 10 лет), когда при промысле в реке реально изымалось до 80% из нерестовой части популяции представляется вопию-

щей. В 1972 г. научно обоснованным [261] считалось изымать 60% из нерестовой части популяции, что действительно позволяло долго поддерживать высокие уловы, но в длительной перспективе закономерно привело к катастрофическим последствиям истощения. Фиксация некоторой высокой доли изъятия как оптимальной оказывается в реальности рискованной стратегией эксплуатации биоресурсов.

Теория репродуктивной изменчивости полностью принципиально совместима с предложенным методом представления гибридной модели выживаемости, где длина интервалов онтогенеза данного вида до его репродуктивной стадии оказывает прямое влияние на темпы восполнение биоресурсов, как и задержка при переходе между стадиями онтогенеза.

Необходимо применение адаптивного и *ситуативно настраиваемого алгоритма* регулирования. Для понимания поведения биосистемы при изменяемом воздействии разрабатываются методы сценарного прогнозирования.

4.7.4. Отличительные особенности анализа сведений о биоресурсах в разработанном подходе сценарного анализа ситуаций

Методики оценки возможного вылова на основе физиологических характеристик и темпов созревания особей популяции не позволяют экспертам экономически оптимизировать эксплуатацию. Даже метод на основе физиологических характеристик не гарантирует безопасной для популяции эксплуатации в случае сохранения отмеченной выше проблемы – существенного завышения оценки величины промыслового запаса, тогда реальная доля изъятия окажется заведомо выше, чем планировалась согласно методу регуляции.

Отметим, что часто кризисы из-за истощения запасов возникают именно у популяций с большим репродуктивным потенциалом и способным выдерживать высокий процент изъятия – в таких случаях популяция видится стабильной и возникает мотивация у экспертных комиссий получить еще больше улов, обосновав это некоторыми сопутствующими факторами.

В методе автора реализована программная имитация принятия решений в виде продукционных правил: если выполняются заданные соотношения условия, то происходит изменение переменных, выбираемое на основе операторов ветвления *if, then, else* с операндами из числа рассчитываемых переменных гибридной модели. Подразумевается использование только определяемых в числовых значениях критериев. Часто фигурирующее при принятии решений такое понятие как «интуитивный опыт» экспертов и качественные характеристики состояний в программе контролируемого вычислительно-эксперимента реализовать непосредственно нет возможности, но можно реализовать числовую шкалу для пересчета дополнительных качественных показателей. Развиваются методы формализации неявных знаний при экспертном принятии регулирующих решений, но по причине многочисленных случаев деградации запасов и остановки промысла брать опыт экспертов как эталон при регуляции эксплуатации биоресурсов нет смысла.

При большом опыте критических ситуаций на практике квотирования изъятия эксперты многих стран продолжают пользоваться методами, хорошо понимая все их недостатки теории, и зная о накоплении погрешности в оценках.

Перспективное направление для развития формальных методов и нивелирования отмеченных в разделе фундаментальных проблем с целью минимизации рисков коллапса состоит в использовании сценариев развития ситуаций на основе классификации возникающих нелинейных режимов и своевременного выявления пороговых эффектов – качественных изменений.

4.7.5. Применимость известных методов теории принятия решений в задачах регуляции использования биоресурсов

Один из противоречивых вопросов, возникших уже входе написания данной обобщающей междисциплинарной работы – принципиальная возможность и практическая результативность применения известных методов теории оптимального выбора (или классической теории принятия решений) в задачах, актуальных при регулировании в области коммерческого природопользования.

Выработка методов принятия решений для рациональной неистощительной промышленной эксплуатации водных популяций (в данном контексте уже не используем по вышеизложенным причинам его неактуальности термин «оптимальной») частный случай для более широкой проблемной области – выработки общих алгоритмов в стратегии регулирования экономической деятельности, вторгающейся в объекты природной среды.

Проблема выбора обоснованных регулирующих решений в рассматриваемой области природопользования и биологической кибернетики чрезвычайно специфическая по сравнению с управлением в технических и даже экономических областях. Методики, работавшие успешно в одних биосистемах, перестают демонстрировать эффективность в других из-за упущенного из виду фактора, который мог показаться незначительным. Явление часто наблюдалось при искусственном выпуске особей в измененную естественную среду. Рассчитывали на выпуск молоди для восстановления популяций после промышленного истощения, но эффективность таких мероприятий оказывалась ниже планируемой, как для волжской севрюги и белуги. Не оправдывались ожидания часто при переселении биологических видов, – для искусственной интродукции коммерчески ценных объектов промысла в новую среду или для борьбы со спонтанными вредными вселенцами. Успешность интродукции видов не поддавалась прогнозам, так случайные вселенцы приживались лучше.

Обобщая исходные позиции проблемных ситуаций в принятии важных решений экспертами и в технических, и в экологических областях, можно найти общие причинно-следственные механизмы кризисов. Прежде всего превалирует за неудачными сценариями ориентация на предыдущий опыт исхода схожих ситуаций. Например, катастрофы космического корабля Columbia можно было бы избежать и провести ремонт шатла на орбите, так

как удар по крылу корабля осколком был замечен, но раньше такие случаи уже были, и инциденты не приводили к катастрофам, потому руководители НАСА решили «оставить все как есть». Похоже складывалась история с коллапсом запасов трески уже при признаках сокращения численности. Раньше тоже отмечали падения уловов, но потом популяция восстанавливалась и длительного кризиса промысла раньше не возникало, так что ситуация перед коллапсом, принимающим решения об уровне эксплуатации организациям аналогично, не казалась критической и «плохие» решения, влекущие экономические убытки, можно было отложить.

Только непосредственно участвующий в процессе подготовки решений специалист может уверенно судить о применимости и целесообразности использования некоторой формализованной методики выбора решений и оценки ситуации. Только участник принятия решений может обладать знаниями о реальной мотивации и принципах оценки значимости фактов и общей ситуации.

Эксперты практики выбирают формальные методы, которые им прежде всего хорошо известны, понятны, проверены и доступны в применении, как статистический корреляционный и регрессионный анализ данных наблюдений. Методы теории принятия решений ТПР не относятся к категории повсеместно доступных для внедрения на практике специалистам по природопользованию без специальной подготовки. Из арсенала концепций ТПР целесообразно выбрать и использовать при анализе ситуаций в экодинамике, требующих выработки регулирующих решений, актуальные ключевые идеи. Методы анализа альтернатив изложены, например, в трудах по теории рационального выбора профессоров СПб ФИЦ РАН Б.В. Соколова и С.В. Микони [262].

Особенно при применении этих идей целесообразно при анализе явно ошибочных решений при регуляции эксплуатации. Это не секрет, что ЛПР во всех странах с большим трудом способны признавать собственные ошибки, перекладывая вину на любые непредвиденные факторы или неудачное исполнение их решений. Однако, игнорирование систематических ошибок и уход от признания неверности своих действий, неточности методов оценки запасов (в том числе некорректности математических моделей), это прямой путь к повторению неудач и к возникновению новых кризисов с длительной деградацией биоресурсов. Далек не всегда ошибочные решения говорят об отсутствии нужной квалификации ЛПР или корыстной их мотивации.

Анализ ошибочных действий при регуляции промыслового изъятия, их причин и следствий с применением модельных сценариев на основе гибридных структур одна из основных тем данного исследования опыта моделирования.

Существует в ТПР классификация типов неверно принимаемых решений согласно работе Э. Наумана [263]. Для рассматриваемых проблем регуляции эксплуатации биоресурсов актуальны два типа неверных решений. К таким типам относятся «небрежное» из-за известной заранее некорректности данных, и «близорукое» из-за неучета последствий ранее принятых решений и повторения уже совершенных аналогичных ошибочных умозаключений

и выводов. Эта классификация (как и любая), по нашему мнению, не полная. Не содержит такого важного типа как плохие «неудобные» решения, принятия которых стараются отложить до последнего момента несмотря на их уже очевидную необходимость. В таких случаях люди способны обосновать любые причины затяжки решения. Непопулярное решение (ограничение квот или временный мораторий), влекущее снижение экономических показателей – это подтвержденная неудача деятельности регулирующих организаций, факт завышения их прежних оценок.

Решения, которые ведут к ожидаемому увеличению прибыльности, например по увеличению объемов вылова принимаются ЛПП гораздо быстрее, однако, если имеющиеся биоресурсы способны поддерживать такое изъятие. Как отмечалось, в Каспийском бассейне выделяемая квота часто просто не осваивалась добывающими организациями из-за отсутствия запасов.

Случай, когда необходимость решения очевидна, но его избегают. Именно данный тип откладываемого до крайней точки необходимого решения произошел в ситуации с деградацией осетровых рыб Каспия. Полностью (официальный) промысел был остановлен перед фактом критического состояния популяций с чрезвычайно вероятным в дальнейшем полным исчезновением белуги в данном ареале. По всем признакам ответственные ведомства смирились с этим фактом. В данном случае независимые ученые экологи давно прекрасно представляли развитие событий с критическим истощением ценных биоресурсов Каспия, но повлиять на процессы принятия административных решений не могли.

Методы ТПР как и получение знаний об регулируемом объекте при помощи имитационного моделирования не помогают на практике достичь долговременного не истощающего природопользования при отсутствии воли при принятии необходимых решений. Именно отлаженный механизм по проведению на практике целесообразных, хоть и невыгодных решений – базовое условие для научно обоснованной регуляции природопользования.

Мотивация ЛПП тоже нуждается в классификации, так как влияет на выбор приоритетных целей, когда возникает конфликт между задачей с поддержанием необходимой рентабельности промысла и риском развития кризисной ситуации. Отсутствие воли или непосредственная экономическая заинтересованность (коррупционированность) у регуляторов – прямой путь к развитию коллапса запасов.

Известные методы ТПР с генерацией альтернатив и сопоставлением их по набору критериев на шкале или с помощью функций полезности (например, какую культуру лучше посадить с учетом лучше посадить на полях с учетом весенней погоды) трудно применимы в задаче, когда нужно выбрать неразрушающий режим воздействия на некоторый природный объект. Основная сложность ситуации заключается в условиях неопределенности: и в исходном состоянии биосистемы и в долгосрочной реакции объекта на установленное воздействие. Не из чего формировать множество Парето в данной задаче о регуляции. Проблема в том, что установление оптимального с точки зрения экономической выгоды режима промысла ведет к высокому риску развития сценариев коллапса из-за нелинейности экодинамики и

порогового развития популяционных процессов, которые эксперты объективно не могут предвидеть.

В сложных случаях у специалистов при обсуждении решений возникают противоречивые мнения о возможности эксплуатации запасов и используются отличающиеся оценки и заключения о состоянии биоресурсов. Некоторые специалисты в обосновании указывают позитивные факторы на благополучие популяций, другие будут отмечать негативное действие других аспектов. Главенствующий показатель при промышленном прогнозировании один – оценка SSB (Spawning Stock Biomass). Изначально математическое моделирование в области промышленных расчетов ставило именно задачу прогнозирования динамики SSB. Если биомасса нерестового запаса достигает критического минимума, то эксплуатация длительно прекращается по факту в любом случае и даже без решений регуляторов. Проблема в том, что сокращение запасов часто происходит слишком стремительно для реакции и корректировки воздействия от ЛПП. При обосновании прогнозов, как показал опыт, качественные оценки «улучшилось» / «ухудшилось» состояние среды для биоресурсов спекулятивны.

При сопоставлении важности факторов динамики промысловых популяций тоже явно выделяется ключевой – успешность репродуктивного цикла при текущем состоянии SSB. Сопоставлять необходимо имеющие числовые выражения характеристики популяционного процесса, где важнейшим, согласно полученным на основе модельных сценариев, будет показатель эффективности воспроизводства популяции гидробионтов, число молодых/сеголетков на одну нерестующую самку. Очевидно, сложности в ключевом аспекте популяционного процесса – воспроизводстве и потери репродуктивной активности сразу нивелируют все другие благоприятные факторы, снижение межвидовой конкуренции, благоприятную трофическую обстановку и обилие кормовой базы.

Помимо своевременного волевого принятия «неудобных» решений в природопользовании ЛПП должны организовать механизмы контроля практического выполнения всех вводимых ими ограничений. Регулирование природопользования – это ужесточение или ослабление набора ограничений на изъятие биоресурсов. Контроль за соблюдением решений и выполнением ограничений включает недопущение ряда злонамеренных действий, таких как селективное изъятие самок в счет разрешенной квоты, так как это экономически выгодно для промысла из-за реализации на рынке более ценной икры.

Репродуктивный потенциал популяции зависит в первую очередь от средней плодовитости самок, которые у многих ценных видов гидробионтов созревают дольше самцов. У осетровых и лососевых видов рыб ценность для добычи представляют именно самки из-за икры, но контроля за изъятием самок или отдельных квот на икру в Каспийском бассейне не вводили. Экономически изъятие самок прибыльнее, но такая селективность приводит к постепенно нарастающему и не заметному для наблюдателей кризису воспроизводства, даже если формально соблюдалось ограничение по общей изъятый биомассе запаса.

При коллегиальном принятии решений об ограничительных мерах в природопользовании интересно опробовать методы группового выбора ТПР.

Все возможные представления экспертов о механизмах развития процесса достаточно сложно формализовать логическими правилами в вычислительных сценариях, необходимо выбрать основные варианты логики решений о введении или отмены ограничений. Автор пользовался опросами коллег при своей работе в Каспийском НИИ рыбного хозяйства, имевших опыт работы в обоснования промысловых прогнозов и установлению квот изъятия, и благодарен профессорам П.П. Гераскину и Ю.С. Решетникову за консультации о типичных методах оценки биоресурсов при определении допустимого уровня воздействия.

Результаты моделирования должны становиться фактором поддержки волевого принятия необходимых, но сложных и вынужденных «ухудшающих» и «неудобных» решений при различных мнениях в ответственной группе ЛПР.

4.7.6. О формализации экспертного опыта при выборе регулируемого воздействия

Помимо основной задачи своевременного решения об изменении воздействия ЛПР (и поддерживающих принятия решений экспертов) в ситуациях очевидного им ухудшения оцениваемых критериев состояния объекта эксплуатации (узкий термин – благополучия популяции) необходимо грамотно и понятно обосновать вынужденные временные ограничения или мораторий на вылов. Решения принимаются несмотря на ожидаемые убытки отрасли для предотвращения еще больших экономических потерь, экологических утрат и в будущем социальных проблем.

Цель введения подобных решений – недопущение худшего варианта необратимого развития ситуации, которым является рассмотренный нами коллапс запасов с последующим состоянием длительной деградации ценных биоресурсов. Критерии введения промысловых мораториев часто заранее не определялись и не регламентировались регуляторами, что создавало проблемы коммуникаций у экономически заинтересованных сторон, ожидающих продолжения эксплуатации. Только когда и цель и причины выбранных решений будут объяснены всем заинтересованным участникам, то можно достичь согласованных действий и избежать опасного давления на мнение регуляторов.

Одна из задач при после утверждения решений экспертами довести обоснование выбранных необходимых мер понятным способом до всех сторон, участвующих в природопользовании. Обоснование может быть получено в том числе с применением убедительных методов, соединяя средства вычислительного и имитационного моделирования и статистический анализ.

Факторы, определяющие необходимость многих решений, могут быть понятны только специалистам биологам, исходящим из накопленных знаний о развитии схожих процессов и представлении о типичном поведении биосистем, – той совокупности информации о причинно-следственных свя-

зях, которые принято назвать человеческим опытом. В случае, если сложно указать на какие-то конкретные факторы из большой их совокупности, часто при принятии решений апеллируют к интуитивному опыту, который справедливо назван нашим классиком «сын ошибок трудных». Наилучшим способом является формализация опыта в продукционных правилах набором предикатов, что часто уже успешно используется в медицине при постановке сложных диагнозов.

Результаты математического моделирования с визуализацией расчетов и с выработкой количественных критериев для классификации динамических сценариев изменений важный недооцениваемый способ обоснования нужности принятия вынужденных «неудобных» в психологическом плане решений для экономически заинтересованных в продолжении промысла сторон. Эксперты часто ищут обнадеживающие «позитивные» факторы с целью отложить принятие решения о моратории, но как показал анализ, действовать нужно ровно наоборот. Нужно выявлять достаточные признаки для введения моратория, которые выражаются прежде всего в резком в процентном отношении падении плотности популяции, отражаемой не в общих объемах уловов, а в расчете на приложенное промысловое усилие (часов траления или площади обловленной акватории).

При снижении плотности популяции промысел иногда может нарастить усилия (увеличить число траулеров и интенсивность их работы) с целью полностью освоить выделенную квоту для вылова. Это экономически не рационально в долгосрочной перспективе, а в краткосрочной повлечёт увеличение себестоимости продукции, и на это тоже нужно обращать внимание при планировании природопользования.

Можно показать, что временный мораторий, болезненно воспринимаемый как провал политики регуляции и крах добывающей отрасли, в действительности является только необходимой в современных условиях регулирующей мерой, действенной в случае, когда не удается точно выдерживать установленную разрешенную долю изъятия из запаса. Как показал анализ случаев коллапса, только мера полного временного запрета любого изъятия способна дать восстановиться биоресурсам до уровня восполнения естественной убыли, что для трески у берегов Канады было сделано с опозданием на два года, а для осетровых рыб Каспия на десятилетие. Введенный запрет существует лишь на бумаге, так как нелегальный вылов продолжался вплоть до полного уничтожения популяций.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В главе 4 проведен анализ особенностей динамики процессов по статистическим данным из открытых источников для шести примеров реальных ситуаций деградации различных ценных биоресурсов при регулируемом воздействии и квотируемой эксплуатации. Выявлены признаки сходства развития процесса для различных популяций, позволяющие утверждать о систематическом характере развития кризиса истощения биоресурсов, которое развивается при применении оптимизационной стратегии MSY –

стремлении к максимизации прибыли от эксплуатации объекта. Подтверждены известные проблемы и выявлены новые противоречия, связанные с оптимизационной стратегией природопользования при практическом применении ее принципов. Учтена роль методов прогнозирования запасов и принятия решений экспертами.

Ситуации коллапса анализировались в работе по данным наблюдений и отчетов промысловой статистики с точки зрения поиска нелинейности в популяционных процессах и выявления пороговых эффектов в эффективности воспроизводства. Показано, подобные эффекты заранее по статистике не выявляются и не учитываются использовавшимися методами прогнозирования.

В результате сравнения динамических характеристик деградаций введены понятия квазиоптимальный уровень изъятия и псевдостабильзация состояния для эксплуатируемой популяции. Явления коллапса запасов как стремительная деградация без восстановления популяций развивались из состояний, оцененных регулирующим воздействием экспертам как стабильные.

Показано на примере трески, что нелинейные пороговые эффекты в эффективности воспроизводства в основе сценариев коллапса. Нелинейные эффекты в биосистемах описываются в работе как бифуркационные изменения – качественные перестроения фазового портрета для динамических систем. Ряд динамических свойств процесса, что не могут быть заранее оценены экспертами (как возникновение аperiodического режима нелинейных колебаний состояния запаса), влекут искаженные трактовки изменений экспертами и их запоздалые решения об ужесточении мер регуляции воздействия. Эксперты склонны расценивать такие изменения как позитивные тренды для биоресурсов, ориентируясь на предыдущий опыт и под влиянием собственных ожиданий. Вынужденные и нежелательные меры остановки эксплуатации откладываются до самого критического момента явного коллапса.

Изложенное позволяет утверждать, что квотирование не является надежным средством предотвращения кризиса, что покажем далее в модельных сценариях. В результате выполненного обзора реальных процессов по данным о промысле, когда цепь событий привела к ситуации коллапса биоресурсов, стало очевидно, что математическое моделирование популяционной динамики во взаимодействии «запас/промысел» имеет практическое значение для прогнозирования только с учетом принятия решений об изменении воздействия.

Предложенная классификация вариантов сценариев коллапсов необходима нам для построения серии модельных сценариев на основе разработанной в главе 2 переопределяемой вычислительной структуры. После анализа методов оценки и принятия решений экспертными комиссиями теперь возможно дополнять гибридные модельные структуры правилами изменения внешнего воздействия. Организованные в сценарные вычислительные эксперименты прогностические модели должны учитывать логику принятия регулирующих решений для имитации развития заданной ситуации. На основе анализа развития ситуаций будут динамически корректироваться правила и критерии для обоснования принятия необходимых и важных для

сохранения биоресурсов, но часто откладываемых и экономически трудных решений, влекущих потери прибыли.

Анализируемые примеры составят далеко не полный перечень ситуаций коллапсов. Причины деградации в современных условиях могут быть различны для видов и не всегда связанными непосредственно с избыточным промыслом.

Отметим дополнительные современные и важные факторы кризисов в биосистемах: климатические изменения и быстрые инвазии агрессивных чужеродных видов в ранее изолированные биосистемы. Если промысловые прогнозы не будут учитывать ситуативные факторы климата и инвазий, то явления коллапса запасов будут происходить значительно чаще. Влияние факторов конкуренции с чужеродными популяциями и взаимной адаптации рассмотрено автором при выполнении проекта РФ № 23-21-00339 по теме «Разработка методов сценарного моделирования экстремальных инвазионных процессов в экосистемах с учетом факторов противодействия на основе динамически переопределяемых вычислительных структур». Биологические инвазии становятся важнейшим фактором неопределенности и конкуренции при развитии процессов экодинамики. Частота вторжений новых вселенцев в ближайшей перспективе будет только возрастать из-за смещения границ ареалов видов на Севере Евразии.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ КОЛЛАПСОВ БИОРЕСУРСОВ ПРИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Работа следует плану последовательного развития методов моделирования. После того, как нами описана непрерывно-событийная формализация времени из множества кортежей, предложена предикативная структура переопределяемых уравнений популяционной динамики и в главе 4 проведен анализ различных экстремальных кризисных ситуаций, для которых рассмотрены принципы регулирования воздействия, осуществим построение имитационных модельных сценариев для сравнительного анализа изменений ситуаций в биосистемных процессах с выбираемой на основе оценки состояния стратегией регуляции.

В модельных сценариях на основе гибридных вычислительных структур рассмотрим основные классифицированные в предыдущей главе наблюдавшиеся в реальности сценарии коллапса различных биоресурсов при существовавших подходах к регуляции промышленного воздействия. Цель анализа сценариев – сравнение различных стратегий регуляции и принципов принятия решений, применяемых для регулирования в контексте особенностей развития естественных популяционных процессов и внутренних регулирующих механизмов для прогнозирования вариантов развития сложившейся ситуации.

При системном анализе реальных ситуаций в главе 4 мы подтвердили предположения, что различные ситуации кризисов нельзя описать некоторой универсальной моделью динамики численности. Проблема скрыта не столько в биофизической индивидуальности исследуемых объектов регуляции, сколько в математических ограничениях – из-за различия критериев у интересных для задачи нелинейных эффектов, которые могут имитационно соответствовать наблюдаемым изменениям. В разработанной методологии организации гибридных моделей арсенал описательных средств динамики ситуаций составляет совокупность нелинейных эффектов, вызывающих качественные изменения поведения траектории, который дополняется сценарием воздействия.

5.1. СОСТАВ И НОВИЗНА МЕТОДОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА МОДЕЛЬНЫХ СЦЕНАРИЕВ

Новизна разработанной методологии сценарных моделей, помимо формата представления событийного времени и гибридной структуры уравнений в том, что мы выбираем именно необходимые для задачи нелинейные эффекты. Это требует знания и критериев их возникновения и их последовательности. Далее в инструментальной среде сформируем для них нуж-

ные критерии модельных зависимостей именно для свойств анализируемой ситуации. Таким образом сможем получать выводы, которые ранее при системном анализе ситуаций не рассматривались, – об интерпретации наблюдаемых популяционных изменений со стороны экспертов при принятии ими решений о регуляции воздействия.

Методологию организации сценариев составят следующие предложенные оригинальные методы алгоритмического представления и анализа моделей:

- 1) формат непрерывно-событийного модельного времени с двумя иерархиями событий: упорядоченной последовательности кадров и прерываний;
- 2) ситуативно выбираемые и дополняемые исходя из условий среды вспомогательные уравнения для нахождения моментов переключения правых частей – срабатывания переходов между вершинами в гибридном автомате;
- 3) внедряемые в правую часть уравнений триггерные функции ограниченного диапазона действия, зависящие от начальных условий самого уравнения в момент реинициализации очередного кадра модельного времени;
- 4) включение запаздывающей регуляции в биофизические факторы.

В главе 5 представим дополнительные особенности сценарной методологии:

- 5) алгоритм изменения воздействия на основе сравнения показателей популяционного процесса за периоды времени, как имитация решений после экспертных оценок текущего состояния регулируемых ими ресурсов;

6) сравнительный анализ сценариев с алгоритмами изменения воздействия на основе метрик сходства вычислительного решения с желаемым результатом;

- 7) на основе сопоставления вариативности развития ситуаций при регуляции проводится определение явных качественных динамических признаков скорого наступления неблагоприятных для биосистемы результатов – явлений коллапсов.

Сценарии позволяют рассматривать силу влияния различных факторов на состояние биосистемы, когда возможны стремительные пороговые явления.

5.2. ТЕХНОЛОГИЯ СЦЕНАРНОГО ПОДХОДА К МОДЕЛЬНОМУ АНАЛИЗУ КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭКОДИНАМИКЕ И ЕЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Вычислительный анализ моделей проводим в рамках принципов сценарного моделирования, которые рассматриваются как современный метод организации вычислений при компьютерной имитации природных процессов для разных изменяющихся условий. Моделирование сценариев как особый научный метод естественно возникает в тех междисциплинарных областях исследований, где высока неопределенность и присутствует вариативность при прогнозировании группы связанных между собой процессов, как в климатологии. Актуально сценарное моделирование при

прогнозировании демографического будущего регионов при изменении экономических и социальных условий [264].

Качественные сценарии развития ситуации сравниваются и оцениваются экспертами по принципам их реалистичности и желательности. Единой методики оценки достоверности сценариев не выработано. Потому о худшем или лучшем варианте развития событий в случае многих критериев предполагается судить с использованием имеющегося опыта и экспертных оценок, которые могут использовать шкалу предпочтений – ранжируя полученные варианты развития. В данной работе сценарии отличаются возникающими нелинейными эффектами, потому сущностная трактовка различия ситуации будет достаточно очевидной.

Сценарные модели при анализе динамики промысловых популяций развивались, например, в работах Т. И. Булгаковой для задачи моделирования сценариев восстановления полностью истощенных запасов русского осетра в Азовском море при отсутствии естественного воспроизводства в [265].

В работе [266] сценарное моделирование (стохастическая сценарная модель) направленно на тестирование правил регулирования промысла арктической трески. Разработанные автором методы представления и анализа гибридной модели аналогично служат задачам уточнения правил регулирования, совершенствования гибкого реагирования на складывающуюся ситуацию и упреждения сценариев коллапса.

Сценарный подход для анализа регулируемой экодинамики обоснован продемонстрированным в главе 4 фактом, что некоторые ситуации кризисов уникальны, как деградация многочисленных недавно популяций осетровых рыб Каспия при попытке организации их искусственного восполнения, когда экспертные прогнозы по эффективности мероприятий по интродукции молоди оказались многократно завышены. Очевидной уже всем деградации биоресурсов Каспия можно было избежать, но препятствием стал отмеченный нами важный фактор – мотивация при выработке мер регулирования природопользования.

В главе 4 отмечено, что принимаемые ЛПР решения о регуляции отличаются в схожих ситуациях, так как и методы оценки ситуации, и принципы обеспечения экологического благополучия, и нормативны акты в разных странах отличны. Универсального метода регулирования не существует, как и единых принципов оценки ситуаций. В примерах коллапсов применяли разные способы работы с первичной информацией. О принципе оптимизации величины изъятия и цели максимизации прибыли от эксплуатации мы уже писали в главах 1 и 3 как о важнейшем мотиве развития современного кризиса истощения биоресурсов.

Методология анализа моделей предполагает применение современных численных алгоритмов для вычислительных экспериментов в инструментальной среде с поддержкой программирования логики переходов. В работе для анализа сшиваемых фазовых траекторий используются библиотеки численных методов отечественных программных продуктов AnyLogic и Rand Model Designer. Эти инструменты представляют современные реализации алгоритмов численных методов с переменным шагом интегрирования, про-

веренных на тестовых наборах и адаптированных для решения уравнений с разрывной правой частью.

5.2.1. Определение сценария развития кризисной ситуации с регулирующей воздействием

Под вычислительным сценарием развития исходной ситуации будем понимать начальные условия, значения параметров и набор предикатов в уравнениях гибридной системы, к которым в вычислительной среде алгоритмически дополняется логика изменения регулирующего воздействия, задаваемая предикатами, где аргументами служат усредненные величины объемов изъятия и пополнения за предшествующие сезоны. При квотировании изъятия обычно оцениваемую ситуацию эксперты сравнивают со среднемноголетними показателями и величины изъятия и популяционными характеристиками, если ведется систематический мониторинг (средний возраст, вес и др. показатели физиологического здоровья организма). Таким образом, в развиваемой методологии, куда входят метод построения структуры моделей популяционных процессов и способы их вычислительного исследования, мы добиваемся реалистичности при анализе сценариев коллапса.

Математические модели без учета вариативности изменения воздействия не позволяли судить об адекватности применявшихся принципов регулирования в реальной практике организации природопользования. Очень много в исследуемой проблеме кризисов зависит от логики экспертных заключений и прогностических оценок в отношении репродуктивного потенциала популяций.

В отличие от других областей исследования, проводимые сценарные вычислительные эксперименты не предполагают изменения внутренних параметров гибридной системы – коэффициентов правых частей динамически переопределяемых дифференциальных уравнений. Эти параметры считаются сложившимися в результате эволюционного развития вида в данной среде, и их изменение означает нарушение функционирования среды. Предполагается изменение логики воздействия и характеристик вспомогательных уравнений модели, описывающих некоторые ситуативные факторы жизни поколений.

Изменение воздействия – мотивированная реакция ЛПР из-за переоценки сложившейся ситуации. Мотивировка на практике дается в качественных выражениях. Согласно выводам главы 4 основанием для пересмотра служит выявление резкого негативного популяционного тренда, либо наоборот – получена улучшенная оценка прогноза из-за повышенной репродуктивной активности. В некоторых случаях реакция следует из-за воздействия аномальных условий среды на воспроизводства биоресурсов. Коррективы в квотирование промысла регулярно приходится вносить из-за явления Эль Ниньо [267], теплое течение нарушает апвеллинг у берегов Перу и репродуктивный цикл популяций.

Учтем, что в реальности квоты выделяются в величинах биомассы и при этом регулирующие организации далеко не точно представляют, какую

реальную долю изъятия из запаса составит выданная ими квота. Другая проблема – при квотировании пользуются оценками той доли изъятия из запаса, которая способна выдержать популяция, но такая оценка получена ранее и при других условиях. Один из мотивов пересмотра – цель постараться взять еще больше, если обстановка оценивается как благоприятная и данная квота легко освоена. К сожалению, в некоторых ситуациях ЛПР понимают, чем обернутся их решения в последствии, но предпочитают получить максимальную прибыль именно сейчас.

Динамика итераций зависит от свойств функций, которые используются в качестве операторов эволюции динамических систем. В данном случае для получения сложных интересующих экспертов и ЛПР свойств мы использовали вычислительные решения гибридной системы. Свойства функций, изменяющих «итерирующих» начальное состояние (асимптоты, точки равновесий, положения экстремумов), могут прогнозируемо изменяться в зависимости от сопутствующих условий и воздействия. Внешнее воздействие меняет характеристики зависимости, которая описывает эффективность воспроизводства, но в сценариях можно использовать несколько возможных исходных форм зависимости. Таким образом, установление отдельных свойств зависимости уже является важным инструментом прогнозирования возможных изменений состояния биосистем, которые могут происходить пороговым, но уже предсказуемым для нас образом.

5.2.2. Параметрическая настройка гибридной вычислительной структуры

При настройке для вычислительного анализа гибридной модели определяются: коэффициенты уравнений включая запаздывания, начальные условия для решения задач Коши, предикаты для переходов гибридного автомата, продолжительность кадра модельного времени и сценарий внешнего воздействия. В развиваемой далее модельной структуре значительно больше возможностей настройки характеристик, чем в классических непрерывных моделях, но любая параметрическая идентификация требует затрат машинного времени. Сложность вычислительной настройки и рост усилий для «черновой работы» в среде моделирования – основной недостаток предложенной методологии, так как параметры должны быть согласованы, и эта задача решается трудоёмким способом последовательного приближения. Некоторые параметры известны при настройке заранее из непосредственных биологических характеристик наблюдаемого объекта исследования по данным статистики. Такие величины, как средняя плодовитость популяции λ , длительность первой стадии онтогенеза τ , начальный вес особи w_0 известны нам из справочной литературы для каждого вида и эти параметры долго сохраняются неизменными. Некоторые параметры скорости размерного развития для рыб можно оценить из аналогичных работ.

При алгоритмической реализации сложнее всего оказалось подобрать мгновенные коэффициенты компенсационной и компенсационной для

уравнений убыли поколения на последовательных внутрикадровых интервалах времени.

Параметры сценарных моделей разделяются на постоянные и вариативные. Коэффициенты убыли уравнений остаются постоянными для всех сценариев, но параметры триггерных функций изменчивы, так как они отражают степень выраженности экологических эффектов для данной ситуации.

Продолжительность «интервала уязвимости» в раннем онтогенезе организма до созревания, отраженная как длина кадра модельного времени T в большинстве случаев для морских видов постоянная, но в специфических случаях может задаваться как табличная функция зависимости от размерного развития $T(w(t))$.

Именно по причине перекрестной параметрической настройки в работе выбран метод последовательного совершенствования и дополнения базовой структуры уравнений. Сразу полностью настроить новую гибридную многокомпонентную вычислительную структуру трудоемкая задача серии вычислений для подбора адекватных значений коэффициентов. Дополнительные компоненты и предикаты встраиваются в уже настроенную ранее исходную базовую модель – систему двух дифференциальных уравнений, которая определяла самую простую куполообразную форму зависимости с одним пересечением с биссектрисой координатного угла и ненулевой горизонтальной асимптотой, но это позволило нам скорректировать недостатки модели Рикера.

5.3. СЦЕНАРИЙ КОЛЛАПСА ЗАПАСОВ НА ОСНОВЕ ИТЕРАЦИЙ НЕУНИМОДАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ С РАВНОВЕСИЕМ-РЕПЕЛЛЕРОМ

В данном разделе рассмотрим один из часто встречающихся по данным наблюдений вариант развития ситуации с итоговой стремительной деградацией. В качестве описательных средств имитации сценария используем свойства трансформации двух нетривиальных стационарных состояний у функциональной зависимости, полученной при решении разработанной в главе 2 гибридной системы. Наиболее очевидно, что динамика траектории любой итерационной модели зависит от количества, положения точек равновесия функциональной итерации $f(x^*)=x^*$ и от их устойчивости, которую определяет значение производной функции $|f'(x^*)|<1$ в этой точке, а в модельных сценариях об устойчивости можно судить по положению $f(f(x))$. Логично рассмотреть в качестве основного сценарий кризиса на основе перестроений существующих и вновь возникающих положений равновесия. Не все стационарные точки равновесия динамических систем асимптотически устойчивы, и точечные аттракторы могут терять устойчивость и без возникновения циклов периода 2^{i+1} .

Предложенные в главе 2 методы: триггерные функции и дополняемая структура из вспомогательных уравнений обеспечат гибкую адаптацию базовой гибридной системы для учета особенностей анализируемой ситуа-

ции, что не требует перенастройки основных системных параметров для частных сценариев.

5.3.1. Модельный сценарий стремительного истощения биоресурсов при эффекте касательных бифуркаций состояний равновесия

Сценарии будем классифицировать по возникающим трансформациям фазового портрета для моделирующей эволюцию биосистемы траектории, возникновению бифуркаций аттракторов или перестроению границы областей притяжения. Перестроения топологии фазового пространства итераций используются нами для имитационного описания пороговых явлений или возникновения осцилляций различной формы. Перечень и критерии метаморфозов известны из теории бифуркаций и для функциональных итераций, и для систем дифференциальных уравнений. Многие из возникающих при дополнительном воздействии на выживаемость поколения метаморфозов поведения траектории по фундаментальным математическим критериям не совместимы друг с другом. Нужно учитывать, что в одном формате модели все возможные явления не возникнут (либо получим хаотический репеллер, либо аттрактор Фейгенбаума), есть ограниченный набор эффектов в каждом варианте.

Для описания волатильных режимов регулируемой экодинамики мы предлагаем использовать трансформации как асимптотически устойчивых инвариантных множеств (аттракторов), так и неустойчивых равновесных состояний. Оригинальность метода анализа моделей определяет сценарий, задействующий все теоретически доступные для класса функциональных итераций метаморфозы: и аттракторов, и неустойчивых инвариантных множеств.

Для анализа поведения итераций с воздействием будем использовать следующий способ представления траектории. Установив вычислительно $N(0) \rightarrow N(T) \equiv \varphi(N(0))$ как функциональную зависимость после численного решения системы уравнений убыли численности с $N(0)=\lambda S$ для биологически допустимых значений $N(0) \in \square$ теперь необходимо использовать и динамические свойства итераций $\varphi(\dots\varphi(x_0))$ этой зависимости. Численное решение с вычислением $N(T)$ используем для расчета функциональных итераций:

$$R_{n+1} = \varphi(R_n) - q_n R_n,$$

где коэффициент $q \in [0,1)$ – установленная доля промышленного изъятия. При регулируемом промысле q устанавливается экспертами на каждый сезон n . Логика изменения q в заданные предикатами моменты гибридного модельного времени, обоснованная некоторым вариантом мотивации, будет учтена в сценарном исследовании развития заданной исходной ситуации.

При анализе примера в главе 4 сделан ключевой вывод, что популяция трески Северо-Запада Атлантики очевидно обладала большим запасом стабильности – расстоянием от неустойчивого критического равновесия до

устойчивого многообразия. Это позволяло столетие выдерживать интенсивный промысел. Несмотря на это, в результате интенсификации устойчивое равновесие было нарушено. Моделировать сложное вариативное явление как разрушения или появления равновесий можно формами касательной бифуркации. При прямой касательной бифуркации появляется точка касания функциональной зависимости и биссектрисы координатного угла. Тангенс угла наклона касательной в этой появившейся точке равен единице. При прямой касательной бифуркации далее возникают две точки пересечения кривой с биссектрисой – устойчивая и неустойчивая. При обратной касательной бифуркации устойчивая и неустойчивая сливаются в одну точку, которая затем исчезает – таким образом функциональная итерация теряет две точки равновесия, одна из которых была притягивающей для траектории. Включение в модель промыслового воздействия сдвигает устойчивое равновесие функциональной зависимости влево – на встречу неустойчивому, этот эффект был показан на графике в обсуждавшейся работе Р. Петермана [176]. Прохождение локального минимума численности промысловым запасом трески до точки коллапса важный динамический аспект. Это позволяет нам представить форму зависимости, которая может порождать наблюдаемую динамику (выступить в качестве оператора эволюции для траектории с учетом промыслового изъятия) и вычислительно ее имитировать.

Рассмотрим некоторые экологически обоснованные варианты трансформаций зависимости. Наблюдатель в проводимых по разработанному методу вычислительных эксперимента оценивает внешнюю дискретную составляющую траекторию гибридной модели, отражающую состояние гибридной в точках между кадрами. Внутренние численные расчеты модели по набору переопределяемых правых частей уравнений составляют сшиваемые отрезки траектории на непрерывных интервалах времени. Части непрерывной траектории представляют собой «склеенные» убывающие кривые – различно описывающие убыль численности по стадиям. Анализ нелинейных эффектов проводим для дискретной части траектории – как функциональной итерации.

Для функциональных итераций возможны три типа бифуркаций, которые происходят в прямом или обратном направлении: пример, прямая бифуркация удвоение периода цикла, а обратная – образование «половинного» цикла $p=2^{i-1}$. На рис. 5.1 показана кривая нашей модельной куполообразной зависимости в момент обратной касательной бифуркации, в этот момент существует единственная нетривиальная полуустойчивая стационарная точка. При усилении действия смертности молодежи (сильный эффект Олли) единственная точка модельной зависимости исчезнет (это момент бифуркации), при увеличении выживаемости пополнения в оптимальном для популяции состоянии и ослаблении негативного эффекта агрегированной группы возникнут две точки (устойчивая и неустойчивая). Очевидно, популяция без нетривиального устойчивого равновесия (или цикла любого периода) существовать не может. Таким образом, «задача минимум» для любого регулятора эксплуатации очевидна – не допускать состояния, при котором биоресурсы не имеют возможности восполнения естественной убыли.

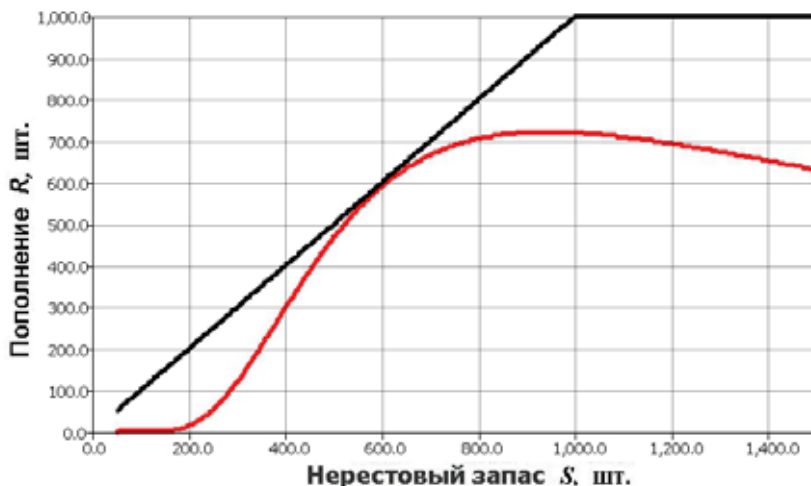


Рис. 5.1. Касательная бифуркация в разработанной модельной зависимости с исчезновением двух стационарных точек кривой воспроизводства

На приведенном рисунке после обратной касательной бифуркации у кривой воспроизводства все точки $f(R) < R$, но в других ситуациях такая бифуркация не обязательно приводит к отрицательному репродуктивному потенциалу. При такой метаморфозе траектория, отражающая динамику промыслового запаса, способна некоторое продолжительное время оставаться в окрестности единственной точки, но под действием возмущения резко покинет окрестность.

Рассмотрим вычислительный сценарий после решения ЛПР об усилении давления промысла на популяцию, воспроизводство которой описывается унимодальной кривой воспроизводства с ненулевой асимптотой. Тогда начальная численность нового поколения с учетом изъятия:

$$N_{n+1}(0) = \lambda S_n (1 - q).$$

Разработанная модель в серии вычислительных экспериментов позволяет подобрать уровень установленного нового значения доли промыслового изъятия q_{n+1} , который только на 0.005 будет превышать максимально допустимый уровень для данной кривой воспроизводства. Это такой уровень, при котором численность биоресурсов не уменьшается ниже допустимого порога – не пересекает значение критической неустойчивой точки R_1^* , но это не оптимальный уровень, при котором величина изъятия из запаса максимальна для куполообразной зависимости, имеющей один максимум. Тогда траектория, порождаемая функциональной итерацией $\psi^n(R_0; q)$ соответствует состоянию:

$$\forall n \in \square, \lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(R_0; q) = R_1^* + \varepsilon.$$

Точность квотирования, которую могут контролировать регулирующие промысел организации, не может в реальности оперировать долями процента из присутствующей всегда неопределенности в оценках измерений.

В сценарии с одним изменением q : $q_{n+1} = q_0 + \Delta q$ динамика уловов после пика будет демонстрировать плавное и монотонное снижение без локальных максимумов и минимумов, которое для статистиков не будет отличимым от стабилизации. До момента, когда состояние запаса пересечёт порог критического равновесия и последует стремительное сокращение уже истощенных ранее биоресурсов, так в этом состоянии не восполняется естественная убыль. Коллапс тут финальная точка рис. 5.2, когда выделенная квота не может быть уже освоена промыслом при всех усилиях. Процесс деградации протекал все время от момента решения об увеличении доли изъятия и мог быть выявлен экспертами по косвенным признакам, например, снижения среднего нерестового возраста.

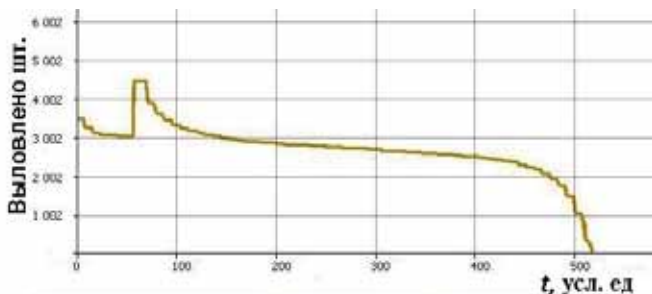


Рис. 5.2. Монотонный сценарий перехода к коллапсу при наличии критического равновесия с превышением допустимого уровня изъятия из запаса менее чем 1%

Полученный нами вычислительный сценарий, который мы определили как явление псевдостабильности, выглядит как некоторая математическая идеализация процесса длительного истощения запасов до плавного перехода критической точки. В результате сокращение запасов вдруг становится для оперирующего статистикой наблюдателя быстрым, но это только следствие ошибочных и некорректируемых решений принятых достаточно давно.

Как мы показали на реальных примерах, в экологической реальности чаще наблюдается нетривиальная и немонотонная динамика развития кризиса. Путь к коллапсу характеризуется немонотонной и волатильной составляющей с аperiodическими колебаниями уловов с уменьшающимся средним значением. В некоторый момент уловы перед коллапсом на пару сезонов могут увеличиваться.

5.3.2. Определение способствующих сценариям коллапса характеристик зависимости эффективности воспроизводства

Как изначально было установлено при экологическом обосновании метода построения гибридной структуры, получаемая в модели функциональная зависимость в эффективности воспроизводства не указывается нами

априорной характеристикой популяции. Такими характеристиками являются средний возраст полового созревания особей и средняя плодовитость самок. Зависимость «кривая воспроизводства» на графике представляет собой отражение взаимодействия данной популяции с факторами среды, включая биотическое окружение. Соответственно, такая кривая не статична. Вопрос анализа в том, каким именно образом будут отражаться переменные в формализованной форме.

Факторы среды в водных экосистемах исходно волатильные, но могут испытывать направленный тренд изменений (влияние которого было показано на примере осетровых рыб Каспия). Согласно нашему подходу к задаче анализа ситуаций, на важнейших качественных свойствах зависимости будут отражаться изменение в характере взаимодействия популяции и среды. Изменения для некоторых крупных активных хищников могут выражаться различно, например срока миграции, в спектре питания рыб или интенсивном каннибализме трески.

Приведенный график промысловой статистики для трески не показывал плавный и монотонный характер, который мог породить сдвиг устойчивого состояния к критическому равновесию с редукцией этих двух точек равновесия у унимодальной функции (с единственным максимумом). Динамика популяции по имеющимся данным соответствует поведению итераций неунимодальной зависимости с максимумом и минимумом, которая была получена в разработанной нами гибридной модели. Наибольшим образом ситуации развития деградации запасов трески соответствует форма модельной зависимости запаса и пополнения на рис. 5.3. Это полученная вычислительным методом решения уравнений на кадрах модельного времени для всех допустимых начальных условий неунимодальная кривая с горизонтальной асимптотой при двух нетривиальных стационарных точках. Однако левая ветвь кривой воспроизводства обладает очень крутым и почти вертикальным наклоном: между критической точкой-репеллером и перед первым экстремумом – максимумом.

Формализуем важные для динамики итераций математические свойства такой используемой для моделирования сценариев коллапса зависимости с двумя экстремумами в точках $R_{\max} < R_{\min}$ и двумя нетривиальными точками равновесиями $R_2^* > R_1^*$:

$$\begin{aligned} R_{\max} < R_{\min}, \varphi(R_{\max}) > \varphi(R_{\min}), \varphi(R_{\min}) > R_1^*, \\ \varphi(R_{\max}) < R_2^*, |R_{\min} - R_{\max}| < |R_2^* - R_1^*|, \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \varphi(R) > R_2^* < \infty. \end{aligned}$$

Дальнейшего увеличения численности пополнения при росте запаса не происходит из-за активного каннибализма трески, когда обильное поколение молоди становится основной добычей, что показано в работе [268]. В результате из-за дополнительного фактора смирности, который зависит от численности, возникает локальный минимум кривой воспроизводства. Эффект не уникален для трески, известны небольшие водоемы, где рыбное

сообщество представлено только окуном – популяция хищника устойчиво существует, поддерживаемая только каннибализмом за счет высокого базового репродуктивного потенциала.

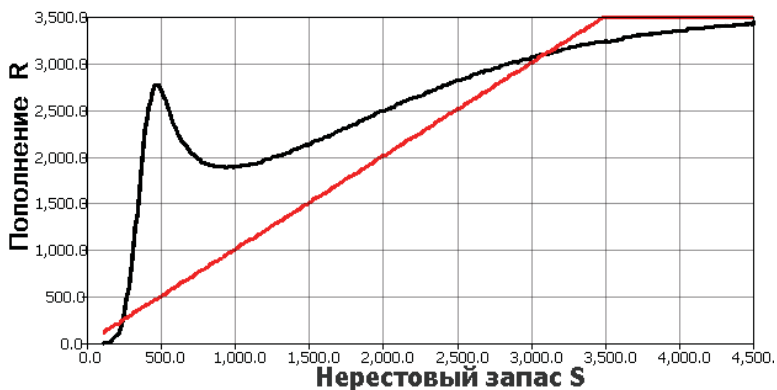


Рис. 5.3. Зависимость с двумя экстремумами для целенаправленного моделирования динамики деградации канадской трески

Промысловая популяция, обладающая представленной на графике кривой воспроизводства, где большая часть зависимости проходит значительно выше биссектрисы координатного угла на плоскости запас-пополнение, действительно способна выдерживать значительный более 50% уровень промышленного изъятия. Наиболее эффективное воспроизводство достигается именно в точке максимума, но есть важный аспект, который делает попытку оптимизации рискованной. Расстояние от кривой до биссектрисы $|f(R)-R|$ достигает максимума достаточно близко от критической точки репеллера – границы области притяжения тривиального равновесия, которая в данном случае относительно невелика. Если состояние популяции каким-либо образом «зафиксировать» в этом положении, то можно максимизировать изъятие, но необходимо помнить, что живые системы не являются полностью управляемыми в теоретическом смысле этого понятия.

Регуляторы не могут оценить эти возможности заранее и, помимо прочего, происходит отмеченное многими авторами завышение оценки реального состояния запаса. Эксперты не знают формы зависимости заранее, так как эту форму мы смогли предположить только после коллапса. В результате чрезмерно оптимистичных оценок при длительном успешном изъятии возникает сперва желание (соблазн) и потом уверенность, что можно получить от популяции еще больше улов и увеличить прибыль отрасли. Перспективными считаются инвестиции в модернизацию судов и увеличению эффективности их орудий лова: выловленной биомассы в единицу времени тралления. Капиталовложения кредитных средств требуют окупаемости, потому на самом деле существует много мотивов откладывания нужных, но неприятных решений, которые мешают своевременной остановке промысла.

5.4. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЙ С ВАРИАТИВНОЙ ЛОГИКОЙ РЕГУЛЯЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Алгоритмы принятия решений на основе сравнений можно включить в сценарную модель с имитацией различной мотивационной составляющей.

Будем использовать представленную форму функциональной модельной зависимости на основе переопределяемой модели убыли численности в имитационных вычислительных экспериментах с изъятием $N_{n+1}(0)=N_n(T)(1-q_n)$.

5.4.1. Формализованная логика экспертных оценок ситуации в сценариях

Алгоритм регулирования при анализе сценариев адекватно задачам задать в виде правил принятия решений «если выполняется условие ... то следует изменение...». Так моделируем изменения q_n в сезон n , которые определенным образом реагируют на изменение уловов не только за данный сезон $Y_n=q_n R_n$, но и в среднем за k предшествующих сезонов и на оценку состояния запасов. Ориентируются на усредненную величину за предыдущие k лет:

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=n-k}^n q_i R_i / k.$$

Зададим для имитационного алгоритма в формате набора импликаций формализованную логику регулирования промыслового изъятия таким образом:

$$\frac{\left| \sum_{i=n-k}^n q_0 R_i / k - q_0 R_n \right|}{\sum_{i=n-k}^n q_0 R_i / k} = \Delta Y_{\Sigma k} < 0.05 \Rightarrow q_{n+1} = q_0 + \Delta q, d_1 = n + 1$$

$$\frac{\sum_{i=d}^{d+k} (q_0 + \Delta q) R_i / k}{Y_{\Sigma d-k}} < Y_H \Rightarrow q_{n+1} = q_0.$$

Определим имитационный сценарий для заданной ситуации с начальными значениями:

$$q_0=0.5=const, \Delta q=0.23, R_0=R_2^*, k=10, Y_H = 2/3.$$

Реализуем алгоритм для распространенного случая, когда промысловая популяция за k предыдущих сезонов при высоком q демонстрирует стабильные в среднем уловы. Тогда имитируем решение ЛПР в сценарии согласно мотивированным правилам и увеличиваем изъятие с $n+1$ сезона так:

$$q_{n+1} = q_0 + \Delta q .$$

В следующем имитационном решении после увеличения за следующие k сезонов усреднённые уловы снижаются на треть по сравнению со средними до увеличения $Y_{\Sigma d-k}$, то восстанавливаем исходный уровень изъятия q_0 . В двух вычислительных экспериментах на рис. 5.4 показано сравнение динамики деградации запасов с унимодальной и с бимодальной кривой воспроизводства при одинаковых изменениях промыслового воздействия.

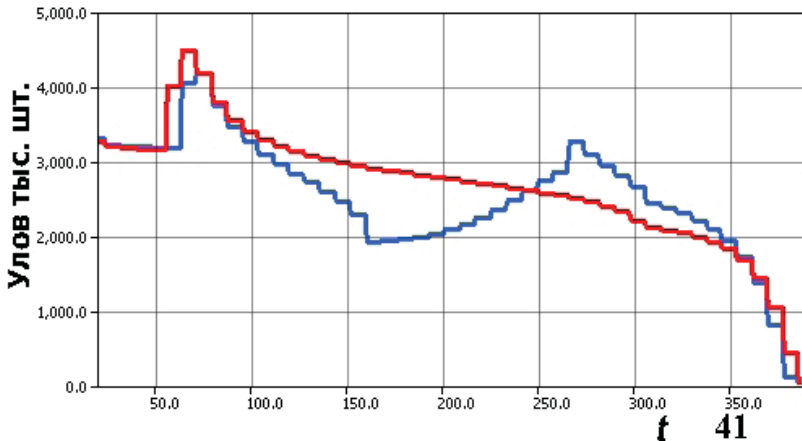


Рис. 5.4. Вычислительные сценарии динамики коллапса запасов с унимодальной и бимодальной зависимостью эффективности воспроизводства при наличии критической неустойчивой точки за 41 модельный сезон

Мы рассматривали в вычислительных сценариях случай, когда допустимое изъятие на 0.013 превосходит допустимое (которое не вызывает достижение критической численности и этот уровень мы установили в сценариях экспериментально). Динамика деградации (скорость сокращения численности запаса) зависит именно от величины превышения критической доли изъятия q . После усиления промыслового изъятия до уровня, превышающего допустимый уровень воздействия, уловы на первом этапе значительно увеличиваются. Потом уловы медленно снижаются, но различным образом. Это состояние, называемое нами «эффект псевдостабильзации» продолжается до состояния безвозвратного коллапса. Популяция не выдерживает тех объемов уловов, что удавалось получать ранее. Вычислительный эксперимент длился в перерасчете гибридного модельного времени 40 промысловых сезонов.

Оценка состояния запаса R_u может отличаться от реальности R_n , тогда важно отношение численности реального запаса к представляемому по оценкам $R_n/R_u = u_n$, соответственно реальная доля изъятия тогда может отличаться от той доли изъятия, которую изначально предполагали установить регуляторы: $q_n = u_n q_u$.

Отметим деталь, которая часто ускользает в исследованиях кризисных ситуаций. Осуществляют регуляцию не по текущему состоянию объекта. Средства мониторинга запасов в реальном времени у регулирующих организаций пока не разработаны. Специалисты обрабатывают полученные ранее данные, и на основе статистических расчетов (средний возраст, вес, длина и др.) оценивают ситуацию и принимают решение о будущем воздействии, но для объекта, который немного успел изменить свое состояние. Реакция на изменения в таких обстоятельствах всегда происходит с запаздыванием. Это похоже на наблюдение отдаленного объекта в телескоп. В алгоритмической составляющей разработанной гибридной структуры нам не составит сложности в модельных сценариях учесть временное отставание оценки состояния запаса на минимум шаг алгоритма дискретной составляющей модельного времени.

Бимодальный случай зависимости с максимумом возле точки репеллера сложнее для регулирования, так как уловы перед коллапсом могут демонстрировать некоторый рост после прохождения минимума после пика. Тренд повышения уловов может вызвать решение не только не уменьшать долю изъятия, но даже может послужить мотивацией несколько увеличить промысловое давление на запас, уже в этот момент находящийся в окрестности критического равновесия. Начавшееся затем очевидное длительное снижение может показать экспертам очередным временным явлением или проявлением естественной цикличности, что мотивирует их не вводить мораторий на промысел даже при очевидном уже сокращении уловов. Заключительная фаза коллапса в двух анализируемых сценариях динамически идентична.

5.5. СЦЕНАРИЙ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОЛЛАПСА ИСТОЩЕННЫХ БИОРЕСУРСОВ ПРИ ПРЕДОСТОРОЖНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Ранее подчеркивали, сценарное моделирование отражает вариативность развития процессов при регулируемом воздействии. Создадим следующий сравнительный имитационный эксперимент с двумя формами зависимости с целью показать, что краха промысла можно и нужно избежать.

Зададим следующую логику регулирования промыслового изъятия аналогичного увеличения исходной доли изъятия:

$$\frac{\sum_{i=d}^{d+k} (q_0 + \Delta q) R_i / k}{Y_{\Sigma d-k}} < Y_H \Rightarrow q_{n+1} = q_0 - \Delta q_2.$$

Для предотвращения перехода к необратимой стадии деградации достаточно уменьшить сезонную долю изъятия на 0.08. Сценарий, где две сравниваемые популяции удерживаются от коллапса своевременным уменьшением изъятия представлен на рис. 5.5. В таком имитационном сценарии уровень промыслового изъятия был возвращен на уровень, который предшествовал повышению промыслового давления и длительно выдерживался популяцией. Обосновано на основе имитационного сценария сделать вывод, что популяция с бимодальной зависимостью способна выдерживать больший процент изъятия, но одновременно является сложным объектом для регуляции промысла.

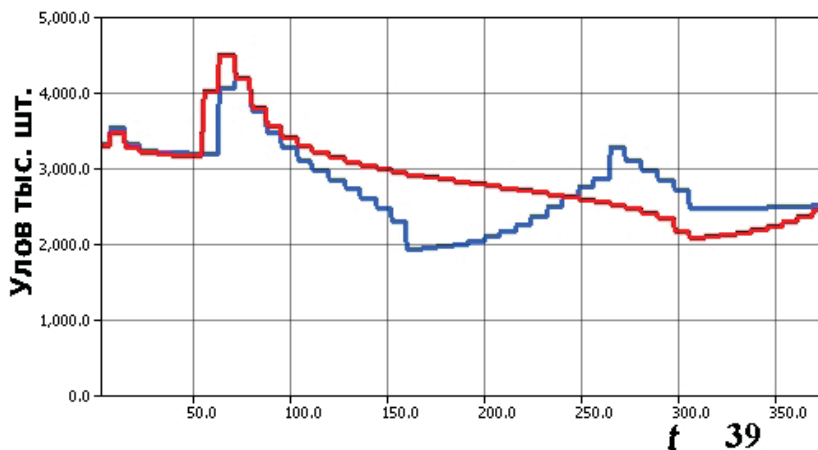


Рис. 5.5. Сравнительный вычислительный сценарий с предотвращением сценария коллапса запасов при снижении промыслового давления $\Delta\hat{q}_2 = 0.1$ после первоначального существенного увеличения доли изъятия

Чем лица принимающие решения способны задействовать больше правил регуляции на основе проверки выполнения условий, тем совершеннее будет казаться алгоритм регуляции при расширении перечня правил. Мы должны помнить, что в реальности эксперты представляющие контролирующие организации не в состоянии обеспечить точность освоения выделенной квоты до сотых долей процента, как мы можем делать в вычислительных экспериментах. Неопределенность при эксплуатации биоресурсов будет присутствовать всегда, потому нет сущностного смысла в сценарных модельных экспериментах уменьшать шаг настройки доли изъятия менее 0.01, это предельная точность.

Ориентироваться не на средний показатель уловов за предыдущий период, а на изменение уловов по сравнению с исторически максимальным значением за декаду не представляется возможным в реальности. Проблематический аспект для рационального регулирования эксплуатации такого запаса в том, что уловы перед критическим состоянием (в правой окрестности неустойчивого положения равновесия) будут увеличиваться – популяция выходит на краткий максимум эффективности воспроизводства, но это не является экологически стабильным состоя-

нием. Удерживать популяцию в данном состоянии чрезвычайно сложно, так как требует расчета допустимой квоты изъятия с точностью до долей процента. В реальности эксперты знают только общий объем уловов (при абсолютной честности промысловой статистики), но реальную долю изъятия, которую этот улов составляет, они представляют только приблизительно. Оценка общей численности промыслового запаса, как показывает анализ ситуаций, величина на самом деле всегда достаточно неопределенная. Существовавшие методы учета не могут обеспечить необходимую точность регулирования режима эксплуатации популяции с выраженной нелинейной зависимостью в эффективности воспроизводства для оптимизации промыслового изъятия.

Представленная в сценарии динамика с падением и локальным повышением эффективности воспроизводства не позволит экспертам своевременно установить угрозу кризиса, потому необходимы гибкие предосторожные методы регуляции промысла помимо прямого квотирования добычи.

Скорость развития кризисной ситуации в сценариях явно зависит от повышения доли изъятия, но чем больше стало изъятие, тем очевидно быстрее проявятся признаки кризиса и раньше сократятся уловы. Если доля изъятия превышает допустимый уровень незначительно, то признаки кризиса могут быть выявлены только непосредственно перед фактом коллапса запасов. Кривая воспроизводства с промежуточным минимумом между неустойчивым и устойчивым равновесиями выглядит более стабильной к воздействию промысла, но переходит к кризису демонстрирует внезапно резко. Следовательно, коллапс такого запаса действительно будет неожиданным для экспертов явлением. Свойства зависимости «кривой воспроизводства» помимо непосредственных популяционных аспектов оказывают влияние на последовательность решений, принимаемых управляющими режимом эксплуатации экспертами. Однако, рассмотренный сценарий коллапса не единственный вариант. Ранее в данной работе отмечено, что качественная динамика переходных режимов может отличаться в реальных ситуациях. Подобные изменения в модельных сценариях возникнут из-за неустойчивых инвариантных множеств.

Сравнительный обзор ряда специфических случаев коллапсов и проведенные модельные эксперименты позволяют обсудить в работе общность стремительных кризисных процессов для ряда различных по своим биологическим особенностям биоресурсов. Более того, полученные результаты дают основания говорить о разработке теории систематического развития коллапсов при регулируемом изъятии.

5.6. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ СЦЕНАРИЙ КОЛЛАПСА БИОРЕСУРСОВ С ВОЗНИКНОВЕНИЕМ ФЛУКТУАЦИОННОГО РЕЖИМА

На основе сравнительного обзора наиболее значимых примеров нами обоснована теория, что развитие коллапса промысловых биоресурсов не

форс-мажорное обстоятельство, вызванное стечением случайных факторов, но это повторяющееся явление. Более того, изучаемое явление с явными признаками систематичности в своем развитии. Проведенные модельные эксперименты и вычислительные сценарии позволили подтвердить закономерность развития кризисных ситуаций при применявшихся ЛПР подходах к регулированию.

Предотвратить итоговый коллапс, если биоресурсы после первичного некритического перелома, вызванного стремлением вести экономически максимально эффективный промысел, оказываются в режиме нерегулярных флуктуаций численности, ответственным регулирующим организациям сложнее.

Появление фиксируемых колебаний влияет на оценку ситуации, их форму циклическую или аperiodическую определить по данным мониторинга непросто. В случае роста амплитуды колебаний возможности адекватной оценки состояния и горизонт прогнозирования развития ситуации уменьшаются по независимым от ЛПР причинам. Время для принятия решений в ответ на изменение ситуации в таком случае у эксперта меньше. Из-за неопределенных и меняющихся от сезона к сезону трендов экодинамики решение нельзя отложить. Теоретические выводы наглядно подтвердил другой упоминавшийся важный случай – коллапс запасов камчатского краба у берегов Кадьяжского архипелага.

5.6.1. Адаптация гибридной структуры для репродуктивных особенностей популяции камчатского краба

Методология организации гибридной модели динамики поколений целенаправленно развивается так, чтобы вычислительную структуру можно было адаптировать для особенностей частной ситуации: расширять состав вспомогательных уравнений, длинную кадров времени или набор предикатов, помимо непосредственной корректировки основных популяционных параметров. Адаптация модели требует понимания важных аспектов ситуации.

Камчатский краб по сравнению с треской ведет малоподвижный образ жизни, потому «эффект агрегированной группы» и фактор успеха при поиске партнеров для размножения может быть выражен сильнее для донных ракообразных хищников, чем для мигрирующих в плотных скоплениях рыб. Дополнительный конкурентный фактор – для краба каннибализм наблюдается для всех его подвижных стадий развития, избыток молодежи будет уничтожен.

Обоснование предложенной формы зависимости подтверждается тем, что интродуцировать краба в других регионах оказалось сложно. Однако, при некоторых условиях инвазивная популяция краба способна демонстрировать вспышку численности, как было в Баренцевом море, куда краб необдуманно был вселен еще в 1960-е годы. Увеличение репродуктивной активности происходит резко при оптимальной плотности популяции. Кривая воспроизводства для относительно малой численности запаса в таком случае будет неунимодальной и проходить существенно ближе к оси абсцисс,

что опасно, но при повышении плотности выше порога вероятен резкий рост эффективности воспроизводства.

Пороговый эффект при достижении оптимальной плотности объясняет произошедшее в 2006–2008-х гг. нашествие камчатского краба у берегов Норвегии. С 2003 г. [269] Россия ведет официальный квотируемый промысел краба и ведется оценка численности биомассы – на рис. 5.6. виден резкий рост уловов.

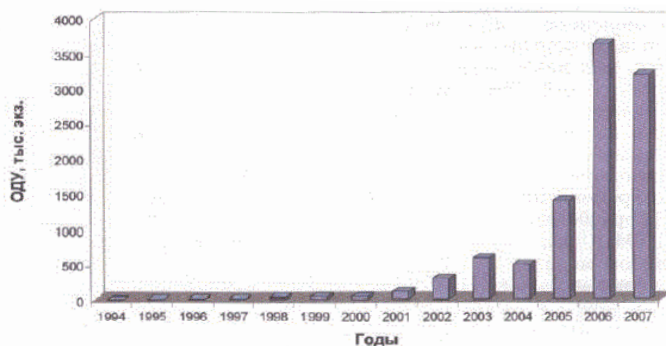


Рис. 5.6. Рост общего допустимого улова ОДУ для камчатского краба в Российской ИЭЗ Баренцева моря

Вспышка численности краба в новом ареале по разработанной нами трактовке сценария – это симметричный эффект экодинамики, математически обратная сторона проявления порогового эффекта в эффективности воспроизводства, которая характеризуется сложной зависимостью из-за особенностей пищевого поведения вида. Краб ценный объект промысла, но при этом последствия его вселения экологи Норвегии оцениваются как негативные. Краб охотится на ценных моллюсков и других морских членистоногих. Теперь агрессивный краб медленно мигрирует популяционной волной на юг Атлантики и уничтожает автохтонных конкурентов вдоль побережья Баренцева моря.

Сравнивая явления стремительных изменений для трех популяций краба: у берегов Аляски, Норвегии и Мурманской области, можно методом дедукции выявить специфические свойства модельной зависимости и внести необходимые коррективы при настройке вычислительной структуры для анализа сценариев.

В разработанной предикативно-переопределяемой гибридной структуре нам для описания специфических экологических факторов (активного каннибализма краба даже на ранних стадиях развития) достаточно увеличить действие всего нескольких из модельных параметров – компенсационной смертности α_3 и коэффициента ζ триггерной функции $\Psi[S]$, отражающего выраженность действия эффекта Олли. В данном случае так расширим область действия эффекта Олли. Дополнительно включим в модель выживаемости поколения на старшей стадии развития дополнительное запаздывание, связанное с регуляцией скорости размерного развития на стадиях до начала активного хищничества:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \Psi[S; \zeta]\beta)N(t), & P_1(t) \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)) \\ -\alpha_3 w(t - \xi)N(t - \xi) - \beta, & P_3(t, w(t)). \end{cases}$$

Важнейшим параметром модели для изменения формы зависимости и поведения итераций оказывается плодовитость λ , но в экологической реальности это медленно изменяющаяся характеристика. Используемая для описания исследуемого случая деградации как оператор эволюции j зависимость, в отличие от трескового сценария с одним $\max \varphi(x)$, будет обладать более чем одним максимумом. Для данного сценария важно положение относительно друг друга первого от начала координат максимума R_{\max} и локального минимума R_{\min} , что $R_{\min} > R_{\max}$, но значимо сохранение свойства:

$$\varphi(R_{\max}) > R_{\min}.$$

С использованием триггерной функции $\Psi[S]$ в первом уравнении убьели мы получим разделение для траектории итераций множества доступных начальных точек R_0 траекторий неустойчивой «репеллерной» точкой. Таким образом итерации $R_{n+1} = \varphi(R_n)$ получают две области притяжения Ω_1, Ω_2 у двух альтернативных аттракторов с инвариантной границей между областями. Отличие от предыдущего сценария будет заключаться в том, что не только одна репеллерная точка равновесия сможет определять границу областей притяжения аттракторов и сами аттракторы могут быть не только точечными (или циклами из конечного множества точек).

На данном примере мы видим отличие поведения динамики популяции при воздействии, пребывающей в окрестности стабильного и нестабильного равновесия. В последнем случае любое дополнительное возмущение приведет к коллапсу. Однако, существование именно точки неустойчивого баланса – это математическая идеализация. Ближе к экологической реальности представить это состояние в модели как интервал значений численности с некоторыми вероятными свойствами поведения траектории, отделенный от области притяжения устойчивого состояния равновесия. Переход под действием интенсивного изъятия и пребывание популяции в подобном интервале может выражаться в статистическом эффекте псевдостабильзации. При усреднении данных появление режима флуктуаций будет сглаживаться в отчетности, что затруднит прогнозирование скорого развития быстрой фазы кризиса.

Определим необходимые для описания рассматриваемого на примере камчатского краба особенности формы модельной зависимости, которую будем использовать как оператор эволюции функциональных итераций. Для итераций симметричного квадратичного отображения с каскадом бифуркаций удвоения периода $f(f \dots (x) \dots)$, $f(x) = 4\lambda x(1-x)$ в таких случаях возникнет пара равновесий – устойчивая/неустойчивая стационарные точки, но полученная нами модельная зависимость не подчиняется этому правилу чередования устойчивых точек из-за несимметричности

графика функции относительно экстремума. По указанным причинам для построения адекватного модельного сценария важны не только экстремумы (их количество и взаимное расположение) у кривой воспроизводства, но и не притягивающие инвариантные множества, которые в предыдущих модификациях модели ограничивались существованием репеллерной точки, обозначенной нами по порядку от начала координат как R_1^* .

Если значение функции $\varphi(x)$ в точке экстремума $\min\varphi(x)$ станет еще меньше: $\varphi(x_{\min}) < x_{\min}$, то это снижение приведет к появлению двух дополнительных точек равновесия – кривая опустившись ниже получит дополнительные пересечения с биссектрисой координатного угла (в данном несимметричном случае необязательно пары устойчивая / неустойчивая точка). Этот эффект появления новых точек в окрестности минимумов лежит в основе появления окон периодичности между хаосом в отображении Фейгенбаума. Минимумы нечетных итераций опускаются ниже и в результате появляется одна точка при касании, из которой далее образуется пара стационарных точек. Именно по данной причине выбираемая конфигурация экстремумов у получаемой при численном решении модельной зависимости является важной для моделирования процессов с резкими изменениями. На положение экстремумов влияет не только определение параметров уравнений, но и контрольных пороговых величин, используемых для проверки предикатов.

Поведение итераций с несколькими экстремумами именно по причине возможности возникновения дополнительных точек равновесия у старших итераций будет качественно отличаться от динамики унимодальных итераций, применяемых в моделях воспроизводства биоресурсов Рикера, Кушинга, Шепарда, которые мы рассмотрели в обзорной главе 1. В случае возникновения дополнительных точек старших итераций станут траекториями альтернативных циклов, но этот эффект будет заметен в узких диапазонах значений параметров.

Используемый нами в вычислительных экспериментах для имитации популяционных изменений набор описательных средств у динамики итераций широк, но в любом отношении это ограниченный арсенал. Для итераций $R_{n+1} = \varphi(R_n)$ большинство авторов выделяют [270] три топологические формы аттракторов: цикл конечного периода или точка равновесия $x^* = \varphi(x^*)$, аттрактор гомеоморфный канторовскому множеству. Менее изучен интервальный аттрактор, в виде конъюгации несчетного множества отрезков – из некоторого интервала исключается возможно континуальное множество точек.

Для итераций (с учетом изменяющегося по правилам внешнего возмущения) $x_n = \varphi(x_{n-1}) \pm \Theta(n)$ выделяют три типа бифуркаций – перестроений типа и числа аттракторов, которые бывают прямые и обратные. Аттракторы, отличные от точек равновесий, могут моментально терять свойство инвариантности $f(\Lambda) \in \Lambda$, что зависит от положения границы $\partial\Omega$ у их области притяжения Ω . Помимо бифуркаций аттракторы могут испытывать другие перестроения, так они сосуществуют с неустойчивыми инвариантными многообразиями. Хаотический аттрактор может разделяться на части и

снова сливаться воедино, или получить не пустое пересечение с границей $\partial\Omega \notin \Omega$ своей области притяжения:

$$\Omega : \forall x_0 \in \Omega, \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi^n(x_0) = \Lambda .$$

Граница областей притяжения двух притягивающих множеств – инвариантное множество для траектории. В таком случае перестроений при изменении параметров фиксируется ситуация, называемая «граничным кризисом аттрактора» [271]. Термином «кризис» называют перестроение положения точек, составляющих аттрактор относительно сосуществующих с ним неустойчивых инвариантных многообразий. В современных работах выделяют три типа кризисов аттракторов [272]. Для задач настоящего исследования интерес представляет граничный кризис согласно нашей идее максимального использования всех доступных нелинейных эффектов итерационной динамики как средств описательного арсенала. Данный тип кризиса возникает в квадратичном отображении Фейгенбаума, но граничный кризис не возникает в рассмотренных нами итерациях моделей «кривых воспроизводства» Рикера и Шепарда, так как ниспадающая ветвь правее максимума у этих кривых асимптотическая. Таким образом, наличие ненулевой горизонтальной асимптоты у унимодальной функции влияет на качественное поведение динамики траектории итераций – хаотический аттрактор расширяется и не разрушается.

5.6.2. Критерии выбора свойств функций для сценарных итерационных моделей с регуляцией воздействия

Отличия динамики рассмотренных ситуаций очевидно связаны с разными формами зависимости в эффективности воспроизводства, отражающих действие внутренних регуляционных конкурентных механизмов и биотических факторов. Отличия, отраженные в зависимости эффективности воспроизводства, вызывают и другие качественные нелинейные трансформации при внешнем воздействии. Флуктуационный режим изменений биоресурсов требует отдельного модельного рассмотрения в сценарных вычислительных экспериментах по двум причинам: во-первых, особенностей трактовки ситуации при смене позитивных/негативных трендов экодинамики со стороны регулирующих ЛПР, во-вторых, из-за иного требуемого набора нелинейных свойств функциональных итераций модели.

По данным промысловой статистики на примере промысла камчатского краба популяции у берегов Алеутского полуострова мы выделили динамически сложный и математически интересный сценарий коллапса биоресурсов, который по ряду отличий анализировали специально. Динамические особенности влекут качественные отличия и в логике изменения управляющего воздействия, что требует для описания сценария разработать форму зависимости с качественно другими последовательностями метаморфозов поведения траектории итераций.

Возможности предложенной методологии организации сценариев с гибридными структурами позволяют вычислительно реализовать определенную форму зависимости, которая отражает изменения в эффективности воспроизводства интересующей нас популяции. Именно исходя из динамики изменений промышленной статистики в некоторых случаях при явных изменениях специфических динамических режимов можно решить обратную задачу и установить нелинейные особенности модельной функциональной зависимости.

Разработанный нами метод представления модельной структуры позволяет гибко трансформировать получаемую в модели зависимость с учетом аспектов исследуемой проблемы экодинамики. В дальнейшем анализе для наилучшего математического описания сценария с экспертным управлением нам нужно выбрать подходящие нелинейные эффекты и бифуркации из доступного арсенала теории дискретных динамических систем. Важны для описания сценария нелинейного флуктуационного развития популяционного кризиса не только количественные характеристики модели воспроизводства – как высоко над биссектрисой координатного угла располагается зависимость $R=\varphi(S)$ запаса и пополнения, это расстояние изменяется несложным масштабированием.

Важно наличие нескольких экстремумов у используемой в качестве оператора эволюции $x_{n+1}=\varphi(x_n)$ функции «запас-пополнение» $\varphi(x)$, так как появление максимума создает дополнительные стационарные точки у старших итераций $\varphi(\dots\varphi(x))$. Новые стационарные точки меняют качественную динамику в моменты бифуркаций, становятся аттракторами или служат границами областей притяжения, если возникшая точка не притягивает траекторию.

На рис. 5.7. показана полученная численным решением уравнений гибридной системы на интервалах времени модельная зависимость с тремя экстремумами. Правая ветвь в форме ниспадающей горизонтальной асимптоты.

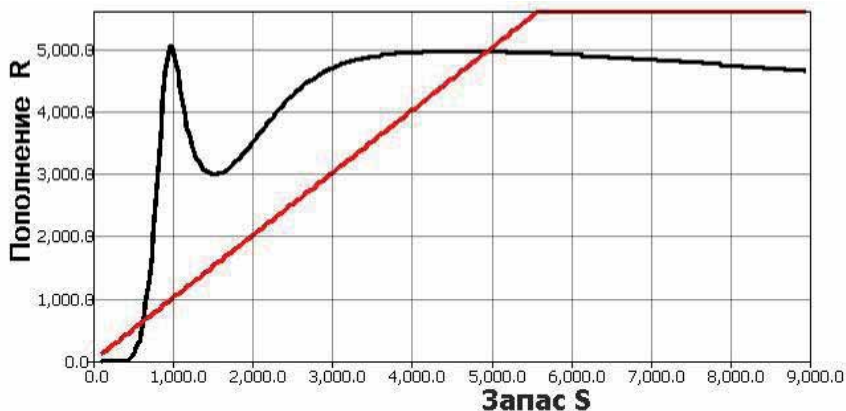


Рис. 5.7. Форма модельной зависимости эффективности воспроизводства с тремя экстремумами и двумя нетривиальными равновесиями (точки пересечения с биссектрисой координатного угла)

При некоторых условиях минимум может опуститься ниже биссектрисы. Тогда характеристики эффективности восполнения биоресурсов качественно изменятся – появятся интервалы между равновесиями, где восполнение не восстанавливает убыль запаса. Это перестроение существенно изменит и динамику имитирующий развитие процесса траектории модели. Очевидно, что задача регулирования изъятия биоресурсов с такой зависимостью значительно сложнее, чем для куполообразной формы по модели Рикера или Шепарда с единственным нетривиальным состоянием равновесия, где легко отыскивался оптимум для размера изъятия, но в реальности ситуации разнообразнее.

Поведение функциональных итераций с несколькими экстремумами при изменении бифуркационных параметров может быть чрезвычайно нетривиальным, сложнее чем сценарий Фейгенбаума [273], и при этом не все нелинейные эффекты экологически обоснованы. Для итераций функции $x_{n+1} = \varphi(x)$ с тремя экстремумами не выполняются условия теоремы Дж. Синжера [95], необходимые для реализации сценария перехода к глобальному хаотическому аттрактору через каскад бифуркаций удвоения периода цикла $p \rightarrow \infty$ по теории «Фейгенбаума, Коллета и Трессера» [274]. Учтем, что при плавном изменении параметра у такой итерации $x_{n+1} = \varphi(x)$ возникнут два альтернативных устойчивых цикла четного периода. Соответственно, каскад появления циклов 2^i не будет бесконечным. Цикл может быть и большого периода, но канторовское множество, как причина возникновения динамического хаоса не образуется. Нигде не плотное совершенное «Кантовское» множество, не имеющее не внутренних, не изолированных точек множество – совпадающее с множеством всех своих предельных точек, формируется из-за бесконечного множества потерявших устойчивость циклических точек. Тогда все циклы существуют, но они неустойчивые, эти циклы бесконечно делят пространство и вызывают эффект чувствительной зависимости от начальных условий. Изменения на пути к хаосу начинается с простого цикла $p=2$ из двух точек, но этот вариант для решаемой задачи непригоден, что было показано в главе 1, так циклы популяционных моделей отличаются не только длиной периода.

5.6.3. Реализация функции с четырьмя нетривиальными равновесиями для анализа перехода к флуктуациям

Для моделирования сценария возникших нерегулярных флуктуаций запасов краба получим зависимость при решении трех склеенных по промежуточным начальным условиям $N(0)_i$ задач Коши из уравнений гибридной переопределяемой структуры с непостоянным из-за уровня внешнего воздействия q числом нетривиальных стационарных состояний итераций $\varphi(R_i^*) = R_i^*$. При всех моделируемых воздействиях и изменениях триггерных функций число нетривиальных пересечений с биссектрисой координатного угла должно оставаться не менее двух на всем протяжении вычислительного сценария $\forall n$, это свойство обеспечит сохранение бистабильности модели. На следующем графике (рис. 5.8) представлено

положение графика модельной зависимости эффективности воспроизводства запасов относительно биссектрисы координатного угла. Все стационарные точки равновесия $\varphi(R_i^*) = R_i^*$, независимо от исходной их устойчивости, не совпадают с двумя экстремумами кривой, так как правая ветвь в данной форме зависимости асимптотически возрастающая.

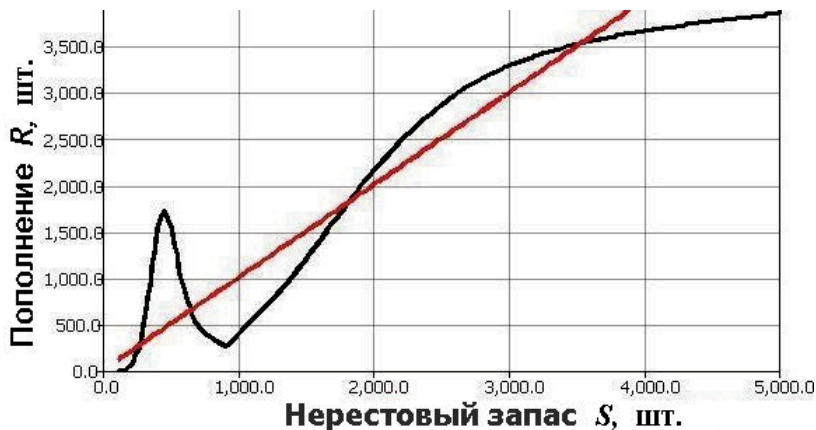


Рис. 5.8. Полученная при численном решении функциональная зависимость с четырьмя нетривиальными равновесиями $R_1^* < R_2^* < R_3^* < R_4^*$, как пересечениями с биссектрисой координатного угла при условиях $\min\varphi(S) < R_2^*$, $\max\varphi(S) > R_3^*$

Для анализа изменений был разработан способ получения имитирующих ситуации нелинейных эффектов динамики, которые экологически обоснованны и не противоречат наблюдениям. Свойства наличия четырех стационарных точек у кривой будет недостаточно для получения необходимых нам нелинейных эффектов с целью описания последовательных этапов развития кризиса.

Предлагаемая в главе 5 оригинальная идея – *регулировать положения экстремумов* (и в некоторых случаях точек перегиба) у функций, используемых в качестве операторов эволюции дискретных динамических систем для описания наблюдаемых в данной ситуации популяционных изменений. Таким способом будем изменять структуру границы областей притяжения аттракторов.

Помимо стационарной точки и замкнутого цикла из конечного набора точек, аттрактором для дискретной динамической системы может быть сложное многообразие: совершенное канторовское множество (образуется в точке накопления каскада бифуркаций удвоения Фейгенбаума связано с хаотическим режимом) или набор несвязных интервалов в некоторой ограниченной подобласти. Последний случай является редким. Ранее интервальный аттрактор не использовали в моделях математической биологии, тогда как канторовский аттрактор как вариант притягивающих множеств возникал во многих работах.

О ситуациях, когда исследуемая зависимость запаса и пополнения популяции представляется сложной зависимостью с более чем одним экстремумом и форма такой кривой может быть подвержена изменениям

писал в своих работах еще У. Рикер. На рис. 5.9. приведенная автором концепция связи запаса и пополнения Рикером «волнообразная форма» зависимости, установленная для одной из популяций горбуши Британской Колумбии в реке Мак-Клинтон. Отметим, что Рикер только привел в [65] возможную форму, но у него не было математической формализации для таких эмпирически обнаруженных им волнообразных форм кривых воспроизводства, потому Рикер по своей теории не смог исследовать обязательно возникающие для таких случаев сопутствующие нелинейные эффекты популяционной динамики. Популяция тут погибает при изъятии 72%, и это очень большая доля, популяция имеет высокую репродуктивную активность.

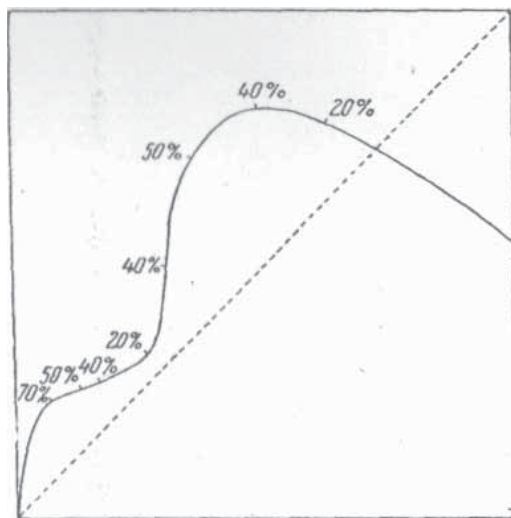


Рис. 5.9. «Волнообразная» зависимость с возможностями трансформации положений равновесия полученная У. Рикером для горбуши в [65]

На графике отсечками на кривой самим У. Рикером показано, где будет проходить пересечение кривой с биссектрисой при указанном им проценте изъятия из запаса – где будет равновесие. При увеличении изъятия в такой модельной зависимости возникнут как минимум три стационарных точки – пересечения с биссектрисой, но Рикер не оперирует в своих работах понятием устойчивости равновесных состояний (или циклов – по наклону кривой на указанном графике можно предположить возникновение цикла).

Важность наличия нескольких равновесий на кривой воспроизводства и смены их устойчивости отметил гораздо позднее в работах Р. Петерман [275], [276] и снова сделал это при анализе динамики промысла различных видов тихоокеанского лосося, что достаточно экологически объяснимо. Для размножающихся в небольших реках лососёвых фактор плотности икры на нерестилищах и выживаемости молоди при переходе к жизни в океане может становиться критическим при острой конкуренции в местах нереста.

В данной работе автору удалось отразить особенности экологии видов методами теории динамических систем с использованием наиболее приближенной к биологической реальности моделирующей структуре – гибридно-му автомату с логикой переходов и событийностью времени.

Таким образом, выполненные исследования автора вносят значимый вклад в развитие длительных научных изысканий большого перечня известных авторов в области математических методов описания концепции внутривидовой регуляции и формальных основ теории формирования популяций.

Используя современные технологии представления моделей и методы анализа их поведения нам удалось установить новые аспекты в области системного анализа проблемы природопользования биоресурсами с нелинейной зависимостью в эффективности воспроизводства, имеющей вековую историю исследований.

5.6.4. Целенаправленная трансформация свойств модельной зависимости в имитационном сценарии

Важное преимущество методологии построения предикативных структур и анализа сценариев – возможность получения требуемых трансформаций в функциональных взаимоотношениях факторов уже по ходу развития имитационного модельного сценария с воздействием. Гибкий подход к моделированию протекающих процессов перспективен для многих областей, но требуется выбирать: какие именно формы трансформаций действительно необходимы для анализа ситуации. Общих правил выбора предложить не можем.

Вариативность свойств реальных кривых воспроизводства промышленных популяций и их трансформируемость в зависимости от внешнего воздействия была отмечена ранее в работе П. Ларкина и Р. Рейли [277]. В методически интересном примере на рис. 5.10 авторами показано гибкое изменение свойств зависимости с несколькими экстремумами для популяции, которая находилась под интенсивным воздействием. На графике видно появление дополнительной неустойчивой стационарной точки, но это эмпирический график зависимости.

Приблизительную форму с двумя максимумами можно получить, используя дважды вычисленную формулу Рикера с разными значениями её коэффициентов:

$$G(x) = f_1(f_2(x)) = a_1(a_2xe^{-b_2x})e^{-b_2(a_2xe^{-b_2x})}.$$

Но это будет экологически не обоснованный способ и использование таких итераций приведёт к появлению симметричных циклов, которые не соответствуют реальной колебательной динамике популяций по порядку обхода точек цикла.

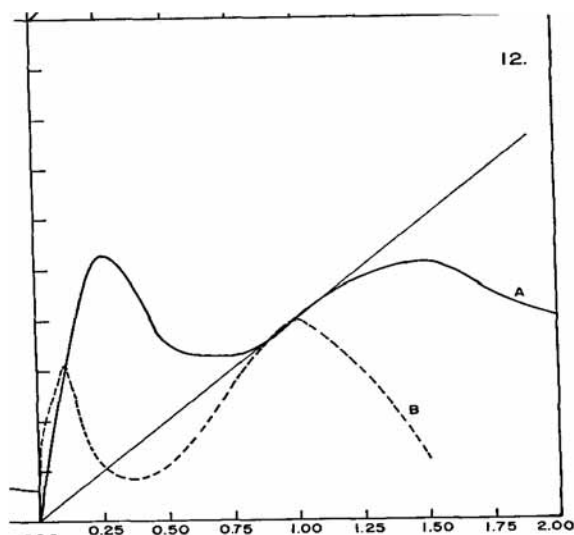


Рис. 5.10. Варианты трансформаций сложной зависимости в эффективности воспроизводства популяций с экстремумами согласно [277]

Авторы работы отмечали, что зависимость в эффективности воспроизводства, отражаемая «кривыми пополнения» не является некоторой жесткой априори заданной функцией. Исследуемое свойство возникновения нелинейной связи в воспроизводстве биоресурсов не эволюционно сложившаяся характеристика данного биологического вида, но ситуативное следствие, — результат сосуществования популяций в конкурентной среде обитания, которая изменчива. Важные перемены могут вызвать инвазия чужеродного конкурента и изменение гидрологического режима, и селективное изъятие одной из нерестовых групп. По предположению автора установленный в результате анализа данных о молоди волжской севрюги локальный минимум в эффективности воспроизводства возник вследствие зарегулирования стока после строительства ГЭС. Ранее эти зависимости для осетровых рыб Каспия скорее всего имели другие свойства.

Авторы [277] рассматривали альтернативные свойства зависимостей «кривых воспроизводства», чем предсказывали модели Бивертон-Холта и Рикера, так как они видели, что в реальности возникают более сложные формы. Однако в этой работе не акцентировали внимание на важнейшем: устойчивости неподвижных точек, хотя показанный на рисунке вариант изменения кривой бифуркационный. Этот вариант изменений качественно отличается от показанного ранее примера кривой из работы Рикера в [65]. Количество и расположение точек экстремумов функции влияет на режимы динамики поведения траектории при итерациях.

Важная особенность разработанного метода представления гибридной модели, — получаемая в результате последовательного численного решения уравнений убыли для всех биологически допустимых начальных условий модельная зависимость обладает гибкими возможностями трансформации своих свойств и в качестве оператора эволюции исходных точек дискретной траектории. Получаемые изменчивые свойства функции воспроизводства

отражаются на трансформациях фазовых портретов для её итераций – дискретной составляющей непрерывно-дискретной динамической системы. Автор использует аспект изменчивости характеристик функции для вычислительных сценариев.

Задача практического применения гибридных структур проще, чем выглядит на первый взгляд. Анализ устойчивости неподвижных точек динамической системы, алгоритмически реализованной в инструментальной вычислительной среде, можно проводить достаточно наглядным способом.

Достаточно будет использовать определение некоторых свойств при численном решении уравнений второй итерации, дважды вычисленной зависимости: $\psi^2(x)$. Согласно теореме из [278] необходимым и достаточным условием устойчивости неподвижной точки x^* одномерного отображения является неравенство: $\psi^2(x) > x$ при $x < x^*$ и $\psi^2(x) < x$ при $x > x^*$. Выполнение этих условий мы можем легко проверить для разработанной модели.

Функциональная зависимость, получаемая на основе численного решения уравнений гибридной системы и используемая как оператор эволюции итераций для модельного сценария с целевыми свойствами перехода к флуктуациям, должна удовлетворять следующим пяти критериям:

1. $\exists x_0 < x_1, x^* > x_1 : \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(x_0) = x^*$.
2. $\forall x_0 > x_1 : \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(x_0) = x^*$.
3. $\exists y_0 < x_1 : \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(y_0) \in \Lambda, \inf \Lambda < x^*$.
4. $\forall x_0 < x_2 : \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(x_0) = 0$.
5. $\varphi(x_{\max}) > x_1, \varphi(x_{\min}) > x_2, x_{\max} < x_{\min}$.

Отмеченные в критериях свойства наличия точек экстремумов и их расположения относительно биссектрисы координатного угла у кривой зависимости запаса и нового поколения определяют качественный характер динамики траектории, которая описывает перемены состояния для анализируемой популяции при применении регулируемого воздействия. Для расчета динамики, получаемого от родительского запаса $n+1$ поколения, происходит реинициализация начальных условий для первого уравнения:

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

где v_m – показатель посленерестовой выживаемости для серии предшествующих m поколений, а S – численность готового к размножению запаса со средней плодовитостью λ .

Наглядные актуальные изменения, которые можно целенаправленно получить при варьировании параметров на рис. 5.11. для сравнения на двух графиках представлены возможные практически интерпретируемые

изменения положения максимумов и неподвижных точек зависимости. Наглядно видно, если значение в точке максимума существенно выше третьего считая от начала координат равновесия, то траектория быстро «перепрыгнет» данное равновесие, образуя некоторый «порог» для развития процесса восполнения популяции.

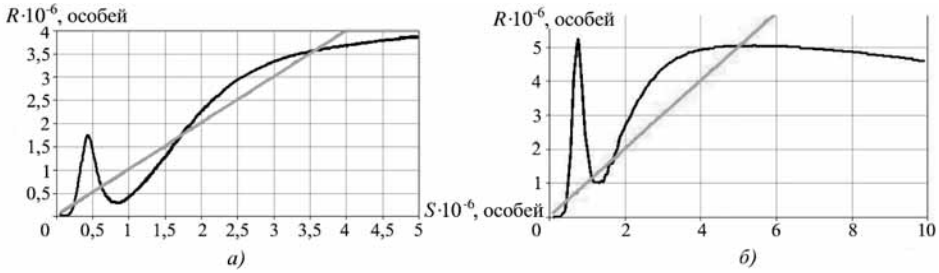


Рис. 5.11. Пример трансформации экстремумов и нетривиальных равновесий у получаемой в гибридной модели функциональной зависимости $\varphi(\lambda, S)$, а) при $\min\varphi(R) < R_2^*$, $\max\varphi(R) > R_3^*$, б) $\min\varphi(R) > R_2^*$, $\max\varphi(R) > R_4^* > R_3^*$

В случае, если локальный максимум не высок по сравнению с критически для существования популяции порогом численности, то и наибольшее равновесие останется для моделируемой популяции в исторической перспективе теоретически недостижимо, но только при условии сохранения такой формы зависимости и минимальных негативных вероятностных факторах, спорадически присутствующих в естественной среде размножения.

Положим в сценарии, что в исходной ситуации с промышленной популяцией кривая (полученная при численном решении) восполнения $\varphi(S)$ без значимого воздействия обладает четырьмя последовательно возрастающими точками: $0 < R_1^* < R_2^* < R_3^* < R_4^*$, при сохранении условия для первого экстремума $\max\varphi(S) > R_3^*$.

Указанные точки для траектории окажутся равновесными состояниями, но устойчивость будет сохранять только одно из них. Если мы получим соотношение $\max\varphi(S) < R_3^*$, то областей притяжения у траектории итераций будет три. В таком случае траектория не может из окрестности первой неустойчивой репеллерной точки перейти к наибольшему равновесию и данный случай не будет биологически обоснованным. Потому в сценарии развития кризиса при регулируемом воздействии важно, как именно положение экстремума у полученной зависимости, так и значение функции в точке максимума и точке минимума – эти точки отражаются итерацией вправо и влево.

Для получения эффекта целевого перестроения фазового портрета в рассматриваемом кризисном сценарии потребуются три неустойчивые стационарные точки итераций. Наличие точек прообразов у неустойчивых точек тоже важное свойство функциональной зависимости. Модель предполагает сохранение устойчивости нулевого равновесия $R=0 \forall n$ всегда при любых возможных значениях параметров и уровне воздействия.

Первое наглядное качественное перестроение (метаморфоз) поведения траектории итераций получим, когда плавно будем увеличивать уровень

воздействия q . Дополнительное воздействие будет не просто понижать положение кривой относительно биссектрисы, но вызовет обратную касательную бифуркацию. Прямая бифуркация – появление пар точек, с которыми связаны окна периодичности в сценарии хаотизации Фейгенбаума. В случае обратной касательной бифуркации произойдет эффект слияния устойчивого R_4^* с неустойчивым равновесием – третьей стационарной точкой R_3^* . Получившаяся после слияния точка критическая и исчезает при любом возмущении.

В результате в вычислительном эксперименте наблюдаем потерю наибольшего состояния равновесия вместе с промежуточной репеллерной точкой. Так реализуется смещение влево и дальнейшее исчезновение важной ранее существовавшей притягивающей точки траектории для области притяжения Ω_2 , как показано на рис. 5.12, где правая ветвь зависимости:

$$f(R) < R, R_3^* < R.$$

Скорость развития сценария кризиса при избыточном изъятии в математической интерпретации зависит от величины смещения положения двух равновесий относительно друг друга за прошедшее кадры модельного времени:

$$\Delta SSB = \frac{|R_4^* - R_3^*|_n}{|R_4^* - R_3^*|_{n-1}} \times n.$$



Рис. 5.12. Проведение целенаправленной трансформации в модели с воздействием: функциональная зависимость в результате обратной касательной бифуркации с оставшимися двумя неустойчивыми равновесиями и при условии для экстремума $\min f(S) > R_2^*$

Форма полученной зависимости при сохранении свойств:

$$R \in [R_1^*, R_3^*]: f(R) \geq R, \forall 0 < R \notin [R_1^*, R_3^*]: f(R) < R$$

математически объясняется возникающие быстрые и медленные варианты сценариев коллапса биоресурсов. Если скорость сближения мала, то траектория стабилизируется в окрестности критической точки непосредственно перед самым моментом бифуркации исчезновения. В некотором отношении медленный вариант развития кризисной ситуации будет опаснее, так как своевременное выявление его признаков сложнее для ЛПР. Тогда переход в новый режим изменения численности будет выглядеть для экспертов неожиданно резким.

В результате кривая зависимости превышает биссектрису (уровень восполнения запаса) только на небольшом участке между первой и второй неустойчивыми стационарными точками, которых осталось только две. Теперь после исчезновения устойчивой точки интересно определить, что представляет собой притягивающее множество для траектории в области притяжения Ω_2 .

Анализ разбиения отрезка $[R_1^*, R_3^*]$ показывает, это локально-несвязное множество, образованное бесконечным количеством интервалов, которые ограничены прообразами неустойчивых стационарных точек. Все не притягивающиеся к аттракторам прообразы точек-репеллеров разделяют отрезок $[R_1^*, R_3^*]$ на неупорядоченную череду интервалов, принадлежащих разным областям притяжения двух аттракторов: R_4^0 и тривиального равновесия.

5.6.6. Формализация логики принятия экспертных решений для сравнительного анализа флуктуационных сценариев

Рассмотрим динамику коллапса в сценарном эксперименте с формализованной логикой экспертного управления промысловым изъятием. Проблемы поиска системности управляющих решений по формализованным целям регионального рыбохозяйственного комплекса и методология выработки и объективирования решений рассматривались в работах Л.М. Лукьяновой [279] и В.П. Заболотского [280]. Основываясь на данных работах по структурному анализу достижения целей в рыболовстве и рекомендациях [281] по ведению рационального промысла для сценария реализуем алгоритм регулирования для изменения доли промыслового изъятия в имитационной модели по набору логических предикативно заданных правил. Составим алгоритм по принципу если выполняется некоторое условие для ситуации, то далее выполняется изменения значения уровня воздействия q на следующем кадре модельного времени q_{n+1} .

Чем точнее выбирается значение вновь устанавливаемой для популяции доли изъятия, тем стабильнее становится алгоритм регуляции промысла. Однако в реальности существующие средства учета не позволяют избавиться и от присутствующей погрешности в оценках и достигать абсолютной точности установленного изъятия при ведущемся массовом промыс-

ле, даже если оценка запаса точна до 1%. Потому не видим практического смысла указывать точность изменения до второго или третьего знака после десятичной запятой, даже если мы укажем сотые доли процента в имитационных сценариях в вычислительной среде. Целесообразно использовать квантование величины изъятия, введя некоторый квант изменения для q . Чем более массовый эксплуатируемый промысловый запас, тем величина кванта изменения для многочисленных короткоциклового видов может быть больше. Соответственно, для эксплуатации запасов долгоживущих крупных хищников квант необходимо выбирать более точно. Предположим, что у такого массового вида, как перуанский анчоус допустимая величина изменения находится в диапазоне 0.01 до 0.05, так как это уже в общем выражении значительное изъятие биомассы, но для редких ценных видов (крабов, китов, акул) допустимое изъятие устанавливают числом особей.

При существующей практике регуляции нет смысла в модельных сценариях использовать квант изменения меньше 0.05. С другой стороны, погрешность доли изъятия в 4–5% уже может оказаться значительной, так как ошибочные оценки имеют свойство накапливаться, увеличивая постепенно расхождения прогнозов состояния биоресурсов с реальностью каждый сезон. Изъятие большего чем планировалось числа особей ведет к уменьшению ожидаемого в прогнозах пополнения, потому важно даже малое, но систематическое превышение квоты.

Сформируем следующую предикативную схему для алгоритма модельного флуктуационного сценария с регулируемым изменением воздействия:

$$\sum_{n=1}^5 q_n R_n \leq 0.5 \sum_{n=1}^5 R_n, q = const$$

$$\sum_{n=1}^5 q_n R_n > 0.5 \sum_{n=1}^5 R_n, q_{n+1} = 1.2q$$

$$0.2 \sum_{n=1}^5 q_n R_n > 0.8 q_{n+1} R_{n+1}, q_{n+2} = 0.8 q_{n+1}$$

$$0.2 \sum_{n=1}^5 q_n R_n > 0.5 q_{n+1} R_{n+1}, q_{n+2} = 0.6 q_{n+1}$$

$$0.2 \sum_{n=1}^5 q_n R_n > 0.1 q_{n+1} R_{n+1}, q_{n+2} = 0.$$

Цель формализации – добиться наибольшей реалистичности сценариев. Схема предикативного изменения отражает обсуждаемые в главе 4 принятые принципы регулирования воздействия исходя из оценки обстановки, меняющейся при флуктуациях биоресурсов на основе статистики за предшествующий период. Возможно использование в модели сопутствующих популяционных характеристик и поправок на условия среды размножения, что можно сделать табличной функцией или введением коэффициентов

отклонения от оптимальных значений. Описанный способ формализации алгоритма корректировки воздействия составная часть предложенной методологии анализа реальных резких структурных изменений в биофизических процессах при различном характере воздействия. Способ может быть применим помимо эксплуатации биоресурсов и для ситуации развития агрессивных инвазионных процессов.

5.6.7. Динамические особенности сценарной модели с аperiodической динамикой для коллапса популяции краба

После определения необходимых свойств модельной зависимости для популяции краба в вычислительных экспериментах опишем поведение траектории функциональной итераций $R_{n+1} = \phi(R_n) - q_n R_n$ на основе адаптации гибридной моделирующей структуры и формализации алгоритма изменения воздействия, опирающегося на проведение сравнительных оценок состояния биосистемы, так как ЛПР используют информацию о прошлом состоянии. При принятии решений эксперты руководствуются усредненными данными об уловах за предыдущие годы. Эксперты сопоставляют полученные уловы с оценками прошлого состояния биоресурсов, которые могут получать разными методами (траловые съемки с аппроксимацией на акваторию, анализ данных эхолотов). На основе сравнений ЛПР принимают решение об изменении промыслового воздействия q или сохранении его на прежнем уровне. Для разных популяций даже одного промыслового вида применяются разные критерии определения допустимых уловов исходя из условий существования, нарушения возрастного распределения и старения популяции и ожидаемых темпов пополнения. Некоторые природные факторы по современным рекомендациям могут изменить промысловый прогноз, что тоже можно отразить в имитационных сценариях.

Из теории известно, что для функциональных итераций можно выделить три топологических типа асимптотически устойчивых подмножеств – аттракторов:

- 1) цикл конечного периода (в том числе стационарная точка $f(x)=x$);
- 2) аттрактор, гомеоморфный совершенному канторовскому множеству;
- 3) интервальный аттрактор из объединения бесконечного множества не-связных отрезков.

Для итераций $R_{n+1} = \phi(R_n) - q_n R_n$ возможны три типа бифуркаций – перестроений количества аттракторов или их топологических типов, которые бывают прямые и обратные. Аттракторы, отличные от циклов, могут моментально терять свойство инвариантности $f(\Lambda) \in \Lambda$. Момент потери инвариантности зависит от положения границы их области притяжения и других неустойчивых множеств, имеющих свойство инвариантности. Аттрактор может разбиться на части или пересечься с границей $\partial\Omega \notin \Omega, \partial\Omega \neq \emptyset$ своей области притяжения:

$$\Omega : \forall x_0 \in \Omega, \lim_{n \rightarrow \infty} \phi^n(x_0) = \Lambda, \forall \phi^n(\Lambda) \in \Lambda$$

В момент перестроения, когда $\exists n, \varphi^{n+1}(\Lambda) \notin \Lambda$ фиксируется ситуация кризиса инвариантности. В данной работе теория топологии отображений пересеклась с задачей биокибернетики.

Для имитационного моделирования и анализа исследуемого сценария деградации запасов краба из двух этапов и финального коллапса предложим сценарий с двумя метаморфозами топологии фазового портрета итераций.

Первый метаморфоз получим, плавно увеличив q , 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 устойчивости $\forall n R=0$.

В вычислительных сценариях масштабируется зависимость φ вдоль оси S . Функция триггер Ψ не изменяет относительное положение у четвертого устойчивого равновесия R_4^* , но действует на положение экстремума $\min \varphi(R)$ относительно предкритического неустойчивого репеллера R_2^* . Важно свойство проекций точек экстремумов зависимости локального максимума и минимума: $\varphi(R_{max}) > R_{min}$, максимум отображается по абсцисс всегда правее, чем отображение минимума.

Реализуем основной имитирующий коллапс метаморфоз фазового портрета следующим образом: вызовем пограничный кризис интервального аттрактора, который остается после слияния устойчивого и неустойчивого равновесий. Эффект происходит при соприкосновении Λ с границей его области притяжения.

Определим для сценария исходную ситуацию, когда окрестность локального максимума, где значение 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:

$$R_0 \in (R_1^*, R_3^*) \cap \{\varphi^{-n}(R_2^*)\},$$

тогда через режим псевдостochasticких флуктуаций популяция краба достигнет уровня высокой устойчивой численности за конечное число шагов:

$$\varphi^{\vartheta}(R_0) = R_4^*, \vartheta < \infty.$$

Устойчивость точки $\varphi(R^*)=R^*$ итерации можно оценить по положению касательной из известного критерия устойчивости $|\varphi'(R^*)| < 1$. Множество точек-прообразов у второго репеллера R_2^* обозначим $\{\varphi^{-n}(R_2^*)\}$. Эти прообразы исключены из области притяжения, и они никогда не притягивают-

ся к аттракторам. Если для R_2^* есть прямые прообразы и справа и слева от точки, это делает несвязной Ω_2 – область притяжения R_4^* . Репеллер R_2^* существует во всех модельных сценариях и имеет прообразы и справа и слева $\forall n$. Точки R_3^*, R_4^* исчезают после обратной касательной бифуркации. Равновесие R_1^* у φ существует $\forall n$, но наличие прообраза у репеллера R_1^* зависит от значений триггера Ψ .

В исходной заданной начальной ситуации имеем следующее положение:

1) в окрестности максимума полученная численным решением зависимость модели превосходит третье равновесие:

$$\varphi(\max \varphi(N(0)) \pm \varepsilon) > R_3^*.$$

2) исходное состояние популяции R_0 соответствует диапазону:

$$R_0 \in (R_1^*, R_3^*) \cap \{\varphi^{-n}(R_2^*)\}.$$

В первой стадии вычислительного эксперимента через ряд аperiodических флуктуаций достигается состояние стабильности запаса R_4^* . Составим набор параметров вычислительного эксперимента для ситуации, когда промысловая популяция краба после нестабильного существования восстановилась – до устойчивого равновесия и оптимального для своей кормовой базы. Используем модельный сезон из 12 модельных месяцев. Уловы краба $Y_n = R_n q_n$ без форсирования промысла увеличиваются. После спонтанного роста $Y \rightarrow \max$ эксперты принимают обоснованное по их логике 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. Сезонные уловы $Y_n = R_n q_n$ образовали неравномерно убывающую последовательность: $Y_{n-2} < Y_{n-1} \ll Y_n$. Объемы промысловых запасов краба минуют локальный минимум кривой воспроизводства φ , избегая попадания в ε -окрестность R_1^* критического состояния. Эксперты видят стабилизацию, так как привыкли усреднять Y_n .

Согласно обсуждавшейся в главе 3 общепринятой статистической методике, прогнозы ЛПР в этом сценарии учли хорошую эффективность воспроизводства в предыдущие 5 лет. Уловы после первого падения достоверно начинают возвращать былые объемы. У экспертов нет причин для корректировки управления промыслом для снижения q . Число сезонов роста величины уловов Y после минимума волатильно. Величина запаса после усиления промыслового 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. Решение о минимизации доли изъятия до $q=0.14$ после интенсивных колебаний отвергается. Установив $q=0.3$ после прохождения минимума в сценарии. В результате на рис. 5.13 видим безвозвратное падение уловов.

Таким образом математическими методами на основе сравнительного анализа реального развития ситуаций реализован исследуемый вариант коллапса после хаотических флуктуаций.

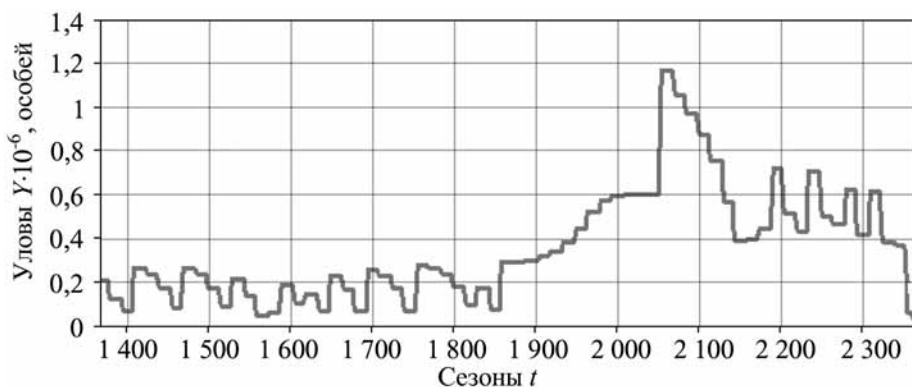


Рис. 5. 13. Динамика уловов в имитационного сценарии коллапса с аperiodическим режимом флуктуаций

Финальное сокращение численности промыслового запаса получило название «коллапса». На первое сокращение уловов краба мало обращали внимание, хотя в процентном выражении первое падение уловов больше. При первом кризисе уловы резко сократились в 3.6 раза, что не повлекло сезонный мораторий на промысел. Промысел был продолжен при нестабильных флуктуациях с неизменным промысловым давлением 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 полученная в модели функция, связывающая исходный запас и новое поколение «пополнение» негладкая, но ступенчатая.

Моделирование показало, что путь к финальному кризису состоит из переходных режимов. В вычислительном эксперименте сценарий коллапса промысловых запасов камчатского краба в 1985–86-х гг. развивается из двух фаз, и их продолжительность зависит от повышения при интенсификации рыболовства. Если не введен своевременный мораторий, вторая фаза деградации произойдет решительным образом через 11 модельных сезонов в формате времени вычислительной среды с переходом через порог критического неустойчивого равновесия. В полученном сценарии воспроизводство популяции после фазы деградации не восполняет естественную убыль родильских поколений.

Кривая падения численности имеет точку, после которой деградация запасов из плавной становится необратимой. Сценарии модели коллапса запасов атлантической трески, краба у берегов Аляски и осетровых рыб Каспия подтверждают, что цели организации оптимальной, наиболее выгодной стратегии эксплуатации биоресурсов в реальности и необоснованны, и опасны. Продолжительность колебаний зависит от положения минимума кривой. Когда происходит сдвиг $\varphi(R_{\min}) < R_1^*$, то

реализуется кризис соприкосновения с собственной границей $\partial\Omega$ области притяжения для интервального аттрактора. Если $R_0 < R_1^* - \varepsilon$ и начальная точка не совпадает с множеством прообразов точек-репеллеров, то реализуется необратимая деградация в форме состояния:

$$R_0 \notin \{ \varphi^{-n}(R_2^*) \} \cup \{ \varphi^{-n}(R_3^*) \}, \varphi^n(R_0) \rightarrow 0.$$

В экологической интерпретации результатов полученный имитационный сценарий с такими свойствами означает гибель локальной популяции.

5.6.8. Характеристики инвариантных множеств траектории в сценарии коллапса

Полученный в имитационных вычислительных экспериментах аperiодический режим вызван несвязным характером области притяжения аттрактора R_4^* . Область не включает несчетное множество не притягивающихся к аттрактору прообразов у двух неустойчивых точек: $\{ \varphi^{-n}(R_2^*) \} \cup \{ \varphi^{-n}(R_3^*) \}$.

Свойства нерегулярных колебаний точек дискретной составляющей траектории, порождаемых итерацией начального состояния $\varphi^n(R_0)$ это следствие формы кривой с тремя экстремумами и нестабильности получаемых при расчетах промежуточных результатов при разном положении начальной точки траектории R_0 связан с изрешеченной областью I в фазовом 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, «странный репеллер» – инвариантное замкнутое множество не притягивающихся к аттракторам точек, в каждой ε -окрестности такой точки x_r существует точка x_u , которая притягивается к существующему аттрактору:

$$\exists x_u, x_u \in [x_r - \varepsilon, x_r + \varepsilon], \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(x_u) = R_4^*.$$

Границы области I определяют отображения точек $R_{min} > R_{max}$, что интервал будет $I = [\varphi(R_{min}), \varphi(R_{max})]$ между образов 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 никогда не притягивающимися к R_4^* . Из интервала I исключены объединение множеств тех точек R_0 , что под действием итераций φ отображаются в неустойчивые репеллерные положения равновесия. Если неустойчивые стационарные точки на графике зависимости эффективности пополнения φ имеют более одного прямого прообраза, такой точки R_2^{1*} которая при первой итерации отобразится в репеллер $\varphi(R_2^{1*tr}) = R_2^*$. Тогда

возникает аperiodический режим. В форме $\varphi^{-1}(R_2^*) = R_2^{-1*r}$ 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 списка теоремы Гугенхэймера этот топологический тип ω -предельных множеств итераций № III 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:

$$\{\varphi^{-n}(R_2^{-1*r}), \varphi^{-n}(R_2^{-1*l})\}.$$

Подмножество «странного» репеллера составит все объединение рассеянных в I точек R_0 «без притяжения» к любому аттрактору:

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

Траектории начальной точки $\{\varphi^n(R_0)\}$, $R_0 \notin \{\varphi^{-n}(R_2^*)\}$ обладает возможностью 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 условий:

$$\exists R_0, R_0 \in I, R_0 \notin Y \text{ и } \varphi(R_0) < R_1^*$$

уже интервалы в Λ не будут более замкнутым и инвариантным подмножеством, где выполняется условие $\varphi(\Lambda) \in \Lambda$. При попадании траектории в I хаотическое движение в конечном числе итераций $\varphi^k, 0 < k < \infty$ наблюдаем с одним вариантом финала для режима хаотизации:

$$\lim_{n \rightarrow d} \varphi^n(R_0) = 0, k < d < \infty.$$

5.7. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАПАСОВ С ПОРОГОВЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

Таким образом, с использованием разработанного метода представления предикативно-переопределяемой модельной структуры для расчета динамики численности поколений и формализованных правил регуляции удалось описать характер развития нескольких актуальных вариантов практически важных сценариев кризисных популяционных процессов. Анализ возникавших разных ситуаций в модели коллапсов, согласно развиваемой методологии, проводим исходя из реально использовавшейся логики оценки ситуации ЛПР, принципах регулирования и существующей мотивации действий при различной экодинамике популяции. Выбранный метод анализа позволяет установить типичные причины кризисов и признаки подобных ситуаций.

В развитии технологии применения разработанной методики анализа популяционных процессов в серии сравнительных модельных сценариев с учетом регулируемого антропогенного воздействия в нашей работе современная теория нелинейной динамики дискретных неунимодальных отображений непосредственно переклассифицируется с проблемами биокibernетики.

Сценарии с вариантами развития параметрически заданной ситуации удалось построить, так как в главе 3 был проведен формализованный сравнительный анализ для ряда реальных экологических ситуаций кризисов, возникающих для разных промысловых запасов при их интенсивном использовании. Сценарий коллапса краба подтвердил гипотезу о том, какие именно нелинейные эффекты необходимы, а каких нужно избегать в моделях биосистем, как сценария хаотизации М. Фейгенбаума. Автор предложил для описания апериодической динамики другой метод, не имеющий противоречий с наблюдениями и главное не требующий увеличения репродуктивного параметра.

Рассматривая данные наблюдений за динамикой испытывающих воздействие популяций с точки зрения теории бифуркаций, нам удалось установить именно важные внутренние закономерности изменений, которым подчиняются процессы в жизненном цикле биосистем – трансформации между стабильными и переходными режимами изменения состояния популяций. Некоторые из важнейших изменений, в том числе связанные с реакцией популяций на воздействие, совершаются при достижении пороговых состояний для биосистем, которые не прогнозируются по статистическим данным, полученным при наблюдении биосистемы в её прошлом стабильном состоянии.

Разработанный метод анализа сценарных моделей представляет возможность совершенствования формализации заданных для сценария с правилами принятия решений по регуляции эксплуатации запасов. Интересным вариантом для сравнения развития ситуаций станет включение аспекта неопределённости при регуляции, где некоторое решение будет приниматься с рассчитываемой вероятностью, которая зависит от предшествующих решений.

Аспект субъективной мотивации при принятии решений о квотах вылова, в том числе и различной степени личной заинтересованности, тоже

можно включать в логику сценариев развития ситуации, когда никакими другими мотивами объяснить принятия именно таких решений не получается. При подобном регулировании на основе обоснований тренда развития ситуации на основе видения позитивных или негативных факторов и статистики о прошлых состояниях процесса возникает аспект «рефлексирующего управления» [282] (рефлексия – форма теоретической деятельности человека, направленная на осмысление им своих же собственных решений). В контексте регулируемой эксплуатации по прогнозам о воспроизводстве явление можно назвать одной из форм введения самого себя в заблуждение. Проявляется при принятии решений ориентирование в оценках текущего состояния объекта на наиболее желательный результат в дальнейшем, проецирование собственных ожиданий на прогноз. В последующем отмечается нежелание резко изменять стратегию регуляции, расцениваемое как факт признания неверности своих изначальных выводов. Обсуждению перспективных подходов к математическому моделированию рефлексивной составляющей в экспертном управлении процессами посвящена монография [283] Новикова Д.А. и Чхартишвили А.Г. Авторы рассмотрели рефлексивные кооперативные игры, описывающие взаимодействие групп конкурирующих агентов, принимающих решения на основании иерархии их представлений и целей, стремясь максимизировать каждый свой выигрыш.

С использованием моделей, представленных в имитационных сценариях, нами было показано, что особенности кривых воспроизводства влекут и качественные отличия динамики сокращения запасов при усилении промыслового воздействия. Более того, наличие дополнительных экстремумов и различное положение неустойчивых равновесий влияют на принятие решений при управлении эксплуатацией биоресурсов. Стремительные коллапсы в таких сценариях являются логичным следствием возникновения нелинейного характера эффективности восполнения биоресурсов. Потому при прогнозировании эксперты не имеют точной информации, какую именно долю от промыслового запаса будет составлять в дальнейшем разрешенная к вылову квота в абсолютных единицах. В результате мы продемонстрировали динамику ситуаций, когда не представляется возможным разработать стратегию оптимальной эксплуатации без риска развития итогового коллапса запасов.

5.7.1. Прогностические возможности сценариев в нелинейной динамике с бистабильной траекторией

Сценарное моделирование, позволяющее сравнивать и оценивать варианты ситуаций, это актуальный подход при регулировании многовидового промысла, что отмечено многими специалистами как в [284]. При этом все сравниваемые сценарии развития некоторой *исходной ситуации* должны базироваться на некотором определенном вычислительном аппарате. Свойства выбранного математического аппарата определяют прогностические возможности сценариев. Часто такое сценарное исследование может оказаться очевидным заранее из-за математических свойств (например, мы на

графиках расчетов увидим просто последствия известного пути хаотизации поведения «route to chaos») и мы можем это понять и без вычислительного анализа. Удовлетворяющие некоторым критериям (теоремы Синжера) разные модели ведут себя качественно одинаково.

Более того, выбор аппарата с незначительными на первый взгляд различиями непосредственно способен повлиять именно на качественный уровень принимаемых решений. В рассматриваемом случае анализа регулируемой экодинамики влияет форма зависимостей в эффективности воспроизводства, где важно наличие даже слабо выраженного локального экстремума. Важные качественные различия режимов поведения для итерационных моделей определяются тем: один или два, или более экстремума имеет зависимость, три или четыре стационарные точки появляются у кривой. Данные аспекты учитывает разработанный нами метод построения вычислительной структуры и анализа дискретной составляющей траектории. Для частного сценария автор может определить нужные свойства получаемой функции и подобрать необходимые структурные элементы гибридной модели и настроить параметры.

Математической основой наших сценариев кризиса станут метаморфозы фазового портрета функциональных итераций. Данные нелинейные явления изменения числа стационарных точек будут вызваны трансформацией положения экстремумов у получаемой при численном решении гибридной системы зависимости, отражающей эффективность воспроизводства (число полученных половозрелых особей на одну исходную нерестующую самку) через выживаемость поколений.

Для задачи модельного анализа необходимо получить необходимые свойства зависимости выживаемости поколения от исходной численности родительского запаса, которые являются нетривиальными и ранее не были получены и использованы для описания резких изменений в популяционной динамике. Более того, данные свойства (взаимные расположения на графике кривой экстремумов и стационарных устойчивых и неустойчивых точек) модельной зависимости должны быть трансформируемыми при изменении переменных характеристик модели, отражающих текущее состояние популяции и, прежде всего, скорость восполнения биоресурсов, которое нелинейно зависит от состояния запаса.

Для регуляции реальных популяционных процессов полученные результаты подтверждают сложности в определении зависимости по данным мониторинга. Положение неустойчивых равновесий может сдвигаться по абсциссе и значение функции в точках экстремумов изменяются в зависимости от степени воздействия эффекта агрегированной группы, ответственного за пороговый эффект. Зависимость под воздействием оказывается не статичной, но динамически трансформируемой, но эти динамические перестроения могут быть предсказуемы, так как описываются разработанными модельными сценариями. Разработанный нами метод построения структуры гибридной модели с включением триггерных функционалов позволяет получить трансформации зависимости при изменении воздействия на популяцию наглядно и предсказуемо.

5.8. РЕФЛЕКСИЯ И МОТИВАЦИЯ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ О РЕГУЛЯЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БИОРЕСУРСОВ В СЦЕНАРНЫХ МОДЕЛЯХ

Концепция моделирования сценариев развития заданной ситуации предполагает анализ при изменении воздействия. Включенные изменения основываются в реальности природопользования на некоторых специфических принципах принятия решений. Данные принципы в нашем методе формализуются логическими правилами для данного сценария, который можно сравнивать с альтернативными. В разработанном методе последовательность изменений воздействия и оценки их последствий важнейший инструмент анализа ситуаций, так как метод позволит рассмотреть вариабельность принципов регулирования эксплуатации биоресурсов, включив различную мотивационную составляющую поведения ЛПР в сложных ситуациях. Акцент на вариативности выбора решений отличает метод от других подходов к моделированию последствий промысла, так мы учитываем, что эксперт действует в условиях неопределенности понимания сложившейся ситуации и исходя из оценок состояния биологического объекта, в том числе прогнозистических: после применения установленного воздействия.

Для задачи многокритериальной оптимизации и теории принятия оптимальных решений задача организации эксплуатации водных биоресурсов может казаться тривиальной проблемой, так как основные сведения составляет предполагаемая биомасса промыслового запаса SSB и оценка численности популяции с возрастным распределением по составляющим поколениям, что не актуально для короткоцикловых видов, но важно для трески и осетровых видов.

Полученные оценки численности (или биомассы) по возрастным группам сравниваются с предшествующими. Далее основная сложность: проводится оценка репродуктивного потенциала, – способности к восстановлению убыли при некоторых складывающихся природных условиях – факторах среды. При стремительной деградации (коллапсе), как показано ранее на примерах, биоресурсы резко теряют способность к самовосстановлению. При коллапсе статистические оценки репродуктивного потенциала, на основе которых ранее действовали эксперты и ЛПР, становятся неприменимыми для прогнозов.

5.8.1. Альтернативные принципы регуляции природопользования

Регулирование в области природопользования в современных условиях развития международных организаций все более строится на компромиссных решениях. В идеальном варианте стратегия регулирования должна строиться на цели достижения баланса между экономическими интересами отрасли и сохранения способности биоресурсов к самостоятельному восстановлению.

Цель регулирования в современных условиях – избежать необратимой деградации биоресурсов. Регуляция в контексте «менеджмента биоресурсов» – это набор ограничений и запретов на основе мониторинга. При обо-

сновании ограничения для эксплуатации биоресурсов ужесточаются или ослабляются, если трактовка экспертами развития наблюдаемой экологической ситуации дана как тренд улучшения состояния. Однако, решения на ужесточение ограничений часто запаздывают, а на ослабление принимаются быстро и преждевременно.

Ключевое понятие традиционной теории принятия решений «альтернативы» и их интегральной оценки по шкале набора критериев плохо применимы к рассматриваемой проблеме. В данной области речь идет об установлении ограничений для уровня воздействия на биологический объект, вплоть до полной вынужденной остановки, если ресурсы оказываются исчерпаны. Мера моратория на промысел отдельное вынужденное и непопулярное решение, принимаемое на практике только перед очевидной угрозой деградации. В отечественной практике решение принимают чаще всего постфактум в ситуации очевидного коллапса.

Отметим важный аспект. У выделяемой квоты для вылова должен существовать некоторый порог рентабельности, зависящий от рыночной цены на данные биоресурсы, когда при малом объеме изъятия не оправдываются затраты на эксплуатацию судов. Нельзя позволять снижать издержки при эксплуатации.

В более общем случае задача регуляции предполагает выбор стратегии эксплуатации, когда становится необходимым рассматривать аспект о более дифференцированном распределении воздействия на популяцию. Средства регулирования при ведении регулируемой эксплуатации состоят в установлении некоторых дополнительных ограничений (размерных, гендерных) для объектов изъятия или возможностей добычи (разрешенного времени, параметров орудий лова). Согласно результатам проведенного системного анализа кризисных ситуаций квотирование по биомассе сейчас не гарантирует безопасность биоресурсов. Расширение спектра задействованных ограничений (помимо квоты – биомассы разрешенного вылова) способно предотвратить рассмотренные ситуации коллапсов, не позволяя изымать за сезон всю квоту, при ее существенной переоценке из-за уже начавшегося истощения запасов.

5.8.2. Ограничение влияния рефлексии при выработке регулирующих природопользования мер

В схожих ситуациях кризисной экодинамики уполномоченные организации принимали различные решения, и это объяснимо не только адекватностью получаемой информации, но и тем аспектом, что решения при природопользовании в значительной мере определены экономической мотивацией, довлеющей над ЛПР. В работе, как мы раньше отмечали, рассматриваем только административно регулируемое природопользование и его кризисы. Случаи истощения биоресурсов без включения нормирования эксплуатации не представляют интереса для научных методов организации природопользования и являются проявлением банальной алчности и недальновидности ЛПР. Основная проблема для ЛПР – оценка состояния биоресурсов и их репродуктивного потенциала.

Ситуацию с регулируемыми ими биоресурсами принимающие решение эксперты воспринимают не отстраненно, так как это уже состоявшиеся специалисты в данной области. ЛППР смотрят на сложившуюся ситуацию через осмысление последствий предыдущих своих решений для данного объекта и сходных других случаев. Способность быть исследователем своих умозаключений и принятых ранее решений относится к рефлексии человеческого мышления [285]. В частности, для рассматриваемой проблемы актуальна дилемма, когда предыдущий опыт успешного регулирования будет подсказывать, что сокращение запасов и падение уловов трески или краба уже случались ранее для данных биоресурсов после явного перелома. Признаки такого чрезмерного давления на популяцию специалистам тоже известны, но почему-то на такие признаки иногда ЛППР предпочитают не обращать внимание. Далее этот промежуточный спад ранее заканчивался относительным восстановлением. На основании такого опыта и непопулярное решение о моратории можно отложить.

Рефлексия при принятии решений – это не всегда положительный аспект при регуляции биосистемы, процессы в которой характеризуются нелинейными эффектами. В случае, если некоторый сценарий развития оказывается совершенно неожиданным для ЛППР и у принимающих решения лиц нет готовых объяснений и алгоритмов действий для данной вновь возникшей кризисной ситуации. При этом в методе анализа ситуаций полагаем, что устанавливающие регулирующие нормы эксперты оперируют рациональными логическими заключениями, а не интуитивными соображениями – так называемыми поведенческими эвристиками, в большинстве случаев, основанных на эфемерных ожиданиях.

Согласно проведенному нами исследованию известных поведенческих эвристик регуляции, следование правилам «удовлетворительного выбора» оказывается выгоднее в долгосрочной перспективе, чем попытки оптимизации выгоды. Причина ошибок – ситуации с высокой неопределенностью развития не полностью управляемого процесса, где решения подвержены рефлексии и вырабатываются заинтересованными участниками при принятии решений.

Из теории экономического поведения известно, что при принятии решения люди оперируют некоторыми наработанными шаблонами. Это разумно в ряде ситуаций экономит для ЛППР время выработки реакции [286]. Логично, что должны существовать некоторые перечислимые информационные критерии, служащие «спусковыми механизмами» для активизации данного поведенческого шаблона принятия решений. Аспект активации некоторого шаблона решений из набора возможных целесообразно реализовать программным дополнением к вычислительной модели. Сценарий формируется с набором алгоритмов условных операций (стандартные операторы ветвления языка Java в среде AnyLogic). В алгоритмическом модуле события изменения регуляции указываются на основе проверки логических функций, которые интерпретируют *оценки состояния* популяции по *некоторой методике* вместо рассчитываемых непосредственных значений численности поколений, так в реальности данные получают из отчетов промысловой статистики. В перечень аргументов у проверяемых предикатов должны входить

объемы уловов, средний возраст для многовозрастного промыслового запаса и предыдущая установленная доля изъятия. Реалистичный вариант при оценке ситуации, когда ЛПР будет считать, что если установленное изъятие уже близко к критической доле, то в такой ситуации ЛПР гораздо быстрее примет решение об уменьшении изъятия.

При этом в реальности принятие решений о мерах регулирования далеко не однозначно детерминировано логикой оценки наблюдаемой ситуации. Далеко не всегда ЛПР в природопользовании именно те эксперты, что непосредственно оценивали состояние популяции и характеристики темпа ее воспроизводства.

Предлагаемое для аспекта субъективности принимаемых решений уточнение метода организации модели состоит в использовании вероятностного установления измененной доли промыслового изъятия в сценарии в некоторый сезон. Вероятность принятия обоснованного обстановкой решения об ужесточении норм регуляции вплоть до моратория, соответственно $q=0$ будет последовательно увеличиваться в арифметической прогрессии при снижении эффективности воспроизводства в модельном сценарии коллапса.

Для оценки опыта экспертной регуляции интересен для организации сравнительных сценариев будет выявленный оппортунизм при принятии регулирующих природопользование мер – поведение ответственных субъектов, направленное достижение максимальной личной выгоды, с применением подтасовок реальной обстановки и использования заведомо некорректных методов оценки состояния биоресурсов. При преобладании оппортунистической мотивации ЛПР под различными предложениями уклоняются от очевидно необходимого ужесточения мер регуляции и остановки эксплуатации, хотя квалифицированные ЛПР уже не могут не осознавать нарастающего влияния негативных факторов на биоресурсы и признаков (сдвига влево максимума размерного и возрастного распределения в популяции, снижения возраста созревания, спектра питания и др.) скорого развития итогового коллапса.

Согласно проведенному обзору, часто проблемы с истощением биоресурсов происходили из-за повторяющихся попыток ЛПР достичь оптимального уровня изъятия. Наличие особого «оптимального» для промысла состояния популяции при максимальном приросте, который якобы можно изымать полностью, предсказывают модели логистического роста численности со свойством $\forall N(0) > 0 N(t) \rightarrow K$. В реальности при ограниченном наборе воздействия у регуляторов не имеется метода регулировать популяционные характеристики, если произошла ошибка в расчетах допустимого воздействия, то исправить последствия и восстановить популяцию с эффектом Олли при выполнении $N(0) < L$ оказывается чрезвычайно сложно, что показал коллапс трески. Коллапс промысловых запасов еще не означает гарантированного вымирания популяции:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = 0,$$

что уже предсказывает модель Базыкина, хотя сценарий полной гибели популяции безусловно возможен и наблюдался при комплексном антропоген-

ном воздействии на среду обитания. Популяция при такой форме коллапса теряет значение для промысла, но «промысловый запас» это только часть популяции.

Обоснован вывод, что уполномоченные организации в рассмотренных случаях коллапсов биоресурсов пользовались достаточно ограниченными и неполными средствами регулирования изъятия биомассы как непосредственное квотирование вылова, забывая об опосредованных механизмах и ограничениях.

5.9. АДАПТИВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Задачи и способы принятия решений по регуляции режима эксплуатации биоресурсов в свою очередь базируются на мотивации, задающей основные принципы. Главенствовавшим во второй половине XX века принципом организации эксплуатации являлся MSY с задачей максимизации прибыли от эксплуатации объекта промысла. Потребовались усилия экологов чтобы пересмотреть доминирование в сознании международных чиновников концепции MSY. Точного алгоритма концепция оптимизации не получила. Практика заставляет искать альтернативные методы регулирования воздействия помимо квотирования в поисках максимально допустимого возможного улова.

5.9.1. Сценарий с альтернативными мерами ограничения природопользования

Альтернативным для оптимизационного принципа многими авторами считается выработка алгоритмов регуляции для предосторожного подхода к природопользованию, что уже закреплено в ряде международных соглашений [287]. Принцип предосторожной регуляции включают с целью получения гарантированного приемлемого объема добычи, но не снижающего обилие популяции менее оговоренного значения. В наилучшей ожидаемой ситуации такая стратегия использования биоресурсов реализуется при неограниченном времени, но ограниченной возможностями воспроизводства биоресурсов прибыли, но которая может оправдывать затраты при росте цены на биоресурсы.

Принцип оптимизации дохода, как показывают примеры коллапса биоресурсов, связан с высоким риском полной остановки промысла и потери капиталовложений. Альтернативный «предосторожный» подход требует сохранения достаточного уровня численности половозрелой части популяции и не гарантирует рентабельности в силу естественной волатильности условий размножения. Подход не является панацеей, включающей риски коллапса и имеет сопутствующие недостатки: тормозит развитие новых технологий в отрасли и снижает инвестиционную ее привлекательность.

Разработанное представление иерархического времени и предикативно-переопределяемая структура базовой гибридной модели позволит рассмотреть и формализованные альтернативные принципы принятия регулирующих эксплуатационных решений. Событийные сценарии смогут оперировать алгоритмом изменения воздействия, который будет основан на состоянии моделируемой популяции и выбранной стратегии – например, поиска максимально возможного % изъятия при заданной форме зависимости «кривой воспроизводства».

«Регулирование воздействия» более точный термин для исследуемой ситуации квотируемого промысла, чем «управление запасом», так как трудно считать популяцию в реальной конкурентной среде и эволюционирующую в нестабильном окружении «управляемым объектом» по классической теории. Регуляция природопользования имеет длительную историю. Ограничения на изъятие не вынужденная мера XX века. Люди, живущие за счет биоресурсов, давно пришли к пониманию необходимости ограничений. Самая исторически первая форма ограничений природопользования – сакрализация некоторых природных территорий, распространенная у коренных жителей Северной Америки. Индейцы соблюдали племенные табу на места охоты, которые можно считать первыми правилами регуляции. Заповедные рощи и священные озера, где нельзя ловить рыбу и охотиться, известны и из практики античных государств. Древние боги насылали кары и страшные болезни на нарушителей запретов. У современных регуляторов в арсенале кар совсем не такие грозные штрафы.

Опыт показывает, что введение свободных от промысла акваторий вполне может быть эффективной мерой сбережения морских биоресурсов, способствующей поддержанию необходимого уровня воспроизводства, лучше, чем не оправдавшая себя по причине упомянутых выше случаев коллапсов квотирование объемов изъятия. Квотирование требует строго контроля и часто квоты нарушаются. Современные средства позиционирования (GPS) позволяют проводить разграничение доступной судам и запрещенной для лова акватории.

5.9.2. Роль адаптации биосистем к чрезмерному воздействию в последствиях коллапса

Регуляторы не имеют механизмов в достаточной степени повлиять на эволюционно сформированные характеристики живых адаптивных систем, чтобы обеспечить их управляемость в должной мере на длительном отрезке времени. Более того, экспертам часто точно не известен реальный уровень того воздействия (действительный % изъятия из нерестовой части популяции), который испытывает популяция в результате длительного промысла.

Биосистемы адаптируются к воздействию по внутренним принципам, которые почти всегда невыгодны для эксплуатации. Например, в результате селективного чрезмерного изъятия в популяции крупных рыб, как треска и осетровые Каспия, начинают преобладать «тугорослые», но быстро созревающие особи с повышенной посленерестовой смертностью. Эти из-

менения размерно-возрастной структуры один из известных ихтиологам признаков истощения запаса и явления «перелова». У промысла селективная компонента – изымает наиболее крупных и быстрорастущих особей, что логично, так как для многих видов определены промысловые размеры. В результате преимущество при размножении получают «тугорослые», но быстро созревающие формы. Это ведет к развитию «короткоцикловости», измельчанию, посленерестовой смертности, потере коммерческой ценности и привычных товарных характеристик особей.

Зная принципы регуляции воспроизводства и теоремы динамики нелинейных функциональных итераций (о критериях возникновения бифуркаций, устойчивости равновесий и сосуществовании циклов), мы можем провести «историческую реконструкцию» формы и характерных особенностей зависимости запаса и пополнения популяции. Зависимость выполняет роль оператора эволюции для движения траектории динамической системы, отражающей состояние нерестового запаса популяции (не молоди) при наличии внешнего регулируемого возмущения – в данном случае промысла.

Исходя из выделенных нами систематически повторяющихся динамических аспектов в проанализированных ситуациях быстрых кризисов промысловых популяций можно сделать заключение о связанной последовательности событий. Исследуемый процесс состоит из нескольких продолжительных этапов, определенных реакцией популяции на воздействие. Не имеет смысла моделировать только итоговое событие коллапса запасов, это завершающая стадия регулируемого процесса, который можно сравнить с развитием длительного летального заболевания. С каждым из выделяемых этапов в модельном сценарии должны быть связаны нелинейные эффекты, отражающие *средствами дискретных динамических систем* наблюдаемые популяционные изменения. Это эффекты, которые мы относим к *описательным возможностям*.

Резких сокращений объема уловов во всех рассмотренных кризисных ситуациях происходит как минимум два с длительным интервалом времени между этими событиями. Эксперты по организации промысла рассматривают обычно текущую обстановку. Они подробно документируют финальное сокращение запасов трески как коллапс, но мало уделяют внимания событиям за 10–17 лет до события коллапса. Логично представить, что именно первое избыточное изъятие «первичный перелов» разрушает устойчивое состояние популяции, отражаемое в динамических системах замкнутым притягивающим множеством траектории для некоторой ограниченной подобласти начальных состояний. Математическим языком популяция далее пребывает в окрестности неустойчивых многообразий. Переходные режимы существования популяции между кризисами в рассмотренных нами ситуациях отличались, возможна временная стабилизация, либо флотационные режимы.

Математически такой прерывистый ход событий выражается тем, что существовавшее ранее множество теряет свойства аттрактора, происходит некоторый метаморфоз топологической структуры фазового портрета и аттрактор разрушается. Однако одной трансформации фазового портрета оказывается для описания такой ситуации недостаточным.

Колебательный вариант изменений говорит от том, что должен возникнуть иной некоторый сложный режим существования, сложнее чем точка-репеллер. Следовательно, модельных сценариев коллапса нам необходимо рассмотреть минимум два варианта. Популяция переходит непосредственно к состоянию окончательной деградации далеко не сразу, так живая система имеет некоторый резерв адаптации, например, в случае трески Атлантики более раннего созревания и итоговому преобладанию тугорослых короткоцикловых форм.

Задача моделирования кризисов отличается от задач оптимизации эксплуатации тем, что требует анализа не устойчивых предельных множеств динамических систем, но исследования переходных режимов и неустойчивых инвариантных многообразий в фазовом пространстве.

Классическая теория оптимального регулирования не рассматривала такой аспект как мотивация или заинтересованность при принятии управляющих решений, например, необходимость возвращать банковские кредиты, потраченные на модернизацию промыслового флота. Эксплуатация биоресурсов и рыбный промысел – это хозяйственная деятельность, направленная на получение прибыли, для общества – это создание рабочих мест. В погоне за обогащением и под влиянием текущих экономических условий люди и конъюнктуры рынка, даже обладая знаниями, достаточно часто склонны принимать далеко не оптимальные в долгосрочной перспективе решения. Для противодействия факторам стремления к максимизации текущей прибыли создаются регулирующие промысел независимые международные организации. Проблема рационального использования биоресурсов не сможет быть разрешена только научными методами без гибких методов экономического регулирования.

Сценарии развития ситуаций, ведущих к промысловой деградации популяций в форме коллапса должны включать логику принятия решений, регулирующих уровень промыслового изъятия. Принятие решения проводится экспертами, и данный аспект связан с такой дополнительной субъективной особенностью как мотивация при принятии решений. Выбранная мотивация на текущий сиюминутный экономический эффект способна перечеркнуть все собранные данные наблюдений и рациональные стратегии эксплуатации. Экономическая мотивация стала основной причиной в рассмотренной нами ранее ситуации деградации запасов каспийских осетровых, при непринятии очевидных административных мер по полному запрету промысла, так как исход ситуации при любом продолжении промысла был понятен большинству специалистов.

5.10. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ КОЛЛАПСОВ БИОРЕСУРСОВ ПРИ ЭКСПЕРТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ПРОМЫСЛА

Динамический эффект популяционной динамики «Коллапс» мы определили как особый вариант явления стремительной промысловой деградации популяций в заключительной стадии и реализующийся при регули-

руемом с целью максимизации долговременной экономической выгоды от использования биологического объекта. В работе анализированы в сценарных моделях именно особые варианты развития промыслового истощения биоресурсов. Ситуации нерегулируемого на научной основе и заведомого хищнического браконьерского истребления популяций не рассматриваем как модели коллапса, это тривиальные случаи для системного анализа. Ситуации коллапсов при промысле «многовозрастного запаса» не становятся повсеместным явлением, но и не являются уникальными событиями. Для понимания механизмов развития кризисов и для выработки рекомендаций по их предотвращению важна общность аспектов динамики у популяций разных по своему месту в трофической цепи.

5.10.1. Выводы о причинах и факторах развития сценария коллапса биоресурсов

Развитие кризисной ситуации с флуктуационной составляющей экодинамики принципиально сложнее для ЛППР при регуляции эксплуатации биоресурсов и с точки зрения адекватной оценки происходящих процессов и времени для принятия решений, чем при явлении псевдостабильности запасов в окрестности неустойчивого равновесия. Как показали альтернативные модельные сценарии, в случае коллапса популяции трески Канады и при деградации запасов осетровых рыб Каспийского моря у регуляторов было необходимое время чтобы ослабить воздействия, вовремя ужесточить квотирование при признаках истощения запасов, включить иные ограничительные меры для рыболовства. Ответственные за режим промысла и квотирование регуляторы вовремя не воспользовались возможностями и не отвратили пагубные для экономики последствия кризисов в биосистеме, часто ориентируясь на заведомо неверные оценки состояния биоресурсов, например, полученные при аппроксимации случайного вылова отдельных рыб в прибрежном квадрате на всю акваторию Каспия. Динамика ситуации с промыслом камчатского краба в водах Аляски отличалась значительно переменчивыми трендами от других кризисных сценариев.

5.10.2. Роль квазиоптимального уровня эксплуатации в механизмах развития сценария коллапса биоресурсов

В результате проведенного сравнительного анализа данных наблюдений эффектов популяционного кризиса есть все основания утверждать, что данное развитие ситуаций до резкой деградации промысловых популяций оказывается *систематическим исходом* процесса, регулируемого по принципам оптимизации экономической выгоды и в результате реализующего эксплуатацию с уровнем изъятия, который мы определили ранее как квазиоптимальное. В результате применения данного воздействия получают достаточно долгое время высокий доход, но в данном режиме состояние популяции находится в окрестности неустойчивого равновесия и без флуктуационных режимов. В развитии ситуации регулирующие на основе стати-

стики промыслового учета ЛПП на практике (что следует из описываемых реальных ситуаций) не смогли вовремя оценить аспект приближения к пороговому состоянию. Определяющие воздействие ЛПП оценивали ситуацию по предыдущим изменениям, которые закончились успешно и сделали вывод о стабильности запасов при данном уровне изъятия.

Согласно полученным результатам моделирования, популяция при ведении квазиоптимальной эксплуатации способна поддерживать высокий уровень изъятия некоторое и даже значительное время. Во время этого этапа наблюдатели будут считать регулируемый ими запас вполне стабильным. Проблема в том, что далее промысел внезапно сталкивается с окончательным истощением биоресурсов и по применяемым методикам оценки не удастся это предвидеть.

Согласно выполненному анализу модельных сценариев, ключевым становится мотивация при принятии решений нацеленная на максимизацию – желание получить еще больше от уже достаточно интенсивно эксплуатируемого запаса. Как показано в проведенных вычислительных экспериментах с внешним воздействием, регулируемым по имитирующему принципам принятия решения алгоритму, превышение допустимого уровня для итогового коллапса может быть незначительным в процентах для применяемых методик оценки запасов.

Важнейший отмеченный аспект – погрешность при установлении квот на вылов сохраняет систематически повторяющийся характер. В таком случае у регуляторов нет экономической мотивации уменьшать изъятие, если даже отмечено превышение квоты, считается малым.

Основная практическая новизна проведенных имитационных вычислительных экспериментов – по сценарию деградация легко предотвратима в режиме псевдостабильности. Достаточно снизить долю изъятия в пределах 5%, если наблюдается после стабилизации сезонное падение уловов превысило более 5% (нужно учитывать погрешность применяемых методов учета, потому оперировать долями процента не имеет практического смысла).

В реальности необходимые решения оказывались в рассмотренных случаях достаточно сложно принимаемы для ЛПП, если вызывали некоторые экономические неудобства в виде потери добывающими предприятиями части ожидаемой прибыли. Регуляция эксплуатации по своей сути нахождение компромисса между целями природопользования и требованиями природоохраны. Оптимизационная стратегия изъятия по отмеченным выше нами причинам гарантированно обеспечивает риск коллапса, соответственно, экономического краха промысла. В настоящее время регулирующие промысел международные организации в большей мере осознают риск, чем до 1992 г.

5.10.3. Общность динамических аспектов коллапса для биоресурсов с разной возрастной структурой

Интерес для анализа сценариев представляют типичные случаи с выбором стратегии регуляции изъятия, так как важна именно логика принятия

решений на основе оценок состояния биоресурсов. В ситуации трескового кризиса специалисты не пришли к консенсусу о ключевых причинах, но подтвердили факт завышения оценки численности запаса. Ситуации коллапса разделяются нами на сценарий с флуктуациями и случай с псевдостабильностью. Поведение после коллапса тоже отличается и зависит от дополнительных факторов.

Каждую ситуацию длительной деградации популяции требуется при анализе факторов рассматривать отдельно и по экологическим, и по динамическим аспектам. В результате удалось выявить ряд других интересных ситуаций коллапса со схожими признаками динамики и несколькими стадиями, но биологических видов с коротким циклом, например, как перуанский анчоус *Engraulis ringens*.

Коллапс в 1982 г. [288] самой многочисленной в мире промысловой рыбной популяции – перуанского анчоуса *Engraulis ringens* тоже происходил с двумя этапами падения уловов рис. 3.19. После первого чрезмерного вылова далее уловы немного восстановились вплоть до внезапного коллапса. Это промежуточное восстановление не было таким длительным как у осетровых рыб Каспия, но сравнимо с динамикой промысла трески. Коллапс анчоуса укладывается в приведенный выше сценарий сметы стадий развития кризиса.

Уловы самой вылавливаемой рыбы в мире падали и быстро восстанавливались несколько раз, но в результате серии кризисов и восстановлений с рекордных 13 млн тонн в 1971 г. уловы анчоуса сократились до 1,1 млн тонн к 2015 г. Данный сценарий на рис. 5.14 выглядит многоэтапным промысловым истощением анчоуса при серии коллапсов. До коллапса трески 1992 г. считалось, что резким кризисам подвержены уязвимые короткоцикловые виды в большей мере, чем массовые крупные хищники – у них нет череды резервных поколений, еще не вступивших в промысловый возраст.

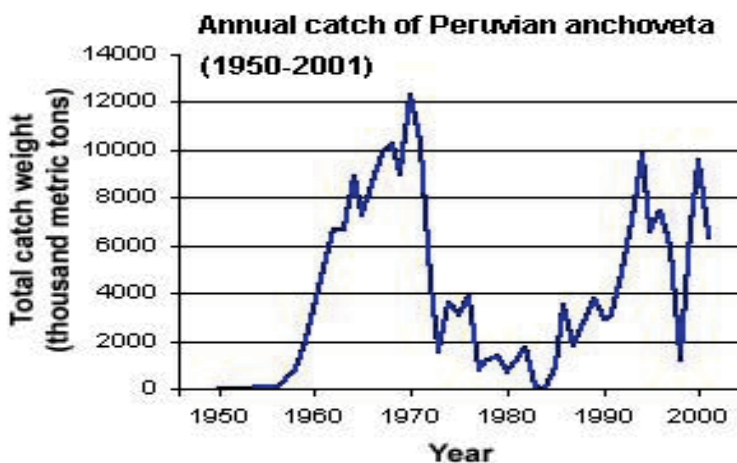


Рис. 5.14. Динамика коллапса и восстановления запасов анчоуса по данным уловов у берегов Перу [288]

Принципиально отличается в сценарии кризиса у берегов Перу только стадия относительно быстрого восстановления запасов (но неполной их регенерации). Это объяснимо для созревающих быстро короткоцикловых рыб.

Сравнительный анализ модельных сценариев и данных показывает, что развитие коллапса – это явление закономерное в условиях действия нелинейной регуляции воспроизводства эксплуатируемых разных по своей экологии и длительности жизненного цикла промысловых популяций и зависимости в эффективности воспроизводства этих биоресурсов (пороговых эффектов и наличие нескольких экстремумов у зависимости «кривой воспроизводства»). Причины подобных систематических кризисных явлений в промысловой ихтиологии нереалистично объяснять внезапным стохастическим действием негативных факторов среды. Так как показано, что для ряда очень разных запасов прослеживаются очевидные сходства динамики развития ситуаций после увеличения разрешенной доли изъятия, что говорит об общности их механизмов.

Деградация биоресурсов или даже вымирание локальных популяций могут происходить по многим другим причинам помимо промысла, (разрушение среды размножения, исчерпания ресурсов, эпизоотии и др.). Многообразие демографических кризисов и их причин выходит за рамки одного исследования.

Общность механизмов нелинейной регуляции в биосистемах шире, чем проблемы природопользования. В биологических процессах можно отметить динамически схожие явления со сценариями коллапса в результате противоборства. Например, кризисные явления развиваются в результате долгого противоборства иммунитета организма и мутирующего патогена – при вялотекущих вирусных инфекциях, когда после первичной острой стадии развивается длительное хроническое заболевание в организме, но в итоге заканчивается терминальной стадией с резким ростом концентрации вирионов. При этом гибель организма означает и гибель разрушившего его патогена, а этот экстремальный сценарий заканчивается коллапсом противоборствующих сторон.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

В главе 5 нами развивалась технология применения разработанного метода представления гибридных моделей на основе алгоритмической реализации логически переопределяемой вычислительной структуры в инструментальной среде для анализа реальных актуальных ситуаций в экодинамике. Системный анализ как концептуальное научное направление предполагает в первую очередь исследование взаимодействия факторов и, прежде всего, причинно-следственных связей в развитии ряда ситуаций и поиск закономерностей их развития. Исходя из полученных представлений проводится моделирование развития ситуаций. В трактовку развития заданной ситуации нами включаются помимо набора параметров дополнительно последовательность событий, связанных с

регулируемым воздействием. В методике системного анализа наш разработанный математический аппарат подстраивается под необходимость получения некоторых необходимых нелинейных эффектов. Анализ сравниваемых имитационных сценариях имеет принципиальные отличия от традиционного метода математического моделирования, где основным результатом является непосредственно динамическая модель с исследованием ее решений в зависимости от начальных условий и вектора управляющих воздействий с дальнейшими попытками отождествления решения с реальными наблюдениями. Исследование при помощи только математического моделирования природного объекта обычно не интересуется многими актуальными для природопользования вопросами: по каким выбранным критериям было изменено управляющее воздействие и почему именно в данный момент времени. Лицо принимающее решение (в РФ функции регулятора возложены на ведомственные экспертные комиссии согласно закону № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе») об изменении воздействия исходит из полученной оценки складывающейся ситуации и ожиданий ее дальнейших изменений, ухудшения/улучшения ситуации по некоторым признакам.

В главе 5 были рассмотрены ситуации, неожиданно возникшие при регулировании эксплуатации ценных биоресурсов как треска Севера Атлантики и камчатский краб. Отдельное внимание уделено корректному биологическому обоснованию построения системы уравнений для численности поколений, формированию начальных условий, и экологической интерпретируемости результатов вычислительных экспериментов при реализации целенаправленных бифуркационных изменений. Часто неоправданные решения продолжать промысел до неумолимо приближавшегося коллапса были слишком очевидно нерациональные, то автор уделил отдельное внимание в сценариях аспекту мотивации в принятии решений при регулировании природопользования. Кризис неизбежно происходит при стремлении получить наибольшую выгоду от эксплуатации именно сейчас. Исходя из значимости практических аспектов задействованных способов регуляции мы при моделировании развития ситуаций оперировали понятиями «псевдооптимальный» уровень изъятия и «квазистабильзация» популяционной динамики промыслового запаса.

В результате удалось достичь практической цели – описать в модельных сценариях два основных и принципиально отличных реальных популяционных процесса с итоговым коллапсом ценных промысловых запасов: в ситуации для трески Северо-Запада Атлантики с режимом псевдостабильзации и камчатского краба у побережья Аляски с выраженным флуктуационным режимом динамики.

В главе 5 последовательно получены следующие результаты исследований:

1. Проведено сравнение известных по реальным данным наблюдений шести важных ситуаций популяционных кризисов промысла. Непредвиденные истощения запасов стали последствием регулируемой эксплуатации, но оказавшейся чрезмерной. Последствия превышения допустимого уровня эксплуатации при цели максимизировать уловы проявляются для разных запасов качественно различно. Выделены нами общие динамические аспекты

и значимые отличия у подобных явлений, в том числе рассмотрены нерегулярные флуктуационные режимы изменений.

2. Определены последовательные этапы развития вариантов монотонно текущего процесса истощения либо с появлением быстрых критических эффектов до момента констатации деградации промысловых запасов.

3. Для учета специфики рассматриваемых задач при сценарном анализе ситуаций в биосистемах нами реализован метод *регулятивного дополнения* моделей. При формировании модельных сценариев расширили базовую гибридную структуру формальной логикой принятия экспертных решений об изменении режима эксплуатации биоресурсов.

4. Выделенные нами специфические и экстремальные динамические явления при регулируемом вмешательстве в популяционные процессы мы представили для исследования в моделях в формате имитационных сценариев с логически заданным изменением воздействием. Логика принятия решений формализовывалась наборами предикатов изменения воздействия на динамику гибридной системы в зависимости от величины уловов за предшествующий период наблюдений. Данные правила вместе с начальным состоянием и эмпирически заданными параметрами модели составляют анализируемую ситуацию со сценариями её развития.

5. Исходя из сравнения ряда событий кризисов промысла формализовано представление о ситуации коллапса, как итогового события, следующего при нерациональной эксплуатации биоресурсов. Продемонстрирован на четырех примерах систематический характер явления коллапса. Введено представление о квазиоптимальном режиме эксплуатации популяции при небольшом превышении допустимого изъятия, как для трески или краба.

6. При моделировании ключевых ситуаций Показано, что при принятии решений при регуляции изъятия разных запасов эксперты часто ориентируются на неактуальное состояние биоресурсов, недооценивают реальный процент изъятия и переоценивают способность популяции к восстановлению. При выработке обоснования при установлении сезонных квот часто используют оценку эффективности воспроизводства, рассчитанную при исторически оптимальном и стабильном состоянии биоресурсов, которые уже длительно и интенсивно эксплуатировались в предшествующий период. Завышение оценки носит систематический характер у разных популяций.

При анализе сценариев использован доступный набор нелинейных эффектов как арсенал описательных средств для представления популяционных изменений.

Для модельной имитации развития кризисных ситуаций экодинамики применены нелинейные эффекты динамики итераций, прямые и обратные бифуркации стационарных точек и возникающие в фазовом пространстве неустойчивые инвариантные многообразия. Регуляцией значений функций в точках экстремумов нам удалось изменять свойства границы областей притяжения аттракторов. Все использованные нелинейные эффекты в динамике дискретной составляющей траектории гибридной системы получили сущностную биологическую интерпретацию в

примерах. Апробация методики построения вычислительной структуры для анализа динамических сценариев столь разных биологических объектов промысла (треска, краб, перуанский анчоус) позволяет говорить о том, что только областью природопользования сфера применения гибридных моделей не исчерпывается. Описываемые в гибридных моделях нелинейные эффекты для дискретной составляющей траектории имеют универсальный характер для биосистемных процессов с пороговыми состояниями. Стремительные резкие изменения биосистем наблюдаются при вспышках численности и характерны для инвазий чужеродных видов. Для имитации экстремальных ситуаций автор может перестроить предложенный набор уравнений, дополнив его функциональностью. Покажем, что коллапсы и вспышки только две стороны одной медали нелинейной пороговой экодинамики.

ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЯ РАЗВИТИЯ СТРЕМИТЕЛЬНОЙ ВСПЫШКИ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕКОМЫХ

Разработанная методология позволила имитационно моделировать совершенно иную и важную в биокибернетике экстремальную ситуацию – вспышку численности у вредителей. Вспышки у насекомых различаются по фазам запуска, резкости перехода к так называемой эруптивной динамике, выходу на пик и финальной стадии завершения опасного явления. Вспышки насекомых – это редкий переходный режим. Пороговая вспышка завершается самостоятельно в имитационном сценарии через краткий интервал времени.

Один из наиболее распространенных сценариев перехода к фазе стремительного роста «вспышке численности» – пороговый ее запуск. Ситуация преодоления порога мелкими и малоподвижными насекомыми описана на примере анализа вспышек вредителя австралийских эвкалиптовых деревьев, где отмечены типичные фазы прохождения вспышки. Данный порог представим математически как неустойчивое равновесие у итераций сложной функциональной зависимости. Порог должен преодолеваться спонтанно и без внешнего давления. Полученный хаотический «фрактальный» репеллер из-за локально несвязной границы областей притяжения у двух альтернативных аттракторов подходит на роль порогового индуктора для перехода между фазами.

В модели с функцией Ψ естественен сценарий, когда спонтанное преодоление равновесия запускает вспышку вредителя с выходом к устойчивому равновесию. Так решена только одна из проблем задачи моделирования вспышек. Экстремальные явления завершаются. Экосистема не выдержит долго такого нарушения выравненности биоразнообразия. Популяция уничтожит требуемые ей запасы энергии и резко сократится до исторического минимума.

Для имитации спонтанности у модельного сценария завершения бурной фазы вспышки модифицируем базовую гибридную модель на второй стадии методом возрастающей от единичного значения специальной триггерной функции Ξ в уравнении следующим образом:

$$\Xi(N(\tau)) = 1 + \frac{e^{c_1 N(\tau)}}{l + c_2 e^{c_1 N(\tau)}}, \quad \lim_{N(\tau) \rightarrow \infty} \Xi(N(\tau)) = 1 + \frac{1}{c_2};$$

где параметр $c_2 > 1$ характеризует стремительность процесса исчерпания ресурсов среды. Значение l даст тот уровень численности, при котором эффект исчерпания резко и явно проявится. Тогда уравнение для второй стадии развития в гибридной системе примет следующий вид:

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha_2 N(t) \Xi(N(\tau)) / w(\tau) - \beta N(\tau), \quad t > \tau.$$

Для нового модельного сценария проведена имплементация триггерной функции Ξ для стадии развития № II. Для насекомых вредителей вторая стадия более других потребует пищевого обеспечения, поэтому на максимуме вспышки выживаемость у данной стадии из-за активации триггера резко сократится.

В вычислительном эксперименте (рис. 6.1.) с полученной из гибридных уравнений дискретной траекторией имитируем переход спонтанный и неожиданный: от хаотизированной динамики к устойчивому равновесию.

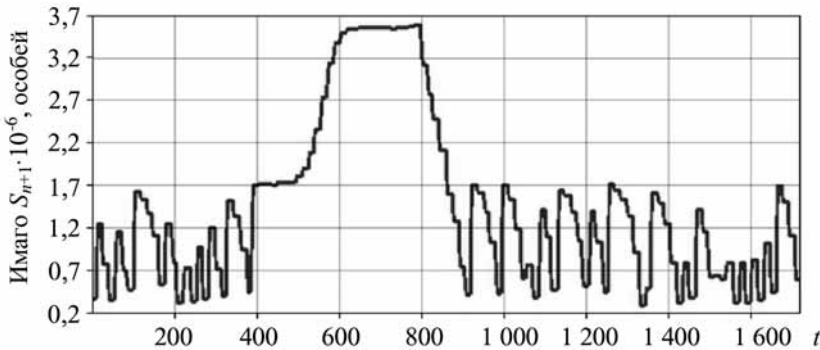


Рис. 6.1. Имитационное моделирование спонтанного единичного пика вспышки численности насекомых вредителей

Популяция резко меняет свойство экодинамики, когда переходит через порог численности $\phi^p(R) > R_3^*$ и это событие составит фазу развития вспышки после промежуточной, но достаточно длительной стабилизации. Процесс с промежуточной стадией формально отражается таким образом:

$$|\varphi_{n+1}(R_0) - \varphi_n(R_0)| \rightarrow \varepsilon, \quad \varphi_{n+i}(R_n) \approx R_3^*, \quad i = 1 \dots k < \infty.$$

Траектория в окрестности неустойчивого R_3^* служит индикатором фазы стремительного увеличения численности. В сценариях управления мы исследуем поведение вычислительной структуры, так называемой динамической системы с алгоритмически переопределяемым оператором эволюции φ .

Порог для запуска вспышки создает нестабильная система взаимной регуляции: хозяин–паразит–сверхпаразит. Паразитические оси нападают на главных врагов вредителей – других перепончатокрылых, их первичных паразитов. Первый порог роста численности связан с действием сверхпаразита вида *Echthrophlexis psyllae*. Равновесие при большой численности может казаться долгое время устойчивым, но в новом модельном сценарии лю-

бое верхнее равновесие будет исчезать из-за действия Ξ . Назовем сценарий стремительных изменений редукцией точечного аттрактора, когда две стационарные точки сливаются в одну неустойчивую, и она исчезает. После исчезновения слившихся точек траектория вернется к аperiodическому движению в интервальном аттракторе Θ – множестве несвязных субинтервалов внутри интервала, получающихся как разность континуальных множеств точек таким образом:

$$\Theta = [R_1^*, R_2^*] \setminus \{\varphi^{-n}(R_2^*)\} \cup \{\varphi^{-n}(R_3^*)\} \cup \{\varphi^{-n}(R_1^*)\}.$$

Аттрактор составит структура Θ , образованная при изъятии из интервала между ограничивающими точками-репеллерами всех прообразов точек-репеллеров. После снятия управляющего воздействия $\bar{q}_n = 0$ равновесия R_3^* , R_4^* скоро восстановят свое положение на пересечении кривой зависимости с биссектрисой координатного угла. Биосистема перейдет в следующую стадию восстановления и обновления растительности вплоть до следующей вспышки. Такие локальные вспышки обычных для среды насекомых – часть естественного процесса обновления лесного сообщества. Вспышечная активность короткая, они не несут серьезной угрозы биоценозу, способствуют поддержанию питающихся насекомыми животных. В случае новых чужеродных видов ситуация сложнее.

6.1. СЦЕНАРИЙ РАЗВИТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ИНВАЗИОННОЙ ВСПЫШКИ

Вспышки численности многообразны по динамике развития и причинам, это несколько явлений, отражающихся в достижении одним из видов избыточной для среды численности. Рассмотренные сценарии резких изменений в биофизических процессах часто сопутствуют явлениям стремительных инвазий – интенсивного неконтролируемого на первой стадии процесса распространения агрессивного чужеродного вида, вторгающегося в сложившуюся биофизическую среду.

Инвазивные вспышки бывают длительными и проходят в форме серии популяционных волн. Численность агрессивного вселенца может долго достигать экстремально высоких значений, так как автохтонные виды не сразу способны выработать адаптацию к вселенцу. Так европейские пчелы не научились противостоять инвазивному гигантскому азиатскому шершню, но в Японии пчелы выработали стратегию обороны. В результате адаптации и из-за разрушения вселенцем своей среды далее инвазивный вид уже сам попадает в ситуацию резкого кризиса. Часто инвазивный вид настигает эпизоотия. Можно модифицировать соотношения у двух триггерных функций и получить описание экстремально разбухающего популяционного процесса при инвазии рис. 6.2

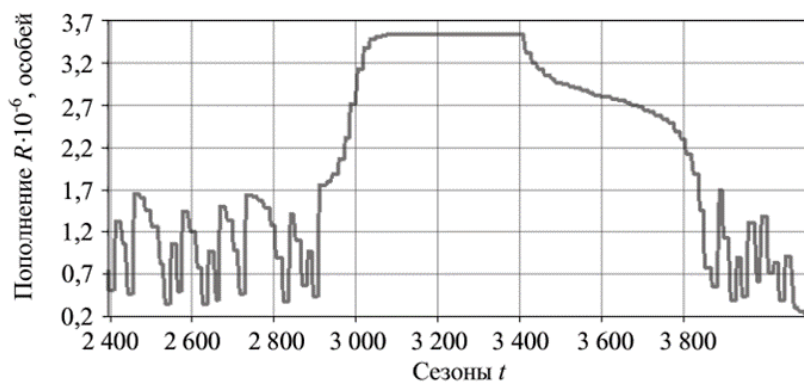


Рис. 6.2. Сценарий развития вспышки численности с длительным максимумом и итоговым коллапсом инвазивной популяции

В сценарии снижение численности происходит медленно при длительной адаптации автохтонных видов. В результате инвазивный вид разрушает среду, местные виды адаптируются к вселенцу, и его вспышка завершается коллапсом.

ЗАКЛУЧЕНИЕ

В результате выполненных сценарных исследований развития кризисных ситуаций автор продемонстрировал, что разрабатываемым моделям для их успешного практического применения при прогнозировании в области биофизики, экодинамики промысловых биоресурсов и анализа адаптивных биосистем, оказывается недостаточно быть непротиворечивыми и корректными с точки вычислительных исследований решений. Формальным методам анализа процессов, в частности, математическим моделям, приходится соответствовать принятой в общей биологии и экологии, и других предметных областях аргументации и получать соответствующее их свойствам обоснование. Отдельной решаемой задачей исследований является установление критериев адекватности для модельных результатов по степени соответствия полученных решений параметрически идентифицированных уравнений со свойствами реальных процессов по данным мониторинга и отчетов промысловой статистики.

Исследования, которые были начаты автором с модельного анализа частного случая деградации четырех популяций осетровых рыб Каспийского моря при организованном их искусственном воспроизводстве и выпуске крупных партий молоди, привели к разработке метода построения гибридных вычислительных структур. Цель моделирования формирования пополнения – детализировано учитывать особенности онтогенетического развития и смены стадий жизненного цикла, влияющие на выживаемость видов рыб в существенно измененной их среде воспроизводства. При обобщении метода рассмотрены другие примеры деградации биоресурсов при ведении регулируемого квотами промысла. В сценариях описаны отличия ситуаций стремительных коллапсов. Особенности принципов принятия решений при регуляции оказались решающими факторами таких кризисов. В результате развита методология анализа имитационных сценариев на основе гибридных вычислительных структур, включающих логику принятия решений об изменении промыслового воздействия из оценки ситуации.

Помимо проблем моделирования динамики эксплуатируемых биоресурсов и анализа принятия экспертами регулирующих антропогенные воздействия решений в монографии рассмотрены вновь возникающие задачи исследования нелинейных процессов экодинамики, связанные с нарушением выравненности сложившегося разнообразия биологических сообществ. В заключительной главе на основе обработки данных наблюдений предложен метод моделирования для двух сценариев развития вспышек численности насекомых, вызывающих обширные поражение лесов. Экстремальная «вспышечная» активность проявляется в разнообразных динамических формах и часто связана с агрессивными инвазиями видов, не имеющими в начальных стадиях процесса своего расселения эффективных конкурентов. В гибридной модели рассмотрен вариант пороговой длительной вспышки, которая при затухании переходит в популяционный кризис и сценарий образования серии «пульсирующих» пиков численности инвазионного вида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джефферс Дж. Введение в системный анализ: Применение в экологии. – М.: Мир, 1981. – 256 с.
2. Мюррей Д. Математическая биология. Ин-т компьютерных исслед. Ижевск, 2009.
3. Smith M.J. Models in Ecology. Cambridge University Press, 1974.
4. Свирижев Ю. М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. – М.: Наука, 1987. – 366 с.
5. Свирижев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
6. Полуэктов Р. А., Пых Ю. А., Швытов И. А. Динамические модели экологических систем. – Ленинград: Наука, 1980.
7. Братусь А.С., Новожилов А.С. Математические модели экологии и динамические системы с непрерывным временем. – М.: МГУ, 2004.
8. Логофет Д.О., Уланова Н.Г. Матричные модели в популяционной биологии. – М.: "МАКС Пресс", 2017. – 128 с.
9. Левченко В.Ф. Эволюционная биосферология. – СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2020. – 148 с.
10. Меншуткин В.В. Опыт работы с применением вычислительной техники в экологических исследованиях // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2021. № 9. С. 157-162.
11. Михайлов В.В., Переварюха А.Ю., Решетников Ю.С. Модель динамики популяции рыб с расчетом темпов роста особей и сценариев гидрологической обстановки // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4 (95). С. 31-38.
12. Конторин В.В. Математическое моделирование популяции байкальского омуля. М.: 1980. 208 с.
13. Русаков А.В., Бобырев А.Е., Бурменский В.А., Криксунов Е.А. Математическая модель озерного сообщества с учетом целочисленности размера популяции: хаотические и долгопериодные колебания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. № 2. С. 229-239.
14. Баранов Ф.И. 1925. К вопросу о динамике рыбного промысла // Бюлл. рыбн. хоз-ва. 1925. Т. 8. С. 26–38.
15. Никольский Г.В. Экология рыб. – М.: Высшая школа. 1963.
16. Фрисман Е.Я. Странные аттракторы в простейших моделях динамики численности популяций с возрастной структурой // Доклады Академии наук. 1994. Т. 338. № 2. С. 282.
17. Розенберг Г.С., Коломыц Э.Г., Шарая Л.С. Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальном потеплении (опыт прогнозного моделирования) // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 367-381.
18. Сухинов А.И., Белова Ю.В., Чистяков А.Е. Моделирование биогеохимических циклов в прибрежных системах Юга России // Математическое моделирование. 2021. Т. 33. № 3. С. 20-38.
19. Nikitina A.V., Ugolnitsky G.A., Chistyakov A.E., Puchkin M.V., Semenov I.S., Sukhinov A.I. Optimal control of sustainable development in the biological rehabilitation of the Azov sea // Mathematical Models and Computer Simulations. 2017. V. 9. P. 101-107.
20. Резниченко Г.Ю. Лекции по математическим моделям в биологии. Ч. 1. – М.-Ижевск: «Регулярная и хаотическая динамика». – 231 с.
21. Hald A. A History of Probability and Statistics and Their Applications before 1750. Wiley, New Jersey, 2003, 136 p.

22. Vacaer N. Histoires de mathématiques et de populations. Cassini, Paris, 2008. 190 p.
23. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Глобальная динамика экосистем: природные изменения и антропогенные воздействия // Известия Русского географического общества. 2006. Т. 138. № 4. С. 1-14.
24. Cushing, J. M., Costantino, R. F., Dennis, B., Desharnais, R. A., and Henson, S. M. Chaos in Ecology. Experimental Nonlinear Dynamics. Academic Press, San Diego. 2003, 235 p.
25. Ильин О.И. Об одной задаче оптимальной эксплуатации популяции рыб с возрастной структурой // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2005. № 4. С. 113-119.
26. Кузенков О. А. Исследование задач управления динамикой популяций на основе обобщенной модели Колмогорова // Известия РАН. Теория и системы управления, 2009, № 5, с. 169–176.
27. Мнацаканян А.Г., Харин А.Г. Использование методологии динамического анализа при принятии решений о предоставлении квот на инвестиционные цели // Рыбное хозяйство. 2017. № 1. С. 11-17.
28. Торцев А.М., Белоусов А.Н., Воронков В.Б. О национальном стандарте "методология принятия управленческих решений для сохранения водных биоресурсов и среды их обитания" // Рыбное хозяйство. 2017. № 5. С. 53-55.
29. Александрова М.А. К вопросу об оценке решений управления промыслом с использованием экологической информации // Успехи современной науки. 2017. Т. 2. № 5. С. 212-214.
30. Макоедов А.Н., Магишов Г.Г., Пономарёва Е.Н. Мировые тенденции пользования водными биоресурсами // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 2. С. 179-190.
31. Schroder M. Precautionary approach principle // Max Planck Encyclopedia of Public International Law, 2010.
32. Ferguson H. Developing a Precautionary Management Approach for the Eastern Canada-West Greenland Population of Bowhead Whales (*Balaena mysticetus*) // Marine Conservation and Sustainability. 2021. № 1. P. 89-99.
33. Myers R.A., Worm B. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities // Nature. 2003. Vol. 423. P. 280–283.
34. Altukhov P., Salmnekoва E.A. Straying intensity and genetic differentiation in salmon populations // Aquaculture and Fisheries Management. 1994. Vol. 25. P. 99-102.
35. Абакумов А.И. Каким должен быть режим рыбного промысла? // Информатика и системы управления. 2017, № 4, С. 12-19.
36. Ильичев В.Г., Дашкевич Л.В. Оптимальный промысел и эволюция путей миграции рыбных популяций // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11. № 5. С. 879-893.
37. Романюха А. А. Математические модели в иммунологии и эпидемиологии инфекционных заболеваний. М. : Лаборатория знаний, 2020. 296 с.
38. Марчук Г.И., Петров Р.В. Математическое моделирование в иммунологии // Журнал всеобщего химического общества им. Д.И. Менделеева. 1982. Т. 27. № 4. С. 371-385.
39. Марсден Д., Мак-Кракен М. Бифуркация рождения цикла и ее приложения. – М.: Мир, 1980. – 197 с.
40. Т. Дж.М., Томпсон Дж.М. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике., – М.: Мир, 1985. – 254 с.
41. Никанорова А.М. Математические модели в вопросе прогнозирования вспышек трансмиссивных инфекций и инвазий // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2020. № 1 (45). С. 38-41.

42. Филин А.А. Реализация экосистемного подхода к управлению биоресурсами Баренцева моря // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2004. Т. 137. С. 67-76.
43. Lin Z.S., Li B.L. The maximum sustainable yield of allee dynamic system // *Ecological Modelling*. 2002. Т. 154. № 1-2. С. 1-7.
44. Fazli H., Zhang C.I., Hay D.E., Lee C.-W. Stock assessment and management implications of anchovy kilka (*clupeonella engrauliformis*) in iranian waters of the Caspian sea // *Fisheries Research*. 2009. Т. 100. № 2. С. 103-108.
45. Горстко А.Б. Математическое моделирование экосистемы Азовского моря. – М.: Знание, 1979. – 164 с.
46. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря: Математические модели / Под ред. И. И. Воровича. – М.: Наука, 1981. – 360 с.
47. Бердников С.В., Селютин В.В., Сурков Ф.А., Тютюнов Ю.В. Моделирование морских экосистем: опыт, современные подходы, направления развития (обзор) // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 1. С. 105–122.
48. Говорухин В.Н., Моргулис А.Б., Тютюнов Ю.В. Медленный таксис в модели хищник-жертва // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 372. № 6. С. 730-732.
49. Абакумов А.И., Бочаров Л.Н., Каредин Е.П. Модельный анализ многовидовых рыбных промыслов // *Известия ТИНРО*, 2004, Т. 138, с. 220-224.
50. Skaret G., Pitcher T. An Ecopath with Ecosim model of the Norwegian Sea and Barents Sea validated against time series of abundance. Bergen, 2016.
51. Canham C.D., Cole J.J., Lauenroth K. *The Limits to Models in Ecology*. Princeton University Press, 2003.
52. Aboudramane G. On the Dynamic Regulation of a Non Linear Model Fish Population // *Journal of Mathematics Research*. 2013. Vol. 5. P. 134-347.
53. Вольтерра, Вито. Математическая теория борьбы за существование; пер. с фр. О. Н. Бондаренко. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. – 285 с.
54. Костицын В.А. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит., 1984. – 96 с.
55. Труфанова И.С., Амосова В.М. Долгосрочный прогноз российской добычи сельди в Балтийском море // *Труды ВНИРО*. 2021. Т. 186. С. 78-90.
56. Яцишин А.В., Переварюха А.Ю., Михайлов В.В. Разработка, верификация и сценарные эксперименты в агрегированной модели трофодинамики крупного водоема // *Математические машины и системы*. 2019. № 2. С. 90-100.
57. Михайлов В.В., Переварюха А.Ю. Моделирование процесса стремительной эвтрофикации крупного озера и его влияния на благополучие автохтонной ихтиофауны // *Нелинейный мир*. 2018. Т. 16. № 4. С. 45-53.
58. Simmonds E., Campbell A., Skagen D. Development of a stock–recruit model for simulating stock dynamics for uncertain situations: the example of Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) // *ICES Journal of Marine Science*. 2011. Vol. 68. P. 848–859.
59. 2. 4. p. Turchin P. *Complex Population Dynamics: A Theoretical/Empirical Synthesis*. Princeton.
60. Elisa Benincà, Bill Ballantine, Stephen P. Ellner, and Jef Huisman. Species fluctuations sustained by a cyclic succession at the edge of chaos // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. V. 112. № 20. P. 6389–6394.
61. Зульпукаров М. М., Малинецкий Г. Г. Шильниковский хаос в системе Розенцвейга–Макартура // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2006. № 45. С. 1-32.
62. Ricker, W.E. *Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations* // *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*. 1975. № 119.
63. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. *Теория колебаний*. 2-е изд., перераб. и испр. – М.: Наука, 1981. – 918 с.

64. Блох А.М., Любич М.Ю. О разложении одномерных динамических систем на эргодические компоненты. Случай отрицательного шварциана // Алгебра и анализ. 1989. № 1, С. 128–145.
65. «Ricker W.E. Stock and recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1954. Vol. 11. P. 559-623.
66. Shepherd J.G. A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries, and the construction of sustainable yield curves // Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer. 1982. Vol 40. P. 67-75.
67. Cushing, D.H. The dependence of recruitment on parent stock // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1973. Vol. 30. P.1965-1976.
68. Bravington M.S., O'Brien C.M., Stokes T.K. Sustainable recruitment: the bottom line // ICES CM. 1999. Vol. 11. P.2-44.
69. Borja A., Uriarte A., Egana J. Environmental factors and recruitment of mackerel, *Scorpaenopsis scorpaenoides* L. 1758, along the north-east Atlantic coasts of Europe // Fisheries Oceanography. 2002. Vol. 11. P.116-127.
70. Шарковский А.Н. О притягивающих и притягивающихся множествах // Доклады АН. СССР. 1965. Т. 160. С.1036–1038.
71. Li T. Yorke J. Period Three Implies Chaos // The American Mathematical Monthly. 1975. Vol. 82, No. 10. P. 985-992.
72. Sharkovskii A.N. Coexistence cycles of continuous map of the line into itself // International Journal of Bifurcation & Chaos. 1995. Vol. 5. P. 1263–1273.
73. Ердаков Л.Н., Савичев В.В., Чернышова О.Н. Количественная оценка популяционной цикличности у животных // Журнал общей биологии. 1990. Т. 51. № 5. С. 661-668.
74. Myers J.H., Cory J.S. Population cycles in forest Lepidoptera revisited // Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 2013. Vol. 44. P. 565–592.
75. Royama T., MacKinnon W.E., Kettela E.G., Carter N.E., Hartling L.K. Analysis of spruce budworm outbreak cycles in New Brunswick, Canada, since 1952 // Ecology. 2005. Vol. 86. P. 1212–1224.
76. May R.M. Qualitative Stability in Model Ecosystems // Ecology. 1973. Vol. 54. P. 638-641.
77. Krebs C.J. Population Cycles in Small Mammals // Advances in Ecological Research. 1974. Vol. 8. P. 267-399.
78. Andreassen H.P., Sundel J., Ecke F. Population cycles and outbreaks of small rodents: ten essential questions we still need to solve // Oecologia. 2021. Vol 195. P. 601–622.
79. Feigenbaum M.J. Universal behavior in nonlinear systems // Physica D. 1983. Vol. 7. P. 16–39.
80. Фрисман Е.Я., Жданова О. Л., Кулаков М. П., Неверова Г.П., Ревуцкая О.Л. Математическое моделирование популяционной динамики на основе рекуррентных уравнений // Известия РАН. Серия биологическая, 2021, № 3, С. 227-240.
81. Животовский Л.А., Храмцов В.В. Модель динамики численности горбуши *Oncorhynchus gorbusha* // Вопросы ихтиологии. 1996. Т. 36. № 3. С. 369–385.
82. Boyce M. Population viability analysis // Annual Review of Ecology and Systematics. 1992. Vol. 23. P. 481–506.
83. Cazelles B., Ferriere R. How predictable is chaos? // Nature. 1992. Vol. 355. P. 25–26.
84. Hsieh, Ch., Reiss, C., Hunter, J. et al. Fishing elevates variability in the abundance of exploited species // Nature. 2006. Vol. 443. P. 859–862.
85. Berkeley, S. A., Nixon, M. A., Larson, R. J. & Love, M. S. Fisheries sustainability via protection of age structure and spatial distribution of fish populations // Fisheries. 2004. Vol. 29. P. 23–32.

86. Anderson C., et al. Why fishing magnifies fluctuations in fish abundance. *Nature*. 2008. Vol. 452. P. 835–839.
87. Stenseth N., Rouyer T. Ecology: Destabilized fish stocks // *Nature*. 2008. Vol. 452. P. 825–826.
88. Розенберг Г.С. Уорд Клайд Олли и принцип агрегации особей // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2020. Т. 29. № 3. С. 77-88.
89. Reed D. Estimates of minimum viable population sizes for vertebrates and factors influencing those estimates // *Biological Conservation*. 2003. Vol. 113, Iss. 1. P. 23-34.
90. Fogarty M.J., Siskey M.R. Dynamics of Exploited Marine Fish Populations // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2019. Vol. 2. P. 338-347.
91. Bazykin A.D. Nonlinear dynamics of interacting populations. Singapore: World Scientific; 1998, 196 p.
92. Courchamp F., Luděk, B., Gascoigne J. Allee Effects in Ecology and Conservation. Oxford: Oxford University Press. 2008, 256 p.
93. Elofsson K., Gren I.M. Regulating invasive species with different life history // *Journal of Bioeconomics*. 2015. Vol. 17. P. 113-136.
94. Grebogi C., Ott E., Yorke J.A. Fractal basin boundaries, long-lived chaotic transients and unstable-unstable pair bifurcation // *Physical Review Letters*. 1983. V. 50. No. 13. P. 935-938.
95. Singer D. Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval // *SIAM journal of applied math*. 1978. V. 35. P. 260–268.
96. MacDonald S., Grebogi C., Ott E., Yorke J. Fractal basin boundaries // *Physica D*. 1985. V. 17. No. 2. P. 125-153.
97. Старостина В.В., Тепляков В.В. Вокруг теоремы Шарковского. Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2013. № (4). С. 97-104.
98. Анищенко В.С., Вадивасова Т. Е., Окрокверцхов Г.А., Стрелкова Г.И. Статистические свойства динамического хаоса // *Успехи физических наук*. 2005. Т. 175. № 2. С. 163–179.
99. Борисова Т. Ю., Соловьева И.В. Проблемные аспекты моделирования популяционных процессов и критерии их согласования // *Математические машины и системы*. 2017. № 1. С. 71-81.
100. Гераскин П. П., Металлов Г. Ф., Переварюха Ю. Н. Физиологические и популяционно-генетические исследования каспийских рыб // *Рыбное хозяйство*. 2007. № 3. С. 66–68.
101. Бабаян В.К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ): Анализ и рекомендации по применению. – М.: Изд-во ВНИРО, 2000 – 192 с.
102. Рикер У.Е. Методы оценки и интерпретация биологических показателей популяций рыб. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 408 с.
103. Риклефс Р. Основы общей экологии. – М.: Мир, 1979. – 424 с.
104. Галкин В.А. Применимость теоремы Такенса об обнаружении «Странных аттракторов» для биологических систем // *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2016. № 3. С. 76-82.
105. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. – М.: Наука, 1986. – 496 с.
106. Переварюха А.Ю. Нелинейная модель перелова волжских популяций на основе когнитивного графа взаимодействия экологических факторов // *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*. 2016. № 1-2. С. 92-106.
107. Переварюха А.Ю. Графовая модель взаимодействия антропогенных и биотических факторов в продуктивности Каспийского моря // *Вестник Самарского государственного университета*. 2015. № 10. С. 181–198.

108. Hutchings J.A. Collapse and recovery of marine fishes // *Nature*. 2000. Vol. 406. P. 882–885.
109. Hutchings J.A., Reynolds J. D. Marine fish population collapses: consequences for recovery and extinction risk // *Bioscience*. 2004. Vol. 13. P. 297–309.
110. Paulik G.J. Studies of the possible form of the stock-recruitment curve // *Rapports et Proces-verbaux des Reunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1973. Vol. 164. P.303-315.
111. Меншуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). – Петрозаводск – Санкт-Петербург. 2010. – 416 с.
112. Кульба В. В., Миронов П. Б., Назаретов В. М. Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых графов // *Автоматика и телемеханика*. 1993. № 7. С. 130–137.
113. Белоусов А.Н. Практическое руководство по разработке и применению мер по сохранению водных биологических ресурсов в целях возмещения вреда. – М.: Эдитус, 2016. – 272 с.
114. Владимиров В.И. Критические периоды развития у рыб // *Вопросы ихтиологии*. 1975. Т. 15. № 6. С.955–975.
115. Дехник Т. В., Серебряков В.П. Значение ранних стадий развития в формировании численности поколений // *Теория формирования численности и рационального использования стад рыб*. 1985. С. 56–72.
116. Архипов А.Г. Применение результатов изучения раннего онтогенеза морских промысловых рыб в рыбохозяйственной деятельности // *Труды ВНИРО*. 2015. Т. 156. С. 16-37.
117. Тутубалин В.Н. и др. Математическое моделирование в экологии. Историко-методологический анализ. – М.: Языки русской культуры. 1999. – 208 с.
118. Колесов Ю.Б, Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. – БХВ-Петербург. 2006. – 214 с.
119. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – БХВ-Петербург, 2006. – 237 с.
120. Новиков Е.А. Компьютерное моделирование жестких гибридных систем. – Новосибирск, НГТУ. 2012. – 450 с.
121. Фейгин М.И. Вынужденные колебания систем с разрывными нелинейностями. – М.: Наука, 1994. – 288 с.
122. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. – М.: Наука, 1985. – 222 с.
123. Иванов А.П. Исследование разрывных бифуркаций в негладких динамических системах // *Нелинейная динамика*. 2012. № 2, С. 231–247.
124. Глушков В.М., Гусев В.В., Марьянович Т. П., Сахнюк М.А. Программные средства моделирования непрерывно-дискретных систем. – Киев: «Наукова думка», 1975. – 240с.
125. Емельянов Е.С. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 335 с.
126. Миллер Б.М., Рубинович Е.Я. Оптимизация динамических систем с импульсными управлениями. – М.: Наука, 2005.
127. Айзерман М.А., Пятницкий Е.С. Основы теории разрывных систем. // *Автоматика и Телемеханика*. 1974. № 8. С. 39–61.
128. Гончарова Е.В., Старицын М.В. Метод разрывной замены времени в задачах оптимального управления импульсными гибридными системами // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2011. № 3. С. 41-51.
129. Деев В.В., Кудрявцев А.М., Копичев О.А. Логико-лингвистический подход к моделированию электромагнитной обстановки на основе гибридных автоматов

// Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 2. С. 43–47.

130. Сениченков Ю.Б. Численное моделирование гибридных систем. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 206 с.

131. Сениченков Ю.Б., Колесов Ю.Б., Инихов Д.Б. Формы представления динамических систем в mvstudium // Компьютерные инструменты в образовании. 2007. № 4. С. 44-49.

132. Васнецов В.В. Этапы развития костистых рыб. Очерки по общим вопросам ихтиологии. Изд-во АН СССР. 1953. С. 207-217.

133. Михайлов В.В., Иванов Н.М., Кузьмин Д.В. Автоматный компонент системы управления движением шагающей машины // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 12. С. 1073-1080.

134. Яржомбек А.А. Образ жизни и поведение промысловых рыб. – М.: Изд-во ВНИРО, 2016. – 200 с.

135. Вдовин А.Н., Четырбоцкий А.Н. Рост и стадийность онтогенеза южного однопёрого терпуга в водах Приморья (Японское море) // Труды ВНИРО. 2018. Т. 170. С. 26-46.

136. Таразанов В.И. Динамика численности и особенности распределения молоди рыб пелагического комплекса озера Ханка в раннем онтогенезе // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2001. № 1. С. 205-216.

137. Neave F. Principles affecting the size of pink and chum salmon population in British Columbia // Journal of the fisheries research board of Canada, 1953. Vol. 9. № 9. P. 450–491.

138. Леванидов В.Я. О связи между плотностью заполнения нерестилищ и эффективностью нереста амурских лососей // Известия ТИНРО. 1964. Т. 55. С. 65-74.

139. Смирнов А.И. Биология, размножение и развитие тихоокеанских лососей. – М.: МГУ, 1975. – 335 с.

140. Тюрин В.П. Нормальные кривые переживания и темпов естественной смертности рыб как теоретическая основа регулирования рыболовства // Известия ГосНИОРХ. 1972. Т. 71. С. 71-128.

141. Маркевич Г.Н., Ивашкин Е.Г., Павлов Е.Д. Явление посленерестового выживания у озерной нерки *Oncorhynchus nerka* (walb.) // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2011. № 5. С. 619-624.

142. Довгопол Г.Ф., Вещев П.В. Оценка численности поколений себрюги *Acipenser stellatus* и основных факторов влияющих на структуру её популяции // Вопросы ихтиологии. 1993. Т. 33. С. 93–99.

143. Maler Z., Manna A. A formal approach to hybrid systems. In Proceedings of REX workshop: Real Time: Theory in Practice, Lecture Notes in Computer Science 600, Springer-Verlag, 1992.

144. Коваль М.В. Питание тихоокеанских лососей рода *Oncorhynchus* в период преданадромных миграций и летнего нагула в водах, прилегающих к Камчатке // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2008. № 10. С. 72-89.

145. Kriksunov E.A., Snetkov M.A. Model of the formation of the replenishment of spawning herd taking into account the weight growth of fish // Dokl. AN SSSR. 1980. V. 253. P. 759–761.

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

147. Карамушко Л.И., Шатуновский М.И. Активный обмен и метаболический диапазон у рыб высоких широт // Успехи современной биологии. 2018. Т. 129. № 2: 167-180.

148. Paulik G. J. Studies of the possible form of the stock-recruitment curve // *Rapports et Proces-Verbaux des Réunions du Conseil International pour l'Exploration 1214 de la Mer*. 1973. Vol. 164. P. 302-315.
149. Малыгина В.В., Мулюков М.В., Перцев Н.В. О локальной устойчивости одной модели динамики популяции с последствием // *Сибирские электронные математические известия*. 2014. Т. 11. С. 951-957.
150. Subbey S, Devine J.A. Modelling and forecasting stock–recruitment: current and future perspectives // *ICES Journal of Marine Science*. 2014. Vol. 71, Iss. 8. P. 2307–2322.
151. Неверова Г.П., Хлебопрос Р.Г., Фрисман Е.Я. Влияние эффекта Олли на динамику популяций с сезонным характером размножения // *Биофизика*. 2017. Т. 62. № 6. С. 1174-1184.
152. Tobin P.C. The role of Allee effects in gypsy moth, *Lymantria dispar* (L.), invasions // *Population Ecology*. 2009. Vol. 51. P. 373-384.
153. Ricker W.E. Big effects from small causes: Two examples from fish population dynamics // *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 1963. V. 20. P. 257-264.
154. Ulltang Ø. Stock assessment and biological knowledge: can prediction uncertainty be reduced? // *ICES Journal of Marine Science*. 1996. Vol. 53. P. 659-675.
155. Крупянюк Н.И., Скирин В.И. Эффективность воспроизводства кеты *Oncorhynchus keta* (walbaum) в южном Приморье // *Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова*. 2003. № 2. С. 511-522.
156. Базыкин А.Д., Апонина Е.А. Модель экосистемы трех трофических уровней с учетом существования нижней критической плотности популяции продуцента // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 1981. Т. 4. С. 186-203.
157. Корепанов В. О., Чхартишвили А. Г., Шумов В. В. Теоретико-игровые и рефлексивные модели боевых действий // *Компьютерные исследования и моделирование* 2022 Т. 14. № 1 С. 179–204.
158. Bazykin A.D., Khibnik A.I. Bilocal model of dissipative structure // *Biophysic*s. 1982. vol. 27. no. 1.
159. Криксунов Е.А. Математическое моделирование в рыбоводстве // *Рыбоводство и рыболовство*. 1987. № 4. С. 5-20.
160. Суханов В.В. Стохастическая модель роста рыб // *Вопросы ихтиологии*. 1980. Т. 20. № 4 (123). С. 615-624.
161. Винберг Г. Г. Скорость роста и интенсивность обмена у животных // *Успехи современной биологии*. 1966. Т. 61, вып. 2. С. 274-293.
162. Лозовский А.Р., Алтуфьев Ю.В. Динамическая информационная модель роста осетровых рыб в индустриальной аквакультуре // *Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии*. 2006. № 3. С. 162-169.
163. Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks // *J. Cons. CIEM*. 1980. Vol. 39. P. 175-192.
164. Переварюха А.Ю. Анализ динамики возобновляемых биоресурсов с использованием комплекса гибридных моделей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2010. – 19 с.
165. Казанский Б.Н. Эколого-эволюционная стратегия развития осетрового хозяйства в водоемах СССР // *Рациональные основы ведения осетрового хозяйства*. Волгоград, 1981. С. 92-94.
166. Анисимова И.М., Лавровский В.В. *Ихтиология*. – М.: Высшая школа, 1983, – 255 с.
167. Мильштейн В.В. Теоретические и биотехнические аспекты прудового выращивания осетровых // *Биологические основы осетроводства*. – М.: Наука, 1983. – С. 128-135.

168. Von Bertalanffy L. Quantitative laws in metabolism and growth // *Quarterly Review of Biology*. 1957. Vol. 32. P. 217-231.

169. Boccardo M., Wardi Y., Egerstedt M. Optimal control of switching surfaces in hybrid dynamical systems // *Discrete Event Dynamic Systems. Theory and Applications*. 2005. V. 15. № 4. P. 433-448.

170. Губанов Е.П., Шляхов В.А., Куманцов М.И. Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей // *Вопросы промысловой океанологии*. 2010. № 7. С. 162-174.

171. Collet P. *Extended dynamical systems*. ICM Berlin. 1998. vol. 3. P. 123-132.

172. Зулбукаров М.-Г. М., Малинецкий Г. Г., Подлазов А. В. Применение метода русел и джокеров для описания динамики системы Розенцвейга–Макартура // *Математическое моделирование*. 2007. № 6. С. 3-15.

173. Шевляков Е.А., Фельдман М.Г., Канзепарова А.Н. Модели запас-пополнение, ориентиры управления и правила регулирования промысла для основных чукотских стад нерки и кеты // *Известия ТИНРО*. 2021. Т. 201. № 3. С. 735-751.

174. Решетников Ю.С., Терещенко В.Г. Количественный уровень исследования в экологии рыб и ошибки, связанные с ним // *Экология*. № 3. С. 178-185.

175. Любищев А.А. Об ошибках в применении математики в биологии. Ошибки от недостатка осведомленности // *Журн. общ. биол.* 1969. Т. 30. № 5. С. 572-584.

176. Peterman R.M. A simple mechanism that causes collapsing stability regions in exploited salmonid population // *Journal Fisheries research board of Canada*. 1977. Vol. 34. P. 1130-1142.

177. Журавлева О.Л., Иванова Л.А. Современное состояние нерестовой части популяции русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii* Brandt et Ratzeburg) р. Волги // *Вопросы рыболовства*. 2010. № 2. С. 251-262.

178. Иванов В.П. Состояние запасов промысловых объектов на Каспии и их использование. – Астрахань: Изд-во КаспНИРХ. 2001. – 409 с.

179. Переварюха А.Ю. Моделирование порогового эффекта в эффективности воспроизводства Волжской популяции осетра // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. № 3-7. С. 2287-2292.

180. Ходоревская Р.П., Довгопол Г.Ф., Журавлёва О.Л. Формирование запасов осетровых в Каспийском море. – Астрахань, изд-во КаспНИРХ, 2001.

181. Переварюха А.Ю. Анализ опыта моделирования биоресурсов с точки зрения современной теории динамических систем // *Экологические системы и приборы*. 2011. № 11. С. 17-21.

182. Вещев П.В., Гутенева Г.И., Муханова Р.С. Эффективность естественного воспроизводства осетровых в низовьях Волги в современных условиях // *Экология*. 2012. № 2. С. 123-128.

183. Гутенева Г.И., Фомин С.С. Влияние волжского стока на естественное воспроизводство осетровых рыб // *Рыбное хозяйство*. 2015. № 3. С. 103-105.

184. Никольский Г.В. Теория динамики стада рыб как биологическая основа рациональной эксплуатации и воспроизводства рыбных ресурсов. – М.: Пищевая промышленность, 1974.

185. Shepard M.P., F. C. Withler F.C. Spawning stock size and resultant production for Skeena sockeye // *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 1958. Vol. 15. P. 1007-1025.

186. Есин Е.В., Леман В.Н., Сорокин Ю.В., Чалов С.Р. Популяционные последствия высокочисленного подхода горбуши *oncorhynchus gorbuscha* к северо-восточному побережью Камчатки в 2009 году // *Вопросы ихтиологии*. 2012. Т. 52. № 4. С. 446-452.

187. Дмитриева Е.В. Влияние плотности икры на темпы развития и смертность серой жабы (*Bufo bufo*) в лабораторных условиях // *Зоологический журнал*. 2007. Т. 86. № 2. С. 229-235.

188. Кулеш В.Ф., Алехнович А.В. Влияние плотности посадки на рост и выживаемость восточной речной креветки в садках на сбросной воде теплоэлектростанции // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. 2010. № 3. С. 104-109.
189. Некрасова Л.С. Экспериментальное изучение влияния плотности поселений личинок кровососущих комаров *Aedes communis* Deg. на их биологические характеристики // Экология. 2004. № 3. С. 223-228.
190. Grieshop M., Flinn P., Nechols J. Effects of intra- and interpatch host density on egg parasitism by three species of *Trichogramma*// Journal of Insect Science. 2010. Vol. 10, Iss. 1. P. 99-114.
191. Barnay O., Gertz C. Host Density-Dependence of Discovery and Exploitation Rates of Egg Patches of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) by the Parasitoid *Trichogramma sacociae* // Journal of Economic Entomology. 1999. Vol. 92, Iss. 6, P. 1311-1320.
192. Bourne J.M., Kerry B. Effect of the host plant on the efficacy of *Verticillium chlamydosporium* as a biological control agent of root-knot nematodes at different nematode densities and fungal application rates // Soil Biol. Biochem. 1999. Vol.31. P. 75-84.
193. Fauvergue X. A review of mate-finding Allee effects in insects: from individual behavior to population management //Entomologia Experimentalis et Applicata. 2013. Vo. 146. P. 79-92.
194. Chapman R. The quantitative analysis of environmental factors // Ecology. 1928. Vol. 9. P. 111-122.
195. Гершанович А.Д. Потенции роста осетрообразных (Pisces, Acipenseriformes) в связи с их выращиванием // Биологические основы аквакультуры в морях европейской части СССР. М. 1985. С. 119-131.
196. López C. Preliminary data on the culture of juveniles of the dusky grouper, *Epinephelus marginatus* (Lowe, 1834) // Hidrobiológica. 2003. Vol.13. P. 52-68.
197. Andersen K.H., K. D. Farnsworth K. D., Pedersen M. How community ecology links natural mortality, growth, and production of fish populations // ICES Journal of Marine Science. 2009. Vol. 66, Iss. 9. P. 1978-1984.
198. Lorenzen K. The relationship between body weight and natural mortality in juvenile and adult fish: a comparison of natural ecosystems and aquaculture // Fish biology. Vol. 49, Iss. 4. P. 627-642.
199. Алтуфьев Ю.В., Романов А.А. Региональные различия роста осетровых в ювенильный период онтогенеза // Вопросы ихтиологии. 1988. Т. 28. № 3. С. 426-433.
200. Рябова Г.Д., Климонов В.О., Афанасьев К.И., Вышкварцев Д.И. Изменчивость морфометрических и генетических характеристик молоди севрюги при выращивании в прудах с различной плотностью посадки // Генетика. 2006. Т. 42. № 2. С. 244-255.
201. Будилова Е.В., Терехин А.Т. Математическое моделирование эволюции жизненного цикла: краткая история и основные направления // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71. № 4. С. 275-286.
202. Мильштейн В.В. Осетроводство. – М.: Пищевая промышленность, 1982. – 150 с.
203. Сливка А.П. Биологические основы изменения режима промысла осетровых (Acipenseridae) в дельте Волги // Вопросы ихтиологии. 1982. Т. 22. № 5. С. 738-745.
204. Khodorevskaya R.P., Ruban G.I. Caspian Sea sturgeon fishery: a historic overview // Journal of Applied Ichthyology. 2011. Vol. 27, Iss. 2. P. 199-208.
205. Зыкова Г.Ф., Журавлева О.Л., Красиков Е.В. Оценка неучтенного и браконьерского вылова русского осетра в р. Волге и Каспийском море // Доклады Междунар. конф. «Осетровые на рубеже XXI века». – Астрахань: Изд-во КаспНИРХ, 2000. – С. 54-56.

206. Мурзин В.С., Мурзин Н.В. Критическая численность популяций и сопутствующий риск их гибели на примере мезофауны // Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6. № 2. С. 74-81.
207. Рубан Г.И., Ходоревская Р.П., Кошелев В.Н. О состоянии осетровых в России // Астраханский вестник экологического образования. 2015, № 1. С. 42-50.
208. Соловьева Т. Н., Переварюха А.Ю. Динамическая модель деградации запасов осетровых рыб со сложной внутривидовой структурой // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 60–67.
209. Борисова Т. Ю. Антигенная дифференциация популяций севрюги *Acipenser Stellatus* Каспийского моря: дис. канд. биол. наук. АГТУ. – Астрахань, 2010. – 151 с.
210. Переварюха Ю.Н. Способ оценки общего физиологического состояния рыб. Патент России № 2253970.2001. Бюллетень № 37: 151. 2005.
211. Тютюнов Ю.В., Сенина И.Н., Титова Л.И., Дашкевич Л.В. Оправдался ли долгосрочный прогноз риска вымирания азовского судака? // Биофизика. 2020. Т. 65. № 2. С. 390-401.
212. Никитина А.В. Моделирование процессов эвтрофикации мелководного водоема // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 4. С. 37-44.
213. Aagaard K., Lockwood J.L. Severe and rapid population declines in exotic birds // *Biological Invasions*. 2016. Vol. 18. P. 1667–1678.
214. Несмелова Н.Н. Экология животных. – М. Юрайт, 2021.
215. Fisheries & Aquatic Life <https://www.savethesound.org/2020/02/05/moving-in-the-right-direction-two-big-wins-for-forage-fish/>.
216. Ноздрин Л.Ю., Зайцев В.Ф., Мелякина Э.И. Современное состояние популяции каспийского тюленя (попытка осмысления) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2010. № 2. С. 7-9.
217. Jonasson J. Collapse of the fishery for Iceland scallop (*Chlamys islandica*) in Breidafjördur, West Iceland // *ICES Journal of Marine Science*. 2007. Vol. 64, Iss. 2. P. 298–308.
218. MacDougall, A., McCann, K., Gellner, G. et al. Diversity loss with persistent human disturbance increases vulnerability to ecosystem collapse // *Nature*. 2013. Vol. 494. P. 86–89.
219. Kleisner K., Pauly D. Stock-Status Plots of fisheries for Regional Seas / Christensen V, Lai S, Palomares M. (eds.) // *The state of biodiversity and fisheries in Regional Seas. Fisheries Centre Research Reports*. 2011.
220. Воронич И. И., Домбровский Ю. А., Обущенко Н. И., Сурков Ф. А. Задача оптимального управления промыслом конкурирующих рыбных популяций Азовского моря // Докл. АН СССР, 1989. Т. 305, № 4. С. 790-793.
221. Ильичев В.Г., Ильичева В.В. Пространственная адаптация и оптимальный промысел рыбных популяций // Экономика и математические методы. 2014. Т. 50. № 3. С. 119-129.
222. Urusov V.M., Varchenko L.I. Ecological crisis in the reservoir of Peter the great bay, Primorye // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. № 8-2 (52). С. 95-102.
223. Larkin P.A. An Epitaph for the Concept of Maximum Sustained Yield // *Transactions of the American Fisheries Society*. 1977. Vol. 106. P. 1-11.
224. Шibaев С.В. Формальная теория жизни рыб Ф.И. Баранова и её значение в развитии рыбохозяйственной науки // Труды ВНИРО. 2015. Т. 157. С. 127-142.
225. Матишов Г.Г., Титова Г.Д. Развитие научных основ рационального морского природопользования // Наука Юга России. 2010. № 4. С. 9-18.
226. Копылов С.М. Нужна ли «предосторожность» международному экологическому праву: если да, то в каком качестве? // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 5: Юриспруденция. 2015. № 4. С. 155-159.

227. Hilker F.M., Liz E. Threshold harvesting as a conservation or exploitation strategy in population management // *Theor Ecol.* 2020. Vol 13. P. 519–536.
228. Ruitenbeek H. The great Canadian fishery collapse: some policy lessons // *Ecological Economics.* 1996. V. 19. № 2. P. 103–106.
229. Roughgarden J., Smith F. Why fisheries collapse and what to do about it // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1996. Вып. 93. P. 5078–5083.
230. Higgins J. Economic Impacts of the Cod Moratorium // *Newfoundland and Labrador Heritage Web Site.* 2008. <https://www.heritage.nf.ca/articles/economy/moratorium-impacts.php>.
231. Myers R.A., Cadigan N.G. Was an increase in natural mortality responsible for the collapse off northern cod? // *Can. J. Fisheries and Aquatic Sci.* 1995. Vol. 52. P. 1274–1285.
232. Hutchings A., Myers R.A. What can be learned from the collapse of a renewable resource? Atlantic Cod, *Gadus morhua*, of Newfoundland and Labrador // *Can. J. Fisheries and Aquatic Sci.* 1994. Vol. 51. P. 2126–2146.
233. Myers R.A. Why do Fish Stocks Collapse? The Example of Cod in Atlantic Canada // *Ecological Applications.* 1997. Vol. 7. P. 91–106.
234. Зверькова Л.М. К вопросу оценки запаса североохотоморского минтая // *Вопросы Рыболовства.* 2015. № 4. С. 419–427.
235. Pershing A.J. Slow adaptation in the face of rapid warming leads to collapse of the Gulf of Maine cod fishery // *Science.* 2015. Vol. 350. № 6262. P. 809–812.
236. Report of the Standing Committee on Fisheries and Oceans www.ourcommons.ca/Content/Committee/421/FOPO/Reports/RP8826804/foporp10/foporp10-e.pdf.
237. Карпинский М.Г. Экология бентоса Среднего и Южного Каспия. – М.: Изд-во ВНИРО, 2002. – 283 с.
238. Hoyle J. Proceedings of a workshop on the dynamics of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) in the Great Lakes. 2005. P. 47–61.
239. Barrowman N.J., Myers R.A. Still more spawner-recruitment curves: the hockey stick and its generalizations // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* 2000. Vol. 57. P. 665–676.
240. Schijns R., Froese R., Hutchings A. Five centuries of cod catches in Eastern Canada // *ICES Journal of Marine Science.* 2021. DOI: 10.1093/icesjms/fsab153.
241. Dew C.B., McConnaughey R. A. Did trawling on the brood stock contribute to the collapse of Alaska's king crab? // *Ecological Applications.* 2005. Vol. 15. P. 919–941.
242. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 сентября 2017 г. № 1115-ст.
243. Бабаян В.К. Рациональный подход к разработке ежегодных прогнозов ОДУ для запасов средне- и длинноцикловых видов рыб // *Вестник Камчатского государственного технического университета.* 2012. № 21. С. 30–34.
244. Шibaев С.В. Системный анализ в рыбохозяйственных исследованиях. – Калининград, 2004.
245. Булатов О.А., Васильев Д.А. О наличии "системных ошибок" в принимаемых ИКЕС решениях, касающихся оценки ОДУ // *Вопросы рыболовства.* 2021. Т. 22. № 1. С. 16–24.
246. Шibaев С.В., Алдушин А.В., Чиклиненков В. С., Осадчий В. М. Концепция информационного обеспечения управления водными биоресурсами внутренних водоемов и прибрежных морей и ее реализация на примере Калининградской области // *Рыб. хоз-во.* 2009. № 3. С. 42–45.
247. Шibaев С.В., Соколов А.В. Метод анализа ихтиоценозов малых озер Калининградской области на основе контрольных обловов сетных орудий лова // *Тр. ВНИРО.* 2013. Т. 151. С. 158–164.

248. Марти Ю.Ю. Биологическая продуктивность Каспийского моря. – М., 1974.
249. Переварюха Ю.Н. Некоторые закономерности проникновения принципов популяционного мышления в нормативную правовую базу охраны природы и сохранение биологического разнообразия при искусственном воспроизводстве осетровых // Вестник АГТУ. 2010. № 2. С. 74-78.
250. Смирнов А.Ю., Криксунов Е.А., Герцев В.И., Решетников Ю.С., Михайлов В.В., Булгакова Т. И. Имитационное моделирование в решении задач прогнозирования состояния запасов и оптимизации промысла рыб. – Петрозаводск, 1987. – 63 с.
251. Бабаян В. К. Математические методы теории рыболовства (модели изолированных популяций). – М.: Изд-во ЦНИИТЭИРХ, 1990. – 76 с.
252. Куликов Е. В., Кадимов Е. Л. Временной метод определения численности рыб в рыбопромысловых реках // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 68–76.
253. Малкин Е.М. Репродуктивная и численная изменчивость промысловых популяций рыб. – М.: ВНИРО. 1999. – С.146.
254. Державин А.Н. Севрюга. Биологический очерк. Баку. 1922, 112 с.
255. Салтанов Ю. М. Промысловая ихтиология : курс лекций. Горки : БГСХА, 2021. 103 с.
256. Fry F. Statistics of lake trout fishery // *Bimetrics*. 1949. Vol. 5. P. 26-67.
257. Ходоревская Р.П. Состояние промысловых запасов осетровых и определение величины допустимых уловов в Волго-Каспийском регионе // Динамика численности промысловых рыб. – М.: Наука, 1986. – С. 199.
258. Михайлов В.В., Казанский А.Б. Алгоритмическая модель озерного рыбопитомника. – Л.: ЛИИАН, 1989. – 30 с.
259. Малкин Е.А. Эволюционные аспекты репродуктивной изменчивости популяций рыб // Вопросы ихтиологии. 1991. Т. 31. № 4. С. 606-614.
260. Гаврилов Г.М. Динамика вылова методические основы оценки запасов прогнозирования общего допустимого улова (ОДУ) и возможного вылова (вв) промысловых рыб в экономической зоне России дальневосточных морей // Успехи современного естествознания. 2014. № 5. С. 55.
261. Марти Ю.Ю. Вопросы развития осетрового хозяйства в Каспийском море. – М. 1972.
262. Микони С.В. Теория принятия управленческих решений. – М.: Лань, 2022. – 448 с.
263. Науман Э. Принять решение но как? – М.: Мир, 1987.
264. Зайцева Ю.В. Сценарное моделирование динамики демографических процессов (на примере Волгоградской области)// Проблемы прогнозирования. 2013 . № 6. С. 67-79.
265. Булгакова Т. И., Кульба С.Н., Пятинский М.М. Моделирование сценариев восстановления запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря при отсутствии естественного воспроизводства // Вопросы ихтиологии. 2022. Т. 62. № 2. С. 198-208.
266. Булгакова Т. И. Сценарное моделирование, направленное на тестирование правила регулирования промысла Северо-Восточной арктической трески // Рыбное хозяйство. 2009. № 4. С. 77-80.
267. Powell F. Climate adaptation in the market squid fishery: fishermen responses to past variability associated with El Niño Southern Oscillation cycles // *Climatic Change*. 2022. № 1. P. 22-34.
268. Puvanendran V. Cannibalism of Atlantic cod *Gadus morhua* larvae and juveniles on first-week larvae // *Aquatic Biology*. 2008. Vol. 2. P. 113-118.

269. Дворецкий А.Г., Дворецкий В.Г. Динамика популяционных показателей камчатского краба Баренцева моря в 2002–2008 гг. // Вопросы рыболовства. 2010. Т. 11. № 1 (41). С. 100–111.
270. Morón M., Ruiz Del Portal F.R. A Note about the Shape of Attractors of Discrete Semidynamical Systems // Proceedings of the American Mathematical Society. 2006. Vol. 134. P. 2165–2167.
271. Bajaj A.K. Examples of Boundary Crisis Phenomenon in Structural Dynamics // International Series of Numerical Mathematics. 1991. Vol. 91. P. 48–73.
272. Richetti P., DeKepper P., Roux J.C. A crisis in Belousov-Zhabotinskii reaction: experiment and simulation // J. Stat. Phys. 1987. Vol. 48. P. 977–990.
273. Feigenbaum M. Quantitative universality for a class of non linear transformations // J. Stat. Phys. 1978. Vol. 19. P. 25–52.
274. Couillet P., Tresser C. Iteration d'endomorphismes et groupe de renormalisation // Journal de Physique Colloques. 1978. Vol. 539. P. 5–25.
275. Peterman R. Possible solutions to some challenges facing fisheries scientists and managers // ICES Journal of Marine Science. 2004. Vol. 61. P. 1331–1343.
276. Peterman R. Spatial and temporal patterns of covariation in productivity of Chinook salmon populations of the Northeastern Pacific // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2017. Vol. 75. P. 145–168.
277. Larkin P.A., Raleigh R.F. Some alternative premises for constructing theoretical reproduction curves // J. Fish. Res. Board Can. 1964. Vol. 21. P. 477–484.
278. Магницкий Н.А., Сидоров С.В. Новые методы хаотической динамики. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 320 с.
279. Лукьянова Л.М. Системность решений по рыбохозяйственному комплексу // Рыбное хозяйство. 2014. № 5. С. 13–18.
280. Лукьянова Л.М., Заболотский В.П. Обеспечение результативности системного анализа в производственной сфере // Материалы конференции "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2014). 2014. С. 407–409.
281. Евсеева Н.В. Современное состояние ресурсов и рекомендации по рациональному ведению промысла морского ежа *strongylocentrotus intermedius agassiz* в Южно-Курильской промысловой зоне // Труды СахНИРО. 2006. Т. 8. С. 128–137.
282. Савченко А.В. Рефлективные основания механизма принятия решения. – М.: Из-во Гребенникова, 2002.
283. Новикова Д.А. и Чхартишвили А.Г. Рефлексия и управление: математические модели. – М.: Физматлит, 2013.
284. Матвеев В.В. Сценарное моделирование глобальных процессов управления // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2016. № 2. С. 136–150.
285. Лефевр В.А. Рефлексия. – М.: КогинтоЦентр. 2003. – 496 с.
286. Лепа Р.Н. Рефлексия принятия решений в экономике // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2014. № 3. С. 4–12.
287. Бабаян В.К., Ефимов Ю.Н. Эволюция теоретических основ рекомендаций ИКЕС по управлению промысловыми запасами с помощью ОДУ // Тр. ВНИРО. 2005. Т. 145. С. 7–13.
288. Barrett R. Population dynamics of the Peruvian anchovy // Mathematical Modelling. 1985. Vol. 6. Iss. 6. P. 525–548.
289. Русаков А.В., Бобырев А.Е., Бурменский В.А., Криксунов Е.А., Математическая модель озерного сообщества с учетом целочисленности размера популяции: хаотические и долгопериодные колебания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 229.

290. Ердаков Л.Н. Многолетние циклы в популяциях животных. – Новосибирск, 2020.

291. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 сентября 2017 г. № 1115-ст.

292. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Глобальная динамика экосистем: природные изменения и антропогенные воздействия // Известия Русского географического общества. 2006. Т. 138. № 4. С. 1–14.

293. Филин А.А. Реализация экосистемного подхода к управлению биоресурсами Баренцева моря // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2004. Т. 137. С. 67–76.

Издатель – Российская академия наук
Публикуется в авторской редакции.

Подписано в печать 18.10.2023.
Формат 70x100/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Уч.-изд. 17,66 л. Усл.-печ. 21,54 л. Заказ № 3168.3. Тираж 300.

Отпечатано в типографии ООО «Принт».
426035, г. Ижевск, ул. Тимирязева, 5.

Издается по решению Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН) от 31.03.2023 г.
и распространяется бесплатно