

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА

Работа выполнена в Институте эволюционной физиологии и биохимии
им. И.М.Сеченова РАН (ИЭФБ РАН)

На правах рукописи

СЛАВИНСКИЙ Дмитрий Анатольевич

УДК 573.22; 574; 581.524

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРИЗИСНЫХ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ ЭКОСИСТЕМ
НА ПРИМЕРЕ ДИНАМИКИ
СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ**

03.00.16 - Экология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва - 2006 г.

Научный руководитель:	доктор биологических наук В.Ф. Левченко (ИЭФБ РАН)
Научный консультант:	доктор биологических наук, профессор А.К. Бродский (СПбГУ)
Официальные оппоненты:	доктор биологических наук А.И. Азовский (МГУ) доктор биологических наук В.В. Хлебович (ЗИН РАН)
Ведущая организация:	Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

Защита состоится 25 мая 2006 года в _____ часов на заседании
Специализированного диссертационного совета Д501.001.55 в Московском
государственном университете им. М.В.Ломоносова по адресу: Москва, Ленинские
горы, МГУ, Биологический факультет, ауд. 389.

Отзывы просим направлять по адресу: 119899, Москва, Ленинские горы,
МГУ, Биологический факультет, Ученый Совет Д501.001.55

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного университета

Автореферат разослан 24 марта 2006 г.

Ученый секретарь
Специализированного
диссертационного совета Д501.001.55



Н.В. Карташева

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Нарастание экологических проблем, перед которыми сегодня оказалось человечество, представляет собой результат многоаспектного влияния человека на биотическую и абиотическую составляющие биосферы. В настоящее время в биосфере происходят локальные и глобальные изменения, характеризующиеся как кризисные процессы. Сложным для понимания является выявление последствий кризиса и определение дальнейшего хода событий в развитии систем. Наиболее актуальными являются следующие вопросы: какие воздействия способствуют возникновению кризисных явлений в экосистемах; по каким признакам можно предсказать наступление кризисного этапа и степень кризисности экосистемы; чем характеризуется кризисный этап развития системы; каковы механизмы управления системой, способствующие ее выходу из кризиса? Для того чтобы ответить на данные вопросы необходимо исследовать закономерности развития экосистем, особенно в нестабильных, критических условиях.

Одним из главных факторов, по которому возможно отслеживание структурно-функциональных трансформаций, происходящих в экосистеме, является изменение динамики биологического разнообразия. Деграция биоразнообразия относится к числу основных причин, способствующих нарастанию экологического кризиса, как на локальном, так и на глобальном уровнях. Биоразнообразие тесно связано с организацией экосистем, устойчивость которых определяется возможностью воспроизведения живым веществом своих средообразующих функций. Биотические механизмы устойчивости определяют стабильность локальных и региональных природных систем вплоть до биосферы.

Проблемы исследования нарушения и сохранения биологического разнообразия является многоаспектной задачей, и одним из первых ее этапов является мониторинг биоразнообразия. На основании выявленных закономерностей и тенденций возможно построение долгосрочного экологического прогноза. Одной из важнейших на сегодня задач сохранения биоразнообразия является выявление закономерностей структурно-функциональных изменений в экосистемах разных уровней организации и масштаба. Решение данной проблемы связано с изучением механизмов управления и процессов самоорганизации, присущих биологическим системам. При этом важную роль играет научное диагностирование и прогнозирование поведения экосистем в кризисные этапы развития. Как отмечал В.В. Станчинский, научное прогнозирование должно охватывать не только небольшие интервалы времени, но и «...установление прогноза в эволюции природных комплексов, происходящих в процессе многолетних циклов и вековых изменений» (Станчинский, 1938, с. 41). Решение этой проблемы он связывал с длительными стационарными, комплексными исследованиями на базе заповедников, а также с палеоэкологическими изысканиями.

Решение проблем сохранения биоразнообразия и исследования кризисных процессов является комплексной задачей, требующей для своего решения междисциплинарного подхода. С использованием концептуального аппарата и теоретических обобщений таких дисциплин как палеонтология, экология, биология, география, общая теория систем, теория самоорганизации и др., становится возможным проведение комплексного исследования кризисных процессов в экосистемах. В настоящее время наиболее изученными являются стационарные этапы развития экосистем. Кризисные явления активно изучаются в палеонтологических исследованиях (Жерихин, 1978, 1984, 1997; Барсков, 1996; Красилов, 1985, 1989; Вахрушев, 1993; Раутиан, 1988, 1997; Расницын, 1988; Алексеев, 1990, 1998; Kauffman S.A., 1993; Kauffman E.J., 1986; Newell, 1986, Newman, 1996; Sepkoski, 1986, 1995; Vak, 1996), имеется множество работ, посвященных описанию критических состояний в современных биологических и географических системах (Горшков, 1990, 1998; Арманд, 1983, 1988; Виноградов, 2000, 2005; Максимова, 2003, 2005; Кучерук, 2002, 2006; Котляков, 1993; Покровская, 1972; Пузаченко, 1992; Свирежев, 1978, 1987, и др.).

Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является изучение закономерностей кризисных этапов развития экосистем на примере динамики структурно-функциональных изменений.

Эта цель определила следующие задачи исследования:

1. Рассмотреть на примере динамики структурно-функциональных изменений процессы, происходящие в различных экосистемах на кризисных этапах развития.
2. Выявить этапы протекания кризисных процессов.
3. Выявить процессы, симптомы и показатели, отображающие динамику структурных и функциональных изменений в экосистеме в кризисные этапы развития.
4. Разработать общую модель динамики протекания кризисных процессов в экосистемах.
5. Разработать методические подходы к изучению кризисных процессов в экологических системах.

Объект и предмет исследований

Объектом исследования являются экологические системы различных уровней организации и масштаба, подверженные кризисным процессам.

Предметами исследования являются закономерности протекания кризисных явлений и процессы самоорганизации, отображающие динамику структурно-функциональных изменений экосистем.

Научная новизна:

Научная новизна работы заключается в теоретическом и практическом обосновании ряда положений, имеющих значение для развития методологии и методики проведения анализа протекания кризисных явлений в экосистемах различных уровней организации и масштаба:

- разработана универсальная схема кризисных этапов развития экосистем на основе синтеза частных кризисных явлений, имевших место в различных экосистемах (на основе палеонтологических материалов и данных современных стационарных исследований в заповедниках);
- выявлены аналогии протекания кризисных процессов в различных типах экосистем, выявлены и обобщены процессы, симптомы и показатели (индикаторы) для каждого этапа кризиса;
- разработана методика проведения кризис-мониторинга, позволяющая осуществлять комплексное исследование кризисных явлений в экосистемах различных уровней организации и масштаба: выявлять закономерности протекания кризисных явлений, определять этапы развития кризиса, осуществлять прогнозирование дальнейшего развития экосистемы с целью принятия научно обоснованных управленческих решений.

Практическая значимость:

Результаты исследования могут быть использованы:

- при проведении мониторинга для определения степени кризисности экосистем, находящихся под воздействием природных и антропогенных факторов;
- в качестве научного обоснования выработки и принятия управляющих решений для осуществления коррекции хода развития кризиса на основе закономерностей протекания кризисных явлений и процессов самоорганизации;
- для определения этапа кризиса и специфики его протекания на основе выявленных универсальных показателей протекания кризисных процессов.

Апробация работы

Результаты работы доложены на научно-практических конференциях в г. Санкт-Петербурге (1997-2006 г.), на Международном семинаре «Nordic-Russian-Baltic GIS and biodiversity workshop» в Тварминне, Финляндия в 1999 году, на Научно-практическом семинаре «Теоретические основы биоразнообразия» в г. Санкт-Петербурге в 2000 году, на семинарах кафедры «Зоология беспозвоночных» СПбГУ, кафедры «Экология» МЦ СПбГУ, на семинарах лаборатории Моделирования эволюции ИЭФБ им. И.М. Сеченова РАН в 2000-2006 г., на летнем международном Сертификационном курсе «Устойчивое развитие и экологический менеджмент» в

2005 г. (Санкт-Петербург).

Результаты исследований с 1998 года используются в процессе обучения студентов специальности 013100 «Экология» на биолого-почвенном, геологическом факультетах и факультете географии и геоэкологии СПбГУ, а также в учебном процессе Центра переподготовки и повышения квалификации по естественнонаучным направлениям (ЦППК ЕН) СПбГУ, в образовательных курсах «Устойчивое развитие и экологический менеджмент» Программы сотрудничества между СПбГУ и Университетом Калифорнии, Беркли (США). По результатам работы над диссертацией опубликовано 13 печатных работ, в том числе 1 коллективная монография и учебно-методические рекомендации для проведения курсов лекций.

Структура диссертации и объем работы

Диссертационная работа включает в себя введение, 6 глав, выводы и список использованной литературы (общее число работ более 300, из них на иностранном языке более 50). Объем диссертации составляет 197 страниц машинописного текста, включая 18 таблиц, 36 рисунков, 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена актуальность работы, обоснован выбор объекта исследования, определены цели и задачи, отмечена научная новизна результатов исследования.

В **первой главе «Кризисные явления и их роль в динамике развития экосистем»** рассмотрена общая динамика развития систем. Особое внимание уделено нестабильным, кризисным этапам развития систем, рассмотрено понятие «кризис» с точки зрения различных научных дисциплин. Выявлено, что кризис как процесс – универсальное явление, имеющее место в системах различной природы. Исследованием кризисов занимаются различные области знания – трактовка понятия кризиса и внутреннее наполнение сути этого явления имеет много вариантов в зависимости от научной дисциплины, изучающей кризис, от направленности, глубины и специфики рассмотрения. Это привело к неоднозначности толкования, как термина «кризис», так и динамики кризисных процессов.

В данной работе под кризисом понимается процесс быстрых, качественных изменений, сопровождаемый перестройкой в структурной и функциональной организации системы с переходом системы либо в стационарный режим, но в измененном состоянии, либо в катастрофу. Для экосистемы кризисом является организационная перестройка, имеющая характер быстрых динамических изменений, выходящих за рамки стабильного сукцессионного процесса.

Рассмотрена типология кризисов и основные черты кризисных процессов, характерные для различных систем. Кризисные процессы рассматривались с позиции различных областей деятельности человека, непосредственно имеющих дело с кризисами – общая теория систем, теория самоорганизации, физиология, биология, экология, палеонтология, экономика, этнология и др.

Вторая глава «Экосистема как объект изучения кризисных явлений» посвящена рассмотрению экосистемы как открытой сложной системы, имеющей определенную структуру, динамику, свойства и т.д. Проведен обзор структурно-функциональных аспектов организации экосистем, иерархических уровней организации и динамики экосистем, механизмов управления и процессов самоорганизации. Механизмы управления, как важный элемент поведения экосистемы в кризисе, были рассмотрены на уровне: экосистем, сообществ, популяций и особей.

Рассмотрены различные подходы к оценке состояния экосистем: анализ реакции популяций и сообществ на возмущающие воздействия; биоиндикация возмущающих факторов; биоиндикация биогенного круговорота основных химических элементов и показателей биологической продуктивности; биомониторинг временных характеристик экосистем. Рассматривая динамические процессы, происходящие в экосистемах, было изучено соотношение понятий «сукцессия» и «кризис». Сукцессия представляется как закономерный последовательный ряд фаз развития какой-либо экосистемы, это ее путь, траектория развития. Кризис – событие на этом пути, имеющее специфический тип динамики и которое не является характерным для какой-либо конкретной фазы сукцессии. Кризис представляет собой «скользящее» событие, которое может

произойти не только в силу закономерных причин (например, смена сукцессионных фаз), но и случайным образом, на любом этапе развития экосистемы. Особое внимание уделено рассмотрению критериев, характеризующих изменения в сообществах, посредством изучения показателей структурно-функциональных изменений.

Третья глава диссертации «Методика и материалы исследований» включает обзор используемых материалов и методов анализа кризисных процессов систем, а также разработанную методику исследования кризисов в экосистемах.

Обосновывается необходимость комплексного исследования кризисов с использованием концептуального аппарата системных дисциплин: общей теории систем, теории самоорганизации, теории катастроф и др. Синтез методологических подходов, теоретических положений и результатов практических исследований различных дисциплин осуществляется на основе системного изоморфизма, который позволяет выявить и сопоставить общие закономерности кризисных процессов в различных системах. В основу изучения кризисных явлений в экосистемах положен фактологический материал палеонтологических исследований, а также результаты исследований кризисных явлений, имевших место в водных и наземных экосистемах Особо охраняемых природных территорий (ООПТ) России.

В **четвертой главе «Разработка системной модели кризисных этапов развития экосистем»** на основе предлагаемого методологического подхода, используя палеонтологические данные и фактологический материал исследований в ООПТ, проведена теоретическая разработка общей схематической модели протекания кризисных явлений в системах. На основе разработанной методики «Кризис-мониторинга» проведен анализ кризисных явлений, имеющих место в экосистеме Черного моря.

Проработана типология кризисов, описана системная модель протекания кризисных процессов в экосистемах, описаны факторы, способствующие распространению кризисных процессов по иерархии экосистем. Приводятся результаты разработки общих закономерностей зависимости хода развития и результатов кризиса от типологии возмущающего воздействия.

Пятая глава «Моделирование кризисных процессов в экосистемах» представляет результаты апробации разработанной системной модели развития кризиса (глава 4) на примере конкретных биотических кризисов (по палеонтологическим данным) и кризисных процессов в современных экосистемах (по данным ООПТ). Основой для изучения кризисных процессов явились следующие материалы:

1. Процессы продолжительного сухоходольного заболачивания (Центрально-Лесной государственный заповедник);
2. Смена полусуходольных и переходных биогеоценозов низинными под воздействием подтопления территории в результате заполнения водохранилища (по данным Добровольского Г.В., 1958; Владычинского С.А., 1960; Емельянова А.Г., 1975);
3. Перевыпас (на примере выпаса скота в степи, эксплуатации пастбищ лёссовых равнин и предгорий Средней Азии, степей Юго-Восточной Украины, Забайкалья) (по данным Формозова А.Н., 1962; Бурыгина В.А., Марковой Л.Е., 1977; Горшковой А.А., 1954; Горшковой А.А., Гриневой Н.Ф., 1977);
4. Экосистема Валдайского озера в условиях антропогенного давления (по данным Покровской Т.Н., 1979);
5. Переход через критические состояния на примере границ лесных ландшафтов с безлесными (по данным Арманда А.Д. и Кушнаревой Г.В., 1989);
6. Филоценогенез и эволюционные кризисы (по данным В.В.Жерихина и А.С.Раутиана, 2003);
7. Юрский экологический кризис сообщества наземных тетрапод (по данным Н.Н.Каландадзе и А.С.Раутиана, 1993);
8. Количественные закономерности макроэволюции (по данным А.В.Маркова и Е.Б.Наймарк, 1998)
9. Структура вымираний морских биот в меловом периоде (по данным Э.Кауффмана, 1986);
10. Динамика границ растительных сообществ на примере лесостепных комплексов экосистем Среднего Поволжья (Заповедник «Приволжская лесостепь»);
11. Симптоматика биотических кризисов на примере: глобального кризиса континентальных биоценозов суши и пресных водоёмов в середине мелового периода; глобального юрского

кризиса в сообществе наземных (не морских) тетрапод (по данным А.Л.Вахрушева и А.С.Раутиана, 1993, 1996);

- Бореальные лесные сообщества: формирование и восстановление стационарного состояния лесных экосистем после внешних нарушений (по данным В.В.Горшкова, 1998);
- Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды (антропогенное воздействие) (по данным С.С.Бариновой, Л.А.Медведевой, О.В.Анисимовой, 2000);
- Деградации дубрав Нижегородской области под влиянием антропогенного воздействия (Государственные памятники природы Нижегородской области);
- Структурные изменения в экосистемах, вызванные подъемом уровня Каспийского моря (Астраханский биосферный заповедник) (в сводн. табл. 3-6.: 15(1) – водоплавающие птицы, 15(2) - растительность, 15(3) – иктиофауна, 15(4) – зоопланктон, 15(5) – водные и амфибиотические насекомые, 15(6) - млекопитающие);
- Закономерности послепожарной динамики растительности (Государственный природный заповедник «Верхне-Тазовский»);
- Воздействие экстремальных климатических факторов (низких температур) на дубы (Жигулевский государственный заповедник им. И.И.Спрыгина);
- Деградации дубов Поволжья (по данным сайта <http://oaks.forest.ru/region/sredvolga/>);
- Антропогенный пресс на природные экосистемы (Центрально-черноземный биосферный заповедник);
- Массовый ветровал лесов таежной зоны (Центрально-Лесной государственный заповедник);
- Кризисные явления в бассейне Черного моря под влиянием вида-вселенца *Mnemiopsis leidyi* (Институт океанологии им. П.П.Ширшова) (в сводн. табл. 3-6.: 21(1) – макрофитобентос, 21(2) – макрозообентос, 21(3) – иктиофауна, 21(4) - зоопланктон);
- Сверхвысокие концентрации биогенных элементов в сообществе морского микробентоса (по данным И.В.Бурковского, 2004).

Результаты исследования данных примеров кризисных процессов в различных экосистемах представлены в сводных таблицах 3-6, обобщающей характерные этапы, процессы, симптомы и показатели кризисных процессов.

В шестой главе «Анализ закономерностей протекания кризисных процессов» приводится обобщение результатов рассмотрения кризисных процессов в различных экосистемах. Проводится сопоставление теоретических разработок (общей системной модели кризисных явлений) и результатов моделирования конкретных экосистем. Описание выявленных закономерностей приводится в сводной комплексной схеме, включающей в себя этапы (фазы), процессы, симптомы и показатели протекания кризисных процессов в экосистемах. Приводится сопоставление выявленных закономерностей развития кризисных процессов с общими закономерностями развития систем, обобщенных Н.Ф. Реймерсом (1994). Закономерности, представленные в его работе имеют общесистемный характер и отображают процессы различных стадий развития и эволюции систем (в том числе экосистем). Построена структурная схема кризиса, представлены главные отличия кризисных и стабильных этапов развития экосистем.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ, СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРЕДМЕТ ЗАЩИТЫ

Обзор существующих представлений об этапности кризисов выявил, что фазы, представленные различными авторами, по характеристике процессов не соответствуют друг другу (даже при наличии аналогичных названий фаз). Это объясняется тем, что авторы рассматривали кризисные фазы с разной детализацией. В связи с этим происходит некоторое перекрывание обозначенных процессов и явлений, что затрудняет возможность взаимного сопоставления и переноса закономерностей кризиса между различными классификациями и моделями.

В данной работе разработана **универсальная этапность протекания кризисных процессов**, включающая в себя наиболее общие фазы и процессы кризиса (см. рис. 2):

- Предкризис
- Разрушение структуры
- Хаос
- Ядра кристаллизации

5. Становление первичной структуры
6. Вторичный кризис
7. Построение вторичной структуры

Разработанные этапы имеют условно-системные названия, характеризующие сущность, основные характерные черты происходящих на данном этапе кризиса изменений в системе. Выявление, разработка и описание каждого этапа кризиса в данной работе позволило сопоставить представляемую другими авторами классификацию этапов кризисов (табл. 1).

Таблица 1. сопоставление этапности кризиса различных авторов

Предкризис:	Фаза нарушения		Фаза становления		Оптимизация	Катастрофа	Авторы
	Разрушение структуры	Хаос	Ядра кристаллизации	Стабилизационные процессы			
Потенциальный кризис	Субтельный кризис	Острый преволеальный кризис	Острый преволеальный кризис				Клузек И. (1997)
Подготовительная фаза (предкризис)	Переходная фаза	Древнейшая фаза					Фаза угасания (посткризис)
Предкризис:	Снижение флуктуирующей нестатистической устойчивости	Кризис	Младший кризис	Центральная фаза	Посткризис	Стабилизация и оптимизация (новой) структуры	Жеронин В.В., Раутиан А.С. (1993)
Предкризис:	Углубление роли флуктуирующей нестатистической устойчивости	Суверенизация групп	Деструкция инновационных структур	Деструкция инновационных структур	Стабилизация и оптимизация (новой) структуры	Новообразование, появление новых таксонов, новых доминантов	Каштан Е. Г., Фишер А. В. (1996)
Предкризис:	Появление новых видов, сигналов, структур	Деструкция	Деструкция	Деструкция	Деструкция	Усложнение структуры	Буданов В.Г. (1988)
Появление новых «компонентов»	Диффузия новых технологий по отрасли	Бегство в хаос	Бегство в хаос	Бегство в хаос	Бегство в хаос	Выход из хаоса	Кондратьев Н.Д. (1993)
Фаза срытого кризиса (предкризис)	Источники ресурсов	Периодическая фаза. Появление и нарастание негативных последствий	Кризис	Фаза восстановления	Фаза восстановления	Восстановление ресурсно-экологического равновесия	Арманд А.Д., Жеронин В.В., Лери Д.И. (1998)
Предкризис:	Максимальное потребление ресурсов	Кризис	Максимальное потребление ресурсов	Кризис	Катастрофа	Катастрофа	Криксувский А.А., Арманд А.Д., Жеронин В.В., Лери Д.И. (1999)
Фаза зрелости	Фаза роста	Фаза зрелости	Фаза зрелости	Фаза зрелости	Фаза зрелости	Фаза зрелости	Богданов А.А. (1989)

Каждый этап кризиса характеризуется протекающими на нем процессами, их симптоматикой и специфической динамикой ряда показателей (более подробно – см. табл.3-6).

Так как исследование кризисных процессов проводилось на примере различных экосистем (различный тип, иерархический уровень, масштаб, временной диапазон рассмотрения, характер возмущающего воздействия и др.), для описания каждой из них требуется свой спектр конкретных показателей, учитывающий специфику ситуации. Для общего комплексного представления о процессах, состоянии и степени кризисности экосистем, в данной работе выявлены, разработаны и обобщены **группы показателей**, отображающие общие структурные, функциональные, временные, пространственные изменения и общесистемные (комплексные) свойства (см. табл. 3-6). На основе общих качественных показателей, при рассмотрении конкретных кризисных событий в реальных экосистемах, выделяются показатели, способные дать количественную оценку происходящим явлениям.

Для составления целостной комплексной картины протекания кризисных процессов, в данной работе сформирован **методологический подход**, основанный на методе системного анализа с использованием концептуального аппарата общей теории систем, теории самоорганизации, теории катастроф, экологии, биологии, палеонтологии. Применение данного подхода предполагает использование общесистемного терминологического аппарата при описании кризисных процессов в экосистемах. Тем самым достигается унификация описания закономерностей процессов развития различных экосистем, исследуемых в данной работе.

На основе этого подхода в работе описана последовательность протекания и проведена этапизация кризисных явлений в различных экосистемах, а также выявлены общие закономерности протекания кризисных процессов. Понятие «система» используется в нескольких контекстах при описании разных объектов исследования: экосистем различных временных масштабов (современных, палеоэкосистем), различных иерархических уровней (от локальных до региональных экосистем), различных типов (морских, озерных, луговых, лесных, болотных). Выделяются следующие иерархические уровни: система → экосистема, подсистема → сообщество, элемент системы → видовая популяция (таксон).

Структура междисциплинарного методологического подхода, разработанного и применяемого в данной работе, схематично представлена на рис. 1.

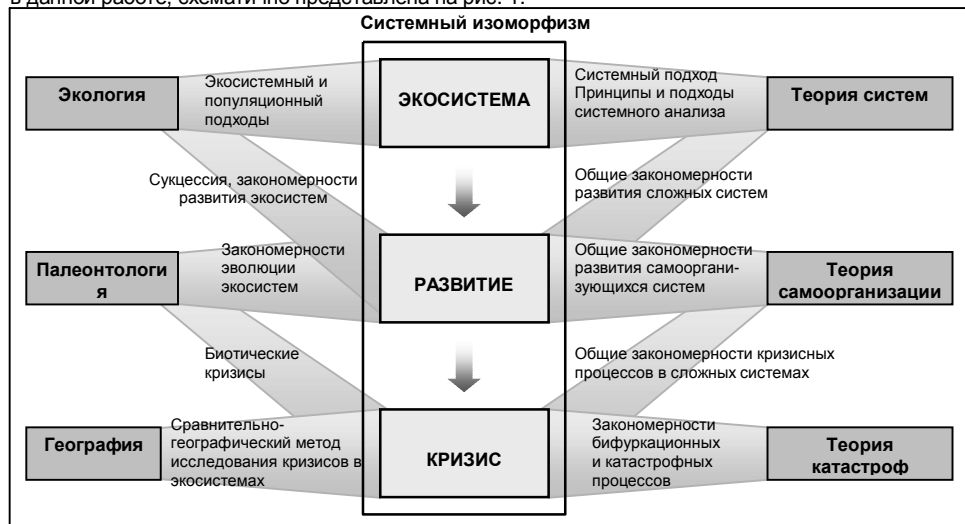


Рис. 1. Структура междисциплинарного методологического подхода

Как показывает анализ, многие важные кризисные процессы не отслеживаются в процессе стандартного мониторинга экосистем. В данной работе разработана методика проведения мониторинга кризисных процессов (кризис-мониторинг), включающая в себя наряду со стандартными процедурами (учет биоразнообразия, геохимических, гидрологических и др. процессов) системные исследования – рассмотрение экосистем с позиции сложных самоорганизующихся систем. Это обусловлено тем, что в настоящее время системами дисциплинами (общая теория систем, теория самоорганизации, теория хаоса и др.) накоплен богатый теоретический и практический материал о кризисных процессах и явлениях в системах различной природы.

В методике кризис-мониторинга представлен исследовательский блок рассмотрения экосистем с позиции системно-синергетического подхода: перечень дополнительных этапов изучения кризисов в экосистемах см. табл. 2.

Таблица 2. Методика кризис-мониторинга

Блок	№	Название этапа	Содержание этапа
Базовая информация об экосистеме	1	Выявление объекта исследования - экосистемы	Выявление границ исследуемой экосистемы, определение ее места в иерархии уровней экосистем (определение выше и ниже лежащих экосистем). Определение условий существования экосистемы (географических, климатических и т.д.)
	2	Определение этапа развития экосистемы	Выявление этапа сукцессии и динамики развития экосистемы на данном этапе.
	3	Оценка биоразнообразия	Определение видового состава экосистемы (числа и численности видов), специфики комплекса биоты.
	4	Определение структурно-функциональных аспектов экосистемы	Выявление доминантных и субдоминантных видов, построение трофической схемы экосистемы, определение взаимосвязей, потоков энергии; выявление видов, находящихся под угрозой исчезновения.
Кризис-мониторинг	5	Системный анализ рассматриваемой экосистемы	Описание с позиции системного подхода организации экосистемы – структуры, функционирования, динамики и этапов развития.
	6	Анализ кризисности этапа развития экосистемы	Выявление критических отклонений в структуре и динамике сообщества. Проведение сравнительного анализа показателей состояния и динамики биоразнообразия с системой критериев (симптоматикой) этапов кризиса. Выявление степени кризисности экосистемы и этапа кризиса по симптомам, характеризующим динамику явлений.
Выработка управляющих воздействий.	7	Прогнозирование дальнейшего хода развития кризиса системы	Определение характера протекания кризисных явлений, выявление динамики дальнейшего хода кризиса, определение набора сценариев. Прогноз будущей структуры экосистемы (доминантный состав, сукцессионный ряд и т.д.). Прогнозирование посткризисного развития.
	8	Управление ходом дальнейшего развития системы	Определение желаемого состояния экосистемы и пути выхода из кризиса. Принятие управляющих решений и выработка системы управляющих воздействий (место, время, сила воздействия). Введение коррективов в ход кризиса (интродукция, энергетическая подпитка и т.д.).

Первые четыре этапа исследования осуществляются на основе стандартной процедуры мониторинга, проводимого в ООПТ. Последующие 2 этапа анализа (5-6) проводятся на основе разработанной в данной работе модели и симптоматики кризисных процессов. Выработка управляющих воздействий (этапы 7-8) предполагает (при возможности) управление кризисной ситуацией. Выработка типов управляющих воздействий не предполагалась в данном исследовании, поэтому в таблице приводятся только основные аспекты возможных действий на этом этапе. Более подробно этапы 5-6 кризис-мониторинга представляет собой следующую последовательность анализа:

1. Соотношение «объект - система». Определение системы

2. Дисциплина (аспект) рассмотрения системы
3. Границы системы
4. Этап развития системы
5. Внешняя среда (надсистема, соседние одноуровневые системы)
6. Иерархический ряд в системе (подсистемы, компоненты, элементы)
7. Структура системы (отношения, взаимосвязи)
8. Отбор параметров порядка
9. Управление в системе (механизмы, уровни)
10. Динамика развития системы, отбор показателей динамики
11. Состояние системы, диапазоны отклонений динамики. Определение показателей, выходящих за допустимые диапазоны
12. Критические звенья
13. Предкризисные явления
14. Этапность кризиса

Последние четыре пункта процедуры (11-14) представляют собой отдельную методику, имеющую собственную этапность и последовательность анализа кризиса. Одной из задач данного исследования являлось разработка именно этих пунктов методики кризис-мониторинга. Анализ развития кризисных явлений в экосистемах осуществляется по разработанной методике посредством построения орграфических моделей (блок-схем).

Разработка и использование методики кризис-мониторинга экосистем позволит проводить комплексное исследование кризисных явлений в экосистемах различных уровней организации и масштаба. То есть, позволит выявлять закономерности протекания кризисных явлений и нарушения процессов самоорганизации; определять этапы развития кризиса в системе; осуществлять прогнозирование дальнейшего развития экосистемы с целью принятия научно обоснованных управленческих решений.

На основе используемого в работе методологического подхода, разработанной методики и системы показателей, характеризующих динамику структурно-функциональных изменений в кризисные этапы развития экосистем, разработана **общая системная модель протекания кризисных процессов** (рис. 2).

Развитие кризиса происходит по определенным закономерностям. Различными могут быть пути развития кризиса, которые определяются степенью глубины (масштабностью) кризиса, характером внешних воздействий и спецификой организации рассматриваемой системы. В зависимости от степени глубины кризиса, экосистема может претерпевать различные изменения: от незначительных структурных изменений до полного разрушения системы.

Динамику кризиса можно описать как последовательный процесс, протекающий от фазы к фазе, где каждый предыдущий этап кризиса подготавливает (но не предопределяет) следующий, влияет на характер, темпы, направленность дальнейшей динамики, обуславливает саму возможность ее продолжения.

Основным результатом проведенного исследования является системное описание протекания кризисных процессов, которое представляет собой следующую последовательность этапов:

Предкризисные явления – это процессы и явления, характерные для ранних этапов кризиса (предшествующие кризису) и во многом определяющие его дальнейшее развитие.

Индикаторами этого этапа могут быть:

- критическое замедление характерных ритмов системы (например, изменение динамики продуктивности доминантов, нарушение сезонных характеристик популяций),
- изменение характера взаимосвязей (например, пространственное и временное нарушение корреляции доминантов и сопутствующих популяций),
- «расшатывание» структуры (выпадение отдельных популяций из трофической сети, перепроизводство и нехватка ресурсов, недостаток трофических звеньев – например, хищников),
- внедрение новых, чужеродных элементов (появление видов, нехарактерных для данной сукцессионной стадии, появление и распространение видов-интродуцентов),
- усиление индивидуального движения элементов (появление видов в нехарактерных для них комплексах – функциональных, пространственных, временных),

- нарушение кооперативных связей (нарушение межвидовых и внутривидовых взаимодействий),
- выход малых флуктуаций на макроуровень (изменения в динамике отдельных популяций оказывает влияние на внутреннюю среду и сообщество, на характеристики экосистемы – продуктивность, микроклимат),
- изменение интенсивности потоков энергии и вещества в системе (появление излишков или недостатка веществ в экосистеме).

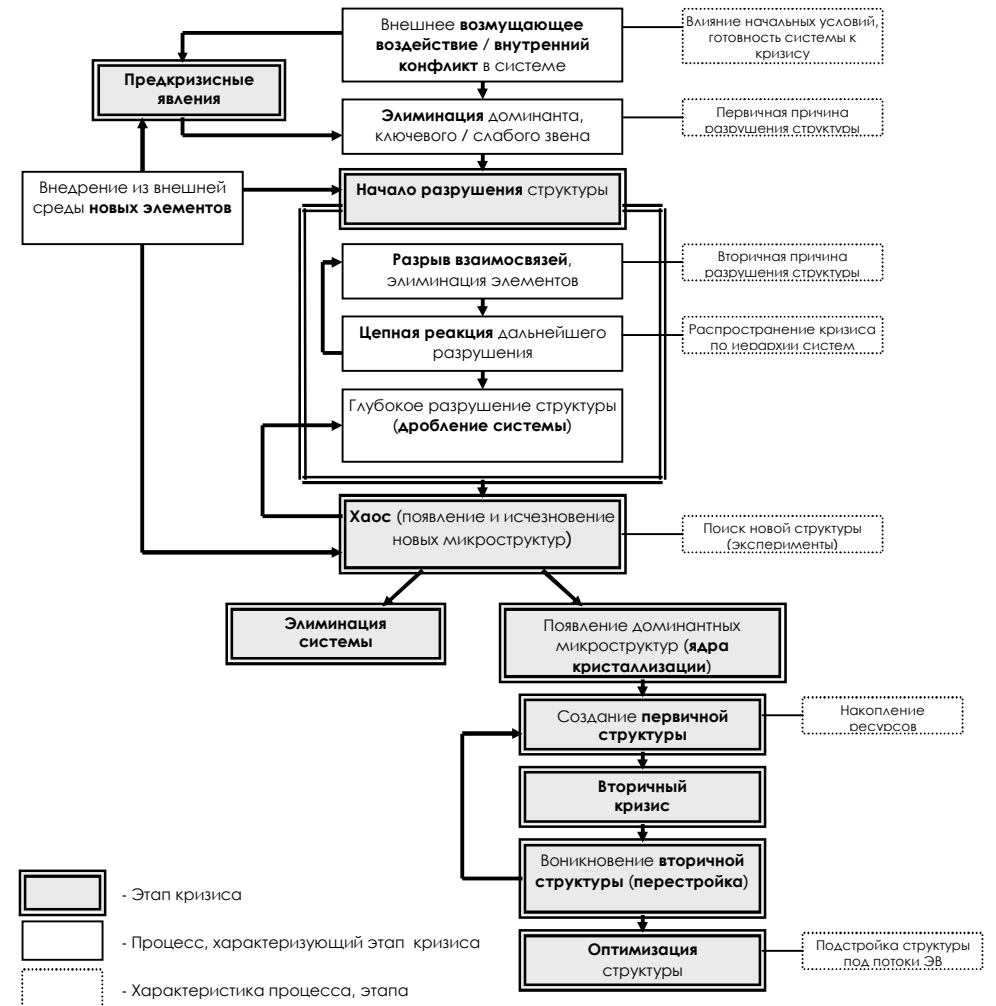


Рис. 2. Системная модель протекания кризисных процессов

Все эти факторы свидетельствуют о неспособности механизмов управления справиться с внутренними процессами и характеризуют о приближении коренных изменений в структуре. Развитию кризисных явлений препятствует наличие в системе контрастности структур, элементов, взаимосвязей, так как это способствует расширению возможности системы сопротивляться

разнообразным возмущающим воздействиям (главные факторы контрастности – видовое, генетическое, ландшафтное разнообразие). Поэтому еще одним фактором, свидетельствующим о приближении кризисных процессов, является снижение контрастности, разнообразия в системе.

Разрушение системы

В зависимости от характера протекающих в системе процессов связи могут быть как функциональные, так и дисфункциональные. Изменение характера взаимосвязей может привести к саморазрушению структуры посредством этих же связей (потоки биогенных элементов, используемые экосистемой как ресурсные, при повышении порога интенсивности приводят к элиминации отдельных популяций и разрушению трофических связей). Включается один из механизмов самоорганизации - **саморазрушение**. Разрушение системы сопровождается такими факторами: элиминация ключевого звена, доминанта, разрушение сети взаимосвязей (трофической сети) и возникновение последующей цепной реакции разрушения (элиминация одной видовой популяции может дать цепную реакцию изменений по трофической сети, касающихся других популяций), потеря целостности, внедрение чужеродных элементов (например, внедрение в экосистему популяций из экотонов).

Большую роль в обеспечении разрушения системы играет ее готовность к кризису (накопление внутренних противоречий) и характеристика возмущающего воздействия. Все это составляет процесс разрушения, организованного механизмами самоорганизации разрушающего типа (порядок → хаос). Действие иерархии этих механизмов, их последовательное включение в процессе перестройки структуры составляет этапность протекания кризиса. Цель действия разрушающих механизмов - расчистить место, освободить ресурсы под новые механизмы управления, новую структуру (элиминация видовых популяций не эффективно использующих ресурсы или для которых создаваемые условия среды являются не оптимальными). Единство принципов организации механизмов разрушения позволяет анализировать и изучать самоорганизующиеся системы любой природы. Специфических разрушающих механизмов нет - те механизмы, которые в нормальном режиме обеспечивали стабильность системы, при переходе пороговых значений некоторых параметров (например, интенсивность потоков веществ в экосистеме) становятся разрушающими. В критических режимах (т.е. при дисбалансе потоков вещества, энергии) не может существовать системы как устойчивой целостности, так как любое ресурсное разнообразие (переизбыток или недостаток) на стыках фаз обработки энергетических потоков может привести к разрушению единства (элиминация или критическое снижение численности отдельных популяций приводит к прерыванию трофических потоков). И в этом случае происходит саморазборка - разрушение целого (системы) для сохранения частей (элементов) с целью создания на основе этих элементов новой структуры (самосборка). Все это является подтверждением одного из главных законов самоорганизации: дезорганизация - частный случай организации.

Этап хаоса характеризуется относительной неупорядоченностью процессов, связей, флуктуаций (неконтролируемый рост численности отдельных популяций, внедрение в трофическую сеть случайных видов, формирование нехарактерных взаимосвязей). Но хаос не означает беспорядок, напротив, этот процесс целенаправлен, обладает собственной динамикой и протекает по определенному сценарию.

Стадия хаоса характеризуется глубоким разрушением старой структуры, причем это разрушение носит упорядоченный характер. Нарушение согласованности в управлении потоками энергии и вещества является причиной разрыва взаимосвязей, что приводит к фрагментации системы, ее распаду на подсистемы, группы подсистем и элементов - происходит дробление (упрощение) системы (из-за выпадения звеньев трофической сети происходит разрыв взаимосвязей между трофическими уровнями). Степень дробления зависит от того, на какой стадии фрагментации системы возможно установление новых взаимосвязей, позволяющих контролировать энергетические и вещественные потоки. Разрыв связей ведет к понижению целостности и повышению свободы действий отдельных элементов. Это приводит, на определенном уровне дробления, к установлению новых связей. На фоне остатков старой структуры происходит хаотическое образование и распад новых микроструктур - система ищет адекватную потокам энергии и вещества структуру, «экспериментирует» (внедрение новых и

элиминация старых популяций – поиск новой структуры сообщества).

Стадия выхода системы из хаоса характеризуется возникновением на микроуровне кооперативных процессов (возникновение новых взаимосвязей между видовыми популяциями – конкуренция, хищничество и т.д.). Взаимодействия между элементами на этой стадии являются доминирующей силой формирования новой структуры. Переход от стадии хаоса к порядку, выбор среди альтернативных структур, бифуркация – это и есть момент рождения новой структуры. Начальные условия влияют на ход бифуркации и на выбор дальнейшей траектории развития системы. Для экосистем такими условиями будут: специфика видового состава (соотношение «генералистов» и «специалистов», доля реликтовых видов, доминантный и субдоминантный состав), характеристика почв, биохимический состав воды, активность экотонов и т.д. На уровне элементов начинаются процессы объединения микроструктур в качественно новые макроструктуры - происходит зарождение новой структуры.

Среди различных микроструктур в процессе конкуренции выделяется одна или несколько доминантных, образуемых основным (ведущим) компонентом системы, обладающих большим интеграционным потенциалом (появление нового доминанта, эдификатора). Такие структуры выступают в качестве **«ядра кристаллизации»** («центры кристаллизации» по В.В. Жерихину), вокруг которого начинают объединяться другие относительно автономные элементы. Начинается **становление первичной структуры** системы - создается каркас новой структуры, налаживаются системообразующие взаимосвязи, выделяются специализированные подсистемы (выстраивание нового сообщества – построение трофической сети). В процессе становления первичной структуры происходит накопление ресурсного потенциала (или создание специфических условий) для дальнейшей реорганизации системы (изменяются характеристики почвы, микроклимат и т.д. под влиянием жизнедеятельности раннесукцессиных видов). По существу, в системе нарастает **вторичный кризис**, вызванный неспособностью первичной структуры существовать в созданных ею же условиях. Причиной вторичных кризисов является перестройка структуры в период восстановления, так как после кризиса система не располагает необходимыми ресурсами для построения оптимальной структуры. Первичная структура системы, возникшая сразу после кризиса, способствует накоплению ресурсов для дальнейшего развития системы (реорганизации). По мере становления системы, при достижении определенного (порогового) запаса ресурсов, происходит реорганизация структуры (в экологических системах, например, – пороговое накопление биогенов в почве, изменение микроклиматических характеристик). При этом постепенное усовершенствование структуры сменяется резкими (скачкообразными) изменениями, вызывающими повторный кризис.

Обычно вторичный кризис характеризуется элиминацией части элементов или подсистем, перестройкой структуры и каналов протекания потоков вещества и энергии, усовершенствованием управляющих механизмов, сменой доминантного состава (например, уходят пионерные виды, меняется доминантный состав древесного яруса и т.д.). Вторичный кризис протекает более мягко и сопровождается не разрушением, а **перестройкой структуры**. В дальнейшем развитии система может претерпевать дополнительные изменения структуры, но они имеют адаптационный характер и выполняют роль оптимизации структурно-функциональной организации системы (замыкание круговорота веществ, специализация видов, стабилизация внутренней среды). Ход процесса становления новой структурно-функциональной организации системы зависит от ряда факторов, главным из которых является характер протекания **интеграционных, кооперативных процессов** в системе. На каждом этапе реорганизации взаимосвязи становятся более плотными, повышается целостность системы и число уровней иерархии управления, понижается гибкость компонентов; осуществляется все более тонкая «настройка» взаимодействия элементов друг с другом. На уровне экосистем это проявляется в формировании «коадаптивного комплекса биоты» и уменьшения перекрытия нишевого пространства видов. В **оптимизации** структурно-функциональной организации системы ведущая роль отводится внутрисистемным напряжениям (внутри и межвидовые взаимодействия), специализации компонентов системы в выполнении своих функций (специализация видов).

В процессе развития любой системы существуют периоды, характеризуемые различной чувствительностью к воздействию внешней среды или к внутренним флуктуациям. Одно и то же воздействие на разных этапах развития системы может привести к различным последствиям.

Внешние воздействия неоднозначно определяют ход кризиса. Важным при рассмотрении кризисных процессов является учет внутренней готовности системы к кризису, факторов облегчающих наступление и распространение кризиса. **Стадия развития системы** играет существенную роль в характере протекания кризисных явлений, так как определяет степень готовности экосистемы к кризису. Ранние этапы развития экосистем имеют потенциал качественного роста, поэтому кризисные явления, происходящие на этих стадиях, в большинстве случаев, вызываются вынужденными (внешними) воздействиями. Устойчивость таких экосистем обеспечивается за счет структурной гибкости: гибкие взаимосвязи и взаимозаменяемость элементов (видов). В то время как более поздние стадии развития (климаксные экосистемы) оказываются более готовыми к кризисным процессам по ряду причин:

- узкая специализация видов таких экосистем ограничивает их гибкость реагирования на нестандартные воздействия;
- структура оптимальная, виды представляют собой коадаптивный комплекс - жестко скоррелированные взаимосвязи обеспечивают высокую стабильность функционирования экосистемы, но понижают ее вариабельность, возможность быстрой перестройки в ответ на возмущающее воздействие.

Климаксная экосистема эффективно использует входящие потоки биогенных веществ, но оказывается не способной выдерживать, без коренных изменений структуры, большие изменения интенсивности и концентрации этих веществ. Такая экосистема повышает оптимальность функционирования в результате специализации за счет сужения диапазона безопасных флуктуаций (уменьшения величины критического порога), повышая при этом вероятность глубокого кризиса.

На базе разработанной системной модели, представляющей в обобщенном виде протекание кризисных процессов в сложных системах, проведен анализ кризисных явлений, имевших место в различных экосистемах. В разных экосистемах степень зависимости ключевых элементов и взаимосвязей от факторов внешней и внутренней среды различна, поэтому в каждом отдельном случае характер протекания кризисных процессов приобретает специфические черты. Поэтому, разработанная системная модель протекания кризисных процессов выступает в роли базовой, на основе которой строится специфическая модель, отвечающая особенностям рассматриваемой экосистемы (рис. 3).

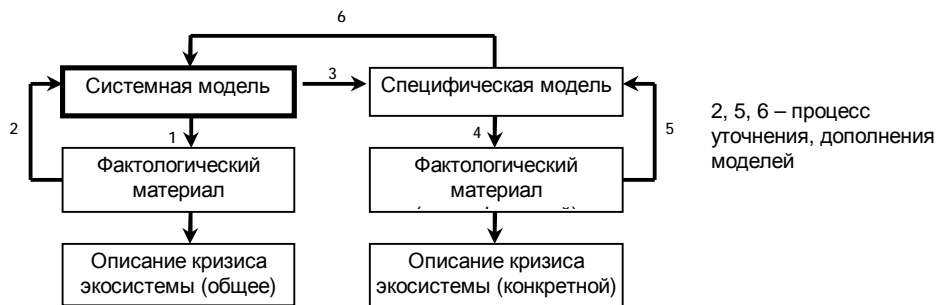


Рис.3. Схема развития системной модели кризиса

В качестве примера анализа кризисных процессов рассмотрим ситуацию, сложившуюся в бассейне Черного моря под влиянием инвазии гребневика *Mnemiopsis leidyi* (по данным Института Океанологии им. П.П.Ширшова РАН, 1977-2006 гг.). Рассматриваемая экосистема - пелагические и бентосные сообщества на глубинах от 0 до 35 м. Северокавказского побережья Черного моря. Временные границы: начало 70-х годов – 2006 г.

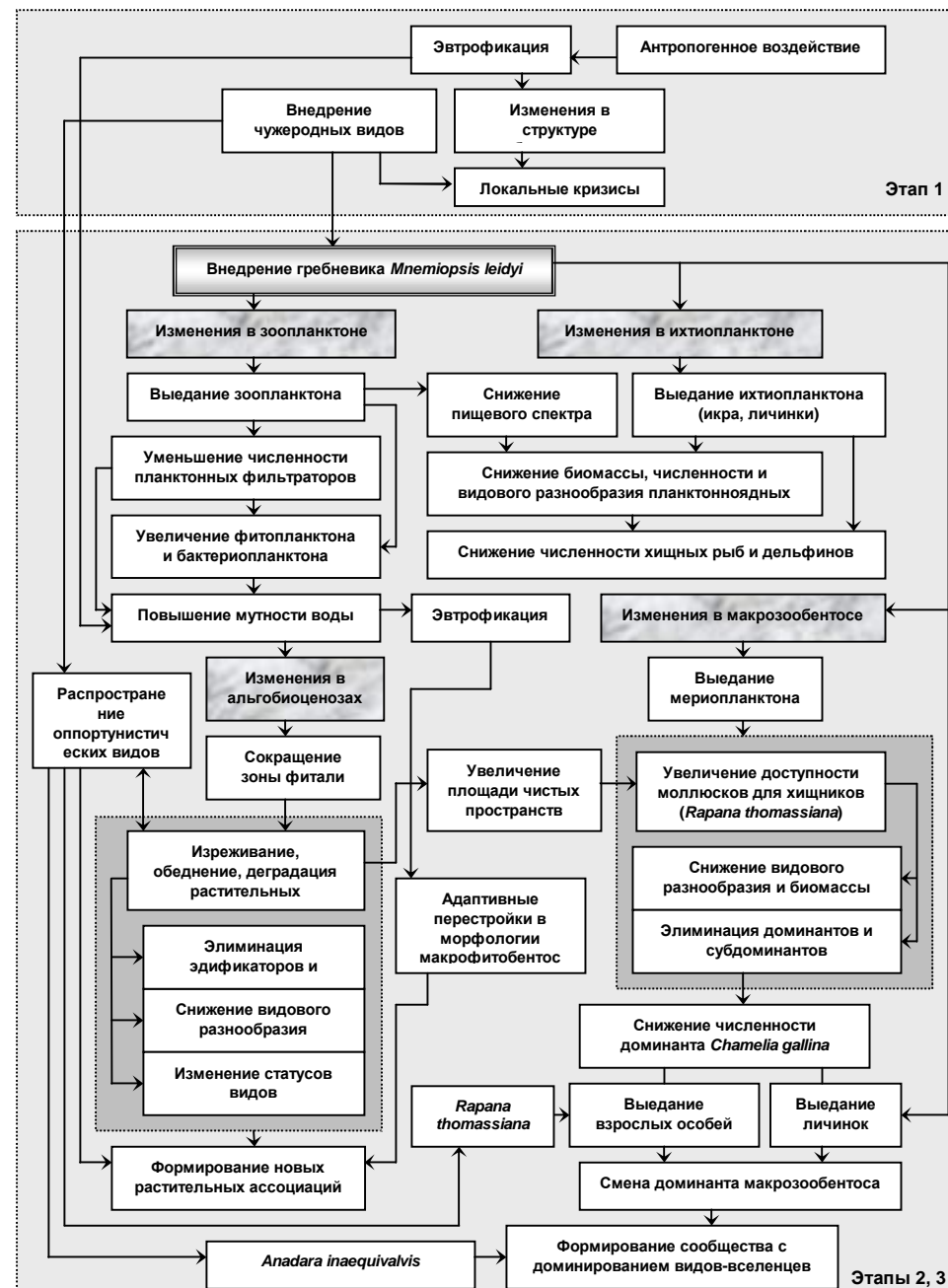
Этап 1. Предкризисные явления

Предкризисные явления в экосистеме Черного моря наблюдались с конца 1960-х годов под влиянием различных антропогенных факторов и сопровождались существенными изменениями в

структуре и функционировании пелагических сообществ (рис. 4).

Симптомы, отображающие наиболее значительные воздействия на экосистему:

- **Изменение интенсивности потоков энергии и вещества (ЭВ)** - эвтрофикация в результате использования механизации, агрохимикатов и интенсификации животноводства в странах Черного моря.



кризисные процессы переходят на высшие трофические уровни – снижается численность хищных рыб и дельфинов, основными объектами питания которых были хамса и шпрот (Shiganova, 1997; Shiganova, Bulgakova, 2000).

Деградирующие изменения в подсистеме «альгобиоценоз»:

Вторичное разрушение (косвенное воздействие): *Mnemiopsis leidyi* не имеет прямого влияния на макрофитобентос, однако отклик альгобиоценозов на появление гребневика оказался сильным, сложным и многоступенчатым.

Первичная причина: резкое **повышение мутности воды** (см. изменения в зоопланктоне) – в открытом море прозрачность воды в летние месяцы уменьшилась до 8-10 м, в прибрежной зоне прозрачность упала до 5-6 м. Снижение прозрачности воды привело к резкому сужению зоны развития макрофитов (фитали) за счет перемещения вверх ее нижней границы и полной или частичной **деградации** глубоководных **ассоциаций растительности**. Нижняя граница зарослей филлофоры поднялась в среднем на 10 м (до глубины 15-18 м), плотность ее зарослей понизилась в 1.5-2 раза, а общее падение запаса - не менее чем в 3 раза (Кучерук и др., 2002). Кроме уменьшения биомассы и площади распространения доминантов (разрушение пространственной структуры), происходит изменение структуры сообщества (уменьшение общего видового разнообразия, выпадение видов-эдикторов, исчезновение субдоминантов и сопутствующих видов).

Результатом перестройки структуры черноморской донной растительности стало или полное выпадение из флоры, или потеря статуса ведущих крупных многолетних видов. Одна из причин элиминации крупных красных водорослей – эвтрофикация, как сопутствующий возмущающий фактор: уязвимость водорослей для антропогенного загрязнения из-за сложного строения репродуктивных структур и непосредственного стерилизующего влияния поллютантов. Под воздействием антропогенного загрязнения среды в ряде массовых видов произошло изменение экологических и морфологических свойств. Адаптивная перестройка морфологии прикрепленной *Phyllophora nervosa* привела к образованию новых стойких морфотипов – перистого (pennata) и курчавого (crispa) (Максимова, Рыбников, 1993).

Вторичная причина: нарушение пространственной структуры (увеличение освободившихся из-под крупных водорослей площадей) приводит к проникновению и развитию видов из других районов бассейна Черного моря, причем в основном этот короткоживущие высокопродуктивные виды-оппортунисты (*r*-стратегии), в основном красные и зеленые нитчатые водоросли. Происходит не только распространение новых и малочисленных видов, но и повышение их статуса, например, ранее исключительно сопутствующего вида – крупной зеленой неклеточной (сифоновой) водоросли *Codium vermilara*. Наряду с разрушением коренного состава наблюдается образование, под влиянием распространения оппортунистических видов, новых для бассейна растительных ассоциаций (Максимова, Лучина, 2002; Maximova, Moruchkova, 2005).

Деградирующие изменения в подсистеме «макрозообентос»:

Первичное разрушение (прямое воздействие): прямое уничтожение (выедание) **меропланктона** - личинок двустворчатых моллюсков. Это привело к двукратному падению биоразнообразия прибрежного макрозообентоса и многократному снижению его биомассы (по сравнению с периодом 50-85 гг.). В пределах бывшего сообщества доминанта *Chamelia gallina* возникло сообщество с доминированием вселенца *Anadara inaequalis*. Бывшие субдоминанты (*Gouldia minima*, *Lucinella divaricata*, *Acanthocardia paucicostata*) либо исчезли полностью, либо сократили численность на 2-3 порядка. Сочетание сопутствующего возмущающего фактора (пресса хищника-вселенца *Rapana thomassiana*, избирательно истребляющего крупные экземпляры двустворчатых моллюсков) и основного возмущающего воздействия (безвыборочного уничтожения личинок гребневиком Мнемипсисом), приводит к исчезновению из сообщества редких малочисленных видов. Сообщество *Chamelia gallina* обнаруживается только на самых малых глубинах – от 5 до 11 метров. На глубине 20-25 м появляется сообщество с доминированием вида-вселенца *Anadara inaequalis*. Одновременно наблюдалась исключительно высокая численность *Rapana thomassiana*: на глубине 9-12 метров на скалах численность рапаны достигала 45-50 экз/м², причем они активно выедали щетки мелких (менее 1.5 см в длину) мидий *Mythilus galloprovincialis*, на которых обычно рапана не обращает внимания. Переход кризисных процессов на другие иерархические уровни: выпадение и изреживание

Рис. 4. Динамика кризиса (этапы 1-3) (по: N.V.Kucheruk, 2006; с изменениями)

В альгобиоценозах произошло снижение запасов черноморской цистоциры (*Cystoseira barbata* и *C.crinita*) на 60%, запасов филлофоры (*Phyllophora nervosa*) - в 10 раз, сильное сокращение зарослей морских трав. Одновременно с этим происходит увеличение биомассы оппортунистической мезосапробной зеленой водоросли *Ulva rigida* – в 3 раза, а площади ее черноморского ареала в 10-12 раз. Результатом развития процессов эвтрофикации явилось возникновение в различных сообществах (фитоценозах, бентосных сообществах) локальных кризисов, усиленных внедрением и массовым распространением чужеродных видов-вселенцев (Калугина-Гутник, 1975, 1987).

• **Появление чужеродных нехарактерных элементов** - занос новых стрессовых для экосистемы видов-интродуцентов. В структуре макрозообентоса произошла замена коренного доминанта *Chamelia gallina* вселенцем *Anadara inaequalis*, который оказался лучше приспособленным к кислородному голоданию чем *Chamelia gallina*. Биоценоз устричного ракушечника был уничтожен еще одним видом-вселенцем – *Rapana thomassiana*.

Взаимодействие возмущающих факторов (эвтрофирование и пресс видов-вселенцев) не только отрицательно сказалось на структуре коренных сообществ, но и создало **предпосылки для кризиса** экосистемы Черного моря большего масштаба. Наличие видов-вселенцев в сообществе, даже если их видовой состав и биомасса невелики, является серьезным фактором риска для экосистемы, особенно в периоды пониженной устойчивости. Именно это обстоятельство (появление в экосистеме очередного вида-вселенца – гребневика *Mnemiopsis leidyi* в период пониженной устойчивости и структурных изменений в сообществах) послужило **«спусковым крючком»**, запустившим глобальный кризис черноморской экосистемы.

Точка начала кризиса (переход с этапа предкризиса на этап разрушения)

Характеристика возмущающего воздействия:

Тип воздействия – биологический: в начале 80-х годов из западного Атлантического океана с балластными водами нефтеналивных танкеров в Черное море был занесен гребневик *Mnemiopsis leidyi*. К 1988 г. *M.leidyi* распространился по всей акватории Черного моря и дал колоссальную вспышку численности осенью 1989 г. Гребневик *Mnemiopsis leidyi* (Stenophora) имеет некоторые биологические особенности, которые позволили ему оказать значительное воздействие.

Спектр воздействия: главный фактор воздействия на экосистему Черного моря – широкий пищевой спектр этого активного хищника. *Mnemiopsis* - макрофаг, способный употреблять добычу довольно большого размера (длинной до 1 см и больше): от мальков рыб до пелагических личинок бентосных животных (Kideys et al., 2005).

Регулирование: *Mnemiopsis leidyi* оказал сильное и сложное воздействие на различные подсистемы (сообщества и ассоциации) черноморской экосистемы по причине отсутствия необходимого трофического звена – хищника, способного контролировать размножение и распространение гребневика.

Этапы 2 и 3. Разрушение структуры системы

Деградирующие изменения в подсистеме «зоопланктон»:

Первичное разрушение (прямое воздействие): резкое уменьшение биомассы, численности и видового разнообразия кормового **зоопланктона** в результате прямого выедания Мнемипсисом. Уничтожение значительного количества планктонных фильтраторов и увеличение продуктов жизнедеятельности Мнемипсиса, привели к повышению обилия **фитопланктона** и почти 100-кратному увеличению обилия **бактериопланктона**. Увеличение содержания биогенных элементов и изменение других гидрохимических параметров среды привело к **эвтрофикации** и **снижению прозрачности воды** (Vinogradov et al., 2005).

Деградирующие изменения в подсистеме «ихтиопланктон»:

Подрыв кормовой базы планктоноядных **рыб** и прямое выедание их икры и личинок Мнемипсисом приводят к резкому падению их численности. Особенно пострадали планктоноядные рыбы - пищевые конкуренты мнемипсиса: хамса *Engraulis encrasicolus ponticus*, ставрида *Trachurus mediterraneus ponticus*, шпрот *Sprattus sprattus phalericus*. Как следствие,

зарослей цистозеры на глубинах 8-20 метров, произошедшее из-за повышения мутности воды, позволило рапане использовать недоступный ранее источник пищи (Кучерук и др., 2002; Chikina, Kucheruk, 2005).

В прибрежных донных зооценозах происходит вытеснение коренных сообществ, которые оставались стабильными на протяжении десятилетий, сообществами с доминированием видов-вселенцев.

Точка перелома кризиса (появление элемента в системе, изменившего ход кризиса)

Характеристика корректирующего воздействия:

Тип воздействия – биологический: в 1997 г. в северо-западной части Черного моря был впервые обнаружен новый вид-вселенец гребневик *Beroe ovata*.

Спектр и характер воздействия: хищник, питающийся планктоноядными гребневиками, и в первую очередь *Mnemiopsis leidyi*. В сентябре 1999 г., во время первой вспышки развития *B. ovata*, было отмечено значительное увеличение количества кормового зоопланктона и иктиопланктона. Берое имеет четкое сезонное развитие с середины или конца августа – до середины-конца ноября. По этой причине срок воздействия Мнемииопсиса на экосистему существенно сократился - до 1–2 мес., вместо 8–9 мес. до появления берое. С появлением *Beroe ovata* в рассматриваемой экосистеме начались процессы восстановления.

Этапы 4 и 5. Восстановление структуры системы

Конструктивные изменения в подсистеме «макрозообентос»:

Снятие пресса возмущающего воздействия (падение численности Мнемииопсиса в результате внедрения в экосистему *B. ovata*) позволило произойти массовому оседанию молоди двустворчатых моллюсков (рис. 5). Одновременное массовое неконтролируемое (ввиду отсутствия взрослых особей) оседание молоди моллюсков привело к их взаимному угнетению, резкому падению скорости роста и продукции. В районе между Геленджиком и Туапсе в 2000 году на глубинах до **15 м** в пробах обнаруживается огромное количество молоди *Chamelia gallina* – до 36000 экз/м².

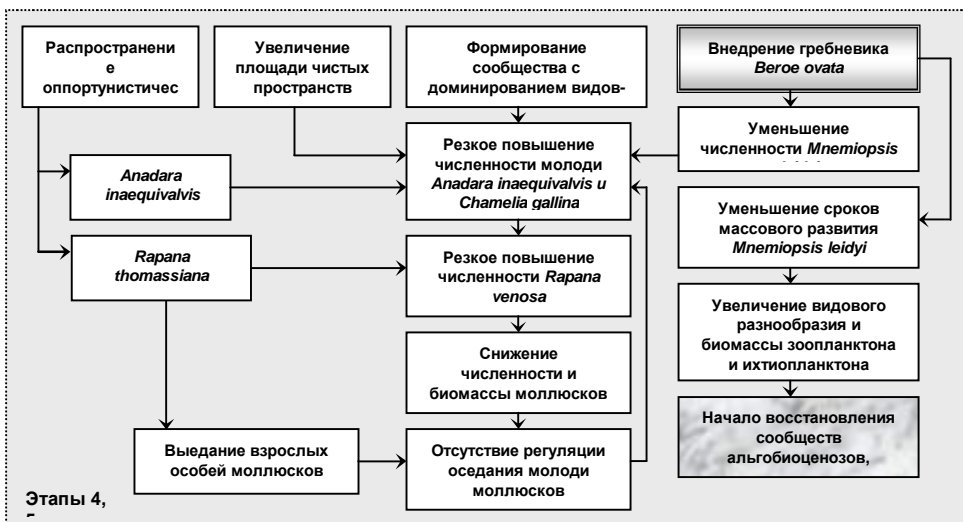


Рис.5. Динамика кризиса (этапы 4-5)

Диапазон глубин **15-35 м** занят сообществом с абсолютным доминированием вселенца – двустворчатого моллюска *Anadara inaequalvis* – количество молоди до 3000 экз/м². Отсутствие старших возрастных групп у двустворчатых моллюсков объясняется их выеданием хищником – *Rapana thomassiana*. Именно высокая плотность мелких моллюсков привела к аномально высокой

численности ювенильных экземпляров хищного моллюска-рапаны – до 100 экз/м², и как следствие, к катастрофическому – на 2-3 порядка! – снижению плотности двустворчатых моллюсков. В последние годы наблюдаются спорадические вспышки численности рапаны с последующим массовым отмиранием ее молоди (Кучерук и др., 2002; Chikina, Kucheruk, 2003, 2005).

Описанные явления имеют циклический характер, указывающий на хаотичность процессов восстановления сообщества – система «ищет» новую структуру путем перебора возможных вариантов взаимосвязей (эксперименты). В подсистеме «макрозообентос» процессы находятся на 4 стадии кризиса (ядра кристаллизации) и характеризуются переходом от стадии хаоса (3-я стадия) к становлению первичной структуры (5-я стадия). В отличие от процессов, происходящих в других подсистемах (см. ниже), ситуация в макрозообентосе нестабильна и неоднозначна, что подтверждает выводы ряда исследователей о предсказуемости происходящих в этих сообществах явлений.

Конструктивные изменения в подсистеме «зоопланктон»:

Начиная с сентября 1999 г. численность и биомасса кормового зоопланктона существенно возросли, главным образом, за счет увеличения мелких видов Copepoda и Cladocera, живущих в поверхностном слое и потому, наиболее доступных мнемииопсису. Увеличилось количество *P. elongatus*, *C. euxinus*, представленных науплиусами и копеподами. Значительно увеличилась биомасса *S.setosa*, *C.euxinus* и *S.setosa* (6-15 тысяч экз/м²) дали существенный вклад в увеличение биомассы кормового зоопланктона, отмечалось значительное развитие ранее почти исчезнувших *Paracalanus parvus* и *Centropages ponticus* (Виноградов, 2000, 2003; Vinogradov et al., 2005).

Конструктивные изменения в подсистеме «иктиопланктон»:

Восстановление иктиопланктона (август 1999 г.) выразилось в резком увеличении видового разнообразия икринок и личинок летне-нерестующих видов рыб (24 вида), тогда как в годы массового развития мнемииопсиса в пробах встречались 4-6 видов личинок. В марте-апреле 2001 г. отмечено увеличение икринок и личинок зимне-нерестующих рыб (шпрота *Sprattus sprattus phalericus* и мерланга *Merlangus merlangus euxinus*). Число видов рыб в траловых сборах увеличилось в 1999-2000 гг. - отмечено появление черноморской хамсы, увеличилась численность барабули и ставриды (Shiganova, Bulgakova, 2000).

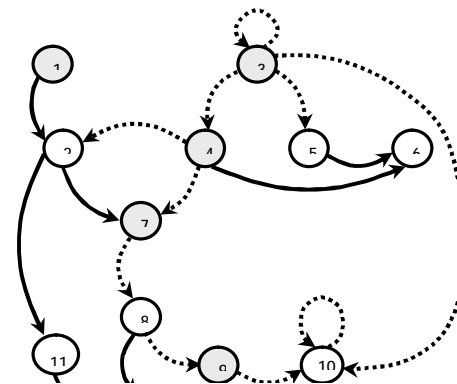
Конструктивные изменения в подсистеме «альгобиоценоз»:

Восстановление альгобиоценозов выразилось в увеличении видового состава сообщества макрофитов: в 1999-2000 гг. было отмечено 56 видов (15 Chlorophyta, 12 Phaeophyceae, 29 Rhodophyta), причем 39 из них (10 Chlorophyta, 7 Phaeophyceae, 22 Rhodophyta) имели практически 100%-ую встречаемость; в 2002-2003 годах было обнаружено более 85 видов макроводорослей, наблюдается изменение статуса ряда видов в сторону его повышения. Происходит восстановление цистозирной ассоциации и в ее прежних батиметрических пределах (Максимова, Лучина, 2002).

Анализ взаимодействий и выявление управляющих воздействий

Главные взаимодействия (причинно-следственные связи), происходящие во время кризисных процессов в рассматриваемой экосистеме Черного моря, представлены на орграфе (рис. 6). Анализ орграфа позволяет выявить ключевые элементы экосистемы, которые оказали решающую роль в развитии кризисных процессов. В первую очередь, наличие чужеродных видов (3) – *мнемииопсис* как фактор дестабилизации экосистемы, берое - как фактор стабилизации.

Изменения в зоопланктоне (4) оказали сильное влияние сразу на несколько факторов – увеличение мутности воды (7), и через это – на деградацию альгобиоценозов (8, 9), снижение кормовой базы для иктиофауны (6). Как следствие, изменение площади чистых пространств (9) (из-за деградации альгобиоценозов) оказали решающую роль в разрушении прежней структуры сообщества макрозообентоса (10). Через выявленные ключевые звенья (4, 7, 9) происходило



распространение кризисных процессов по иерархии экосистемы. И эти же ключевые звенья являются местом приложения управляющих воздействий (УВ), необходимых для стабилизации состояния экосистемы. Как будет показано ниже, именно УВ на уровне вселения чужеродных видов (З) способствовало снятию возмущающего воздействия и восстановлению сообщества.

Таким образом, в течение 18 лет (1988-2006 гг.) черноморская экосистема изменилась в результате самопроизвольного вселения двух низкоорганизованных, хорошо приспособленных животных - гребневиков *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata*. В результате вселения мнемииопсиса, экосистема в значительной степени деградировала: от низших трофических уровней до высших – рыб и дельфинов.

1. Антропогенное воздействие
 2. Эвтрофикация
 3. **Виды-вселенцы**
 4. **Изменения в зоопланктоне**
 5. Изменение в ихтиопланктоне
 6. Изменение численности планктоноядных и хищных рыб, дельфинов
 7. **Увеличение мутности воды**
 8. Изменение зоны фитали
 9. **Изменение площади чистых пространств**
 10. Изменения в макрозообентосе
 11. Адаптивные перестройки в морфологии
 12. Изменения в альгобиоценозах
- Положительная и отрицательная обратная связь
→

Рис. 6. Знаковый оргграф кризисных изменений в экосистеме Черного моря

Снижение пресса хищничества мнемииопсиса в Черном море, не привело к восстановлению прежней структуры сообществ. Сложное влияние морских и бентосных видов-вселенцев *Mnemiopsis leidyi*, *Beroe ovata*, *Rapana venosa*, *Anadara inaequalis* привело к сильным структурно-функциональным изменениям прибрежных бентосных сообществ. Восстановление сообществ в настоящее время еще не завершено.

Подобный анализ был проведен для 22 случаев кризисных явлений в различных экосистемах. Основные результаты проведенных исследований представлены в **сводных комплексных таблицах (СКТ)** (табл. 3-6) развития кризисных процессов в экосистемах. В основе таблиц положены теоретические обобщения и разработанные модели динамики протекания кризисных явлений в конкретных экосистемах.

Данные таблицы позволяют провести аналогии в развитии кризисных явлений различных типов экосистем. Полученные результаты согласуются с теоретическими положениями, полученными в процессе исследования кризисных процессов. В СКТ представлено:

- 7 основных **этапов** кризиса;
- 19 **процессов**, характеризующих основные черты каждого этапа;
- 55 системных **симптома**, отображающих ход кризисных процессов (изменение состава и соотношения системообразующих элементов);
- 109 количественных и качественных **показателей** (индикаторов), отображающих конкретные кризисные явления в экосистемах.

Выявленные показатели характеризуют определенные этапы развития кризисных процессов, действие механизмов управления в процессе самоорганизации.

Примеры описания кризисных процессов, которые легли в основу СКТ, включают в себя не все выявленные нами симптомы. В каждом отдельно взятом случае схематическое разделение авторами этапов кризиса отвечало конкретным задачам исследования, поэтому характеристики аналогичных фаз сильно различаются у разных авторов. Описание кризисных процессов проводилось с различной степенью детализации, зависящей от задач, методов, времени, уровня

глубины и полноты исследований.

В СКТ представлены основные системные симптомы кризисных процессов. При анализе кризисных процессов в конкретных экосистемах симптоматика принимает специфический вид (отображение конкретных процессов), характерный для динамики этих систем.

Таблица 3. Сводный комплексный анализ кризисных процессов. Этап 1.

Этап	Процесс	Симптом	Показатель, индикатор
1. Предкризис (Возникновение и нарастание конфликта)	1.1. Изменение состава основных групп элементов, подсистем	1.1.1. Понижение контрастности, разнообразия в системе	<ul style="list-style-type: none"> • Упрощение/изменение структуры экосистемы^{3, 5, 6, 9, 11, 13, 21(1)} • Изменение контрастности сообществ^{7, 11, 21(2)} • Изменение численности и соотношения видов^{3, 5, 6, 9, 13, 15(1-4), 17, 21(1), 21(3)} • Повышение темпа вымирания эврибиотных ценофилов¹¹
	1.2. Нарушения в системе управления	1.2.1. Изменение интенсивности потоков энергии, вещества и информации (ЗВИ) в системе	<ul style="list-style-type: none"> • Повышение уровня вод^{1, 2, 15(1), 15(2), 15(3), 15(6)} • Изменение микроклиматических характеристик^{3, 5, 9, 15(4), 21(1)} • Изменение интенсивности поступления биогенных элементов^{4, 9, 13, 15(1), 15(3), 21(1), 21(2), 21(4)}
		1.2.2. Изменение внутренней среды	<ul style="list-style-type: none"> • Ослабление средообразующей роли эдификатора^{3, 5, 17} • Изменение почвенных процессов^{1, 2, 3, 6, 19} • Изменение условий существования^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 15, 21(1)}
		1.2.3. Критическое замедление характерных ритмов системы	<ul style="list-style-type: none"> • Замедление скорости разложения органики^{2, 15(2), 19, 21(1)}
		1.2.4. Увеличение амплитуды флуктуаций меняющегося параметра порядка	<ul style="list-style-type: none"> • Увеличение перепада воды, температуры^{3, 15(1), 15(4)} • Резкое возрастание зависимости от внешних условий^{8, 15(5), 21(1)}
	1.2.5. Выход малых флуктуаций на макроуровень	<ul style="list-style-type: none"> • Стабилизирующий ранее фактор разрушает систему (уровень воды, температура)^{3, 15(2)} 	
	1.3. «Расшатывание» структуры	1.3.1. Усиление индивидуального движения и увеличение степени свободы элементов	<ul style="list-style-type: none"> • «Разбегание» видов⁵
		1.3.2. Нарушение кооперативных связей	<ul style="list-style-type: none"> • Нарушение пространственных взаимосвязей^{2, 3, 5, 6, 11, 15(5), 21(2)} • Кризис небольшого масштаба^{7, 9, 11, 21(1), 21(2)}
		1.3.3. Изменение характера взаимосвязей (смена положительных обратных связей на отрицательные и наоборот)	<ul style="list-style-type: none"> • Понижение/повышение конкуренции^{2, 3, 5, 6, 7, 9, 13, 22} • Экологическое притяжение/отталкивание^{5, 6}
		1.3.4. Появление в структуре вакансий и внедрение чужеродных, нехарактерных элементов	<ul style="list-style-type: none"> • Появление нехарактерных видов (виды-«сигналы бедствия», «вселенцы»), ценофобы, генералисты, эксплеренты^{1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 15(2-6), 17, 21(2), 21(4)} • Вспышка обилия реликтов^{6, 7, 11, 17} • Появление малоэффективных видов г-стратегов^{8, 13, 21(1)} • Рост числа экологических лакун, лицензий^{6, 7, 8, 11} • Возрастание темпа таксообразования^{7, 11} • Понижение целостности и устойчивости сообществ^{1, 2, 3, 6, 7, 9, 11, 15}

Суть процессов и смысловое наполнение симптомов при этом не меняется. Часть симптомов может не проявляться (или находиться вне возможности мониторинга) в зависимости от специфики условий протекания кризисных процессов. Конкретные уникальные условия (тип и этап развития экосистемы, характер внешнего или внутреннего воздействия, активность надсистем и т.д.) придают каждому кризису определенное своеобразие.

Главным фактором, определяющим возможность переноса закономерностей протекания кризисных процессов в различных системах (возможность применения системного изоморфизма), является фрактальность (самоподобие) построения организации экосистем. Экосистемы

различных уровней, от локальных до биосферы, имеют самоподобие:

- структурной организации (иерархические уровни – продуценты, консументы, редуценты, и др. принципы построения структуры);
- функциональной организации (трофические сети, взаимодействие нишевых пространств);
- динамики развития (сукцессии) и эволюционных процессов;
- факторов (например, биоразнообразия, воздействия внешней среды), определяющих системные свойства экосистем (устойчивость, гибкость и др.).

Следствием самоподобия организации экосистем, процессов развития и эволюции, факторов воздействия, является самоподобие процессов разрушения (кризисов) как частного случая общих закономерностей развития природных систем.

Таблица 4. Сводный комплексный анализ кризисных процессов. Этап 2.

Этап	Процесс	Симптом	Показатель, индикатор
2. Разрушение структуры	2.1. Действие фактора, инициирующего кризис (первичная причина разрушения структуры)	2.1.1. Превышение порогового значения интенсивности потоков ЭВИ в системе	<ul style="list-style-type: none"> • Превышение порогового значения уровня грунтовых вод (биогенов в среде) ^{1, 2, 15(1-5), 22} • Повышение уровня насыщения тканей ключевыми биогенами ^{4, 13} • Кратковременное событие, дестабилизирующее экосистему ^{9, 11, 15(6), 21(2-4)}
	2.2. Элиминация доминанта /ключевого звена системы	2.2.1. Выборочная элиминация элементов	• Уход (смена) доминантов ^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15(2), 15(5), 15(6), 18, 19, 21(3), 21(4), 22}
		2.2.2. Изменение внутренней среды	<ul style="list-style-type: none"> * Снижение эдификаторной способности доминанта ^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 15(2), 17, 18, 21(1)} • Изменение условий обитания организмов/экологический стресс ^{2, 3, 5, 7, 9, 11, 15(1), 15(3), 15(6), 20, 21(1-4), 22}
		2.2.3. Резкое изменение интенсивности потоков ЭВИ	• Резкое обогащение внутренней среды биогенами ^{4, 15(2), 15(5), 20, 21(4), 22}
	2.3. Разрушение системообразующих взаимосвязей (вторичная причина разрушения структуры)	2.3.1. Цепная реакция разрушения системы (массовая элиминация элементов, прежде всего, специализированных)	<ul style="list-style-type: none"> * Элиминация видов коренного состава (прежде всего, широко распространенных) ^{1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 19, 20, 21(1), 21(2), 22} • Элиминация специалистов ^{6, 7, 8, 9, 11, 15(1), 21(2), 21(3), 22} * Снижение (изменение) биомассы ^{1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 15(6), 17, 21, 22} * Понижение разнообразия ^{3, 6, 7, 8, 9, 11, 15(2), 15(4), 15(5), 21, 22} • Изменение скорости роста ^{17, 21(2)} • Изменение статуса вида ^{15(3), 15(5), 15(6), 21(1), 21(2), 22}
		2.3.2. Понижение целостности	<ul style="list-style-type: none"> • Распад древостоя ^{1, 15(2)} • Разрушение сообщества ^{2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15(1-3), 21(1), 21(2), 21(4)} • Снижение коадаптивности сообщества ^{6, 11} • Упрощение структуры ^{6, 7, 9, 15(4), 21(2), 21(3), 22} • Изменение пространственной структуры и временной динамики ^{2, 3, 5, 11, 15(1), 15(3), 15(5), 15(6), 20, 21(1), 21(2)}
		2.3.3. Массовое распространение чужеродных (нехарактерных) элементов	<ul style="list-style-type: none"> * Появление нехарактерных видов/ценофилов/генералистов ^{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 15(2-5), 17, 19, 20, 21(1), 21(2), 22} • Снижение темпа таксонообразования ^{6, 7, 8, 11}
	2.4. Дробление (фрагментация) системы	2.4.1. Суверенизация компонентов системы	<ul style="list-style-type: none"> • Относительная независимость процессов на разных ярусах ^{5, 18} • Индивидуализация ниш ⁶
		2.4.2. Ослабление, исчезновение, изменение взаимосвязей между компонентами	<ul style="list-style-type: none"> • Изменение взаимосвязей между иерархическими уровнями, ярусами ^{5, 9, 15(2), 15(4), 20, 21(1-3)} * Изменение взаимосвязи «растительность-почва» ^{2, 3, 19, 20} • Понижение/повышение конкуренции ^{5, 6, 7, 9, 11, 21(1-3)}
		2.4.3. Распад системы на подсистемы, компоненты и элементы	• Распад системы на автономные блоки ^{6, 21(2)}

В результате анализа кризисных процессов был выявлен ряд общих закономерностей, характеризующих основные тенденции (действие механизмов самоорганизации) в развитии кризисов:

1. Притягивание кризиса: система в процессе своего развития создает условия для

возникновения кризиса.

2. Причина кризиса: главной причиной возникновения и распространения кризисных процессов часто является не возмущающее воздействие, а исторически сформированный внутренний конфликт (готовность системы). Возмущающее воздействие, даже если оно слабое, может сыграть роль «спускового крючка», запустившего кризис.
3. Чужеродные (новые, нехарактерные) элементы: появление в процессе кризиса новых элементов (например, вселение видов) может способствовать как разрастанию кризисных процессов, так и их нивелированию.
4. Разрушение структуры: разрушение структуры и элиминация элементов во время кризиса способствует «расчистке места» под новую структуру и продолжается до момента возникновения «ядра кристаллизации» потенциальной первичной структуры.
5. Эксперименты: в разгар кризиса система «ищет» потенциально новую структуру путем перебора различных комбинаций из спектра старых и новых элементов.

Таблица 5. Сводный комплексный анализ кризисных процессов. Этапы 3-4.

Этап	Процесс	Симптом	Показатель, индикатор
3. Хаос	3.1. Дальнейшее дробление и разрушение системы	3.1.1. Усиление действия вторичных факторов	• Усиление влияния климатических факторов (среды) способствует дальнейшему разрушению ^{2, 3, 9, 15(2), 15(3), 15(5), 21(1), 21(3), 21(4)}
		3.1.2. Распад подсистем на более мелкие компоненты и элементы	<ul style="list-style-type: none"> • Разрастание конфликта между структурами ^{6, 9, 21} • Массовый разрыв взаимосвязей ^{6, 9, 21} • Массовая элиминация элементов ^{6, 9, 15(6), 21}
		3.1.3. Появление новых элементов (приход из внешней среды; проявление ранее незаметных в системе)	<ul style="list-style-type: none"> • Вспышка обилия ранее угнетенных (малочисленных) видов/наступление экотонных ^{3, 4, 5, 6, 11, 15(2-5), 17, 20, 21(1), 22} • Викарные замены ^{5, 6, 7, 9, 11, 15(6)} • Изменение морфологических и экологических свойств видов ^{3, 15(2), 21(1)}
		3.1.4. Повышение степени свободы действий элементов	• «Разбегание» видов (пространственное) ^{5, 21(1), 21(2)}
	3.2. Распространение кризиса по иерархическим уровням	3.2.1. Охватывание кризисом соседних по уровню систем	<ul style="list-style-type: none"> • Распад структурных блоков ^{6, 9, 21(1), 21(2)} • Разрыв взаимосвязей между блоками ^{6, 9, 15(5), 21(1), 21(2)}
		3.2.2. Переход кризисных явлений на выше- и нижележащие иерархические уровни	• Распространение изменений на подсистемы ^{2, 3, 4, 5, 6, 17, 20, 21(1), 21(2)}
	3.3. Установление новых связей	3.3.1. Кратковременная стабилизация потоков ЭВИ (в системе или в локальных образованиях)	• Кратковременная стабилизация внутренней среды ^{2, 4, 6, 20}
	3.4. Образование и распад новых микроструктур	3.4.1. Появление недолговечных нехарактерных структурных образований и взаимосвязей (эксперименты)	<ul style="list-style-type: none"> • Появление временных сообществ ^{6, 7, 8, 11, 15(3), 15(5), 20, 21(1), 21(2)} • Появление короткоживущих таксонов (комплексов) ^{7, 11, 21(4)} • Появление новых перспективных жизненных форм ^{6, 8, 11, 21(1)}
4. Ядра кристаллизации (ЯК)	4.1. Образование одного или нескольких квазиустойчивых микроструктур (ЯК)	4.1.1. Возникновение на микроуровне кооперативных процессов (новых взаимосвязей)	<ul style="list-style-type: none"> • Сильная зависимость видового разнообразия одного комплекса от обилия другого ^{15(1), 15(6), 20, 21(1), 21(2), 21(4)} • Высвобождение ресурсов (появление лицензий) ^{6, 20, 21(1), 21(2)} • Экологическое притяжение ^{6, 7, 11}
		4.1.2. Появление квазиустойчивых микроструктур	• Активизация субдоминантов (остатков сообщества, реликтов)/новых жизненных форм ^{2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 15(2), 15(6), 17, 18, 19, 21(1), 21(2), 21(4)}
		4.1.3. Усиление интеграционных процессов на основе функциональной взаимодополнительности	• Появление вокруг субдоминантов сопутствующих видов ^{2, 5, 15(5), 17, 19}
	4.2. Образование доминантного ЯК	4.1.4. Установление общего темпа развития элементов в локальных микроструктурах ЯК	• Образование «центров кристаллизации» (ЦК) ⁶
		4.1.5. Усиление кооперативного управления потоками ЭВИ в ЯК	• Осуществление контроля концентрации биогенов субдоминантом ⁴
		4.2.1. Возникновение конкурирующих или кооперативных взаимодействий между альтернативными ЯК	<ul style="list-style-type: none"> * Последовательная смена субдоминантов ^{5, 6, 8, 12, 15(5), 18, 19} • Конфликт или интеграция локальных структур ЦК ⁶

	4.2.2. Выбор среди альтернативных структур доминантного (бифуркация)	<ul style="list-style-type: none"> • Появление нового доминанта^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15(2), 15(5), 15(6), 19, 21(1), 21(2), 22}
	4.2.3. Кооперативные процессы вокруг доминантного ЯК	<ul style="list-style-type: none"> • Появление сопутствующих видов^{1, 2, 3, 5, 13, 15(5), 19, 21(1)}

Процессы, характерные для предкризиса проявляются в системе при постепенном изменении внешней среды – т.е., время изменения факторов, имеющих лимитирующее значение для развития, сопоставимо со временем реакции системы на них. Либо внутренние процессы (конфликт структур, несогласование интенсивности потоков биогенов между подсистемами и/или элементами) обуславливают реакцию системы.

Таблица 6. Сводный комплексный анализ кризисных процессов. Этапы 5-7.

Этап	Процесс	Симптом	Показатель, индикатор
5. Становление первичной структуры	5.1. Формирование каркаса новой структуры	5.1.1. Объединение микроструктур в качественно новые макроструктуры	<ul style="list-style-type: none"> • Формирование нового сообщества^{1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15(2), 15(5), 15(6), 21(1), 21(2), 21(4), 22} • Экстенсивная дивергенция⁸
		5.1.2. Активизация деятельности элементов, обладающих высокой степенью гибкости (устойчивости)	<ul style="list-style-type: none"> • Пионерные (ремонтные) виды^{2, 3, 5, 8, 12, 14, 15(2), 16, 20, 21} • Появление устойчивых к воздействию видов^{3, 4, 9, 13, 15(2), 15(5), 21(1), 21(2), 21(4), 22} • Повышение темпа таксонообразования^{6, 7, 8, 11} • Усиление конкуренции^{3, 5, 6, 7, 8, 11, 17}
		5.1.3. Выбор новыми элементами новых каналов потоков ЭВИ	•
		5.1.4. Наложение системобразующих взаимосвязей	<ul style="list-style-type: none"> • Повышение «замкнутости» ценоза^{5, 7, 11} • Отступление экотонов^{6, 7, 11, 21(3)}
		5.1.5. Создание внутренней среды	<ul style="list-style-type: none"> • Усиление edificatorной способности нового доминанта^{1, 2, 3, 4, 12} • Стабилизация биотической среды¹¹
		5.1.6. Начало специализации элементов и подсистем	<ul style="list-style-type: none"> • Выделение ярусов^{5, 14, 20} • Прогрессивная специализация^{6, 7}
		5.1.7. Замыкание потоков ЭВИ в системе и накопление ресурсного потенциала	<ul style="list-style-type: none"> • Перестройка экосистемы за счет внутреннего потенциала^{5, 12, 14}
6. Вторичный кризис	6.1. Нарушения, инициирующие реорганизацию	6.1.1. Создание специфических условий для дальнейшей реорганизации системы	<ul style="list-style-type: none"> • Преобразование верхних горизонтов почвы^{2, 3, 5, 12} • Действие возмущающего фактора^{21(3), 21(4)}
		6.1.2. Неспособность первичной структуры существовать в созданных ею же условиях	<ul style="list-style-type: none"> • Уход видов, изменивших почвенные и микроклиматические характеристики^{3, 5, 12, 14, 21(2)}
	6.2. Структурные изменения	6.2.1. Смена доминантного состава и изменение структуры	<ul style="list-style-type: none"> • Изменение структуры древостоя (системы)^{5, 6, 16} • Смена доминанта^{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15(5), 16, 21(1), 21(2), 21(4)} • Изменение видового (таксономического) состава^{2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 15(5), 19, 21(1), 21(2), 21(4)} • Изменение проективного покрытия и/или обилия^{5, 10, 21(3)}
		6.2.2. Элиминацией части элементов или подсистем (низкоспециализированных)	<ul style="list-style-type: none"> • Исчезновение раннесукцессионных видов (низкоспециализированных форм)^{5, 6, 7, 14, 16}
6.3. Функциональные изменения	6.3.1. Перестройкой структуры и каналов протекания потоков ЭВИ	•	
7. Построение вторичной структуры	7.1. Формирование и оптимизация вторичной структуры	7.1.1. Повышение числа уровней иерархии системы	<ul style="list-style-type: none"> • Формирование ярусов^{5, 12, 14, 16}
		7.1.2. Совершенствование управляющих механизмов	•
		7.1.3. Понижение гибкости элементов. Специализации компонентов системы в выполнении своих функций	<ul style="list-style-type: none"> • Прогрессивная специализация^{3, 5, 6, 7, 8} • Образование экологических лакун⁷ • Интенсивная дивергенция⁸
		7.1.4. Усиление внутрисистемных взаимодействий	<ul style="list-style-type: none"> • Усложнение взаимосвязей⁹ • Изменение межгрупповой конкуренции^{7, 8} • Изменение внутригрупповой конкуренции⁸

	7.2. Повышение целостности,	7.2.1. Повышение стабильности функционирования	<ul style="list-style-type: none"> • Создание стабильной внутренней среды^{4, 5, 13}
		7.2.2. Повышение степени использования ресурсов и потоков ЭВИ	<ul style="list-style-type: none"> • Повышение замкнутости круговорота биогенов^{6, 12} • Оптимизация трофической системы⁶
		7.2.3. Повышение коадаптации элементов, компонентов и подсистем	<ul style="list-style-type: none"> • Формирование коадаптивного комплекса биоты характерного для данной фазы сукцессии^{1, 2, 3, 5, 6, 13, 20} • Повышение упаковки ниш^{6, 7, 8, 11}

Независимо от причины (внешней или внутренней) симптоматика деградирующих процессов, происходящих в системе, подобна. Как показывает анализ этого этапа, предкризисные явления представляют собой облегченный (ослабленный) вариант процессов более поздних этапов кризиса (например, соотношение симптомов 1.2.2. и 2.2.2., 1.3.4. и 2.3.3., 1.3.1. и 3.1.2., и т.д.).

В процессе кризиса симптомы могут неоднократно проявляться, например, когда процессы имеют циклический характер. В этом случае характер протекания некоторых этапов имеет ступенчатый вид, и связан, в первую очередь, с проявлением действия многоступенчатой организации механизмов обеспечения устойчивости (обороны) системы. Примером циклических процессов могут быть: цепная реакция разрушения (2.3.1.) (например, массовые ступенчатые вымирания), процесс дробления (3.1.), смена доминантов (2.2.1., 3.1.3., 4.1.3., 6.2.1.), внедрение элементов из соседних систем (распространение экотонов, видов-вселенцев) (1.3.4., 2.3.3., 3.1.3., 5.1.2., 6.), вторичный кризис (6.) (при смене структур, сформированных контрастными доминантами) и др. Сам кризис (этапы 2, 3, 4, 5) по характеру процессов можно разделить на две фазы: преобладание процессов разрушения и утраты (2.1. – 3.2.), и преобладание процессов созидания, конструкции (3.3. – 5.1.). Это разделение согласуется с выводами некоторых исследователей о смене в процессе кризиса деградирующей и конструктивной тенденциях (В.В.Жерихин, А.С.Паутиан; Н.Н.Каландадзе, А.В.Марков и др.). Переломный момент кризиса (переход от разрушения к созиданию) не имеет четкой границы (выявлен только в 2-х случаях из 22-х рассмотренных), и представляет собой относительно короткий период неопределенности взаимоотношений элементов между собой и внешней средой – этап хаоса. Этот этап характеризуется минимальным контролем, максимальной свободой действия элементов, максимальным уровнем доступности потоков энергии и вещества, и максимально возможным уровнем разнообразия элементов. Этап хаоса важен тем, что в нем проявляется весь спектр возможностей системы, максимальный потенциал, гибкость и способность к кооперации. Но этот этап является и самым опасным – максимальный уровень дробления и разрушения исходной системы, агрессивность внешней среды (внутренняя среда, играющая роль буфера, отсутствует) может привести систему к гибели. Система может оказаться не в состоянии справиться с жесткостью условий и, расправившись на отдельные элементы, раствориться в составе соседних систем. Некоторые симптомы отображают глубокие преобразования системы, близкие к катастрофическим (3.1.1., 3.1.2., 3.2.1., 3.2.2.).

Степень разрушения системы определяет степень новизны новой структуры – обычно, чем глубже преобразования (степень дробления), произошедшие во время кризиса, тем система будет меньше походить на старую (докризисную). Чем больше специфических элементов и взаимосвязей будет потеряно в кризисе, тем больше вероятность, что новая структура будет настолько радикально отличаться от старой, что можно будет говорить скорее о новой системе, чем о новой структуре старой системы. Частично результат кризиса можно прогнозировать исходя из глубины противоречий (конфликта) выявленных еще на стадии предкризиса. Чем глубже противоречия, тем более радикальные перемены в структуре произойдут во время кризиса. С другой стороны, если во время кризиса системе удастся сохранить свои специфические компоненты, несмотря на массовость элиминаций и разрушений других частей системы, то это может позволить системе со временем восстановиться в прежнем качестве. Например, для наземных экосистем такого рода компонентом является почвенный покров. Это подтверждается рассмотрением кризисных процессов в тех экосистемах, где возмущающее воздействие оказывалось именно на почвы (подтопление, заболачивание, перевыпас).

Менее всего получено подтверждений по симптомам, отображающим изменения потоков ЭВ: 2.2.3., 3.3.1., 4.1.5., 5.1.3., 5.1.7., 6.3.1. Связано это с тем, что в исследованиях основное внимание

акцентируется на структурных изменениях (изменение числа и численности видов, изменение в иерархической структуре и т.д.). Изменение потоков энергии и вещества регистрируется в водных экосистемах (как непосредственно влияющих на внутреннюю среду) или в экосистемах, подверженных химическому загрязнению. Однако необходимо помнить, что изменение интенсивности потоков, их качественных и количественных характеристик, может дать информацию о нарастании кризисной ситуации в системе еще до того, как изменения проявятся на структурном уровне. Функциональная дестабилизация предшествует структурной деструкции, поэтому, с помощью мониторинга потоков энергии и вещества возможно прогнозирование потенциальных и отслеживание уже возникших процессов изменения в организационной структуре системы.

Наибольшее количество подтверждений получили симптомы, отображающие изменения в составе сообществ (структурные изменения): 1.3.4., 2.2.1., 2.3.1., 2.3.3., 3.1.3., 4.1.2., 4.2.2., 5.1.2., 6.2.1. Регистрируемые этими симптомами изменения биоразнообразия отображают, с одной стороны, следствие изменения внутренней среды, потоков энергии и вещества, а с другой стороны, являются причиной дальнейших изменений в системе (например, последовательность симптомов 2.1.1. – 2.2.1. – 2.2.2. – 2.2.3. – 2.3.1.).

Этап 7 (построение вторичной структуры) отображает процессы становления и оптимизации структуры, которая обеспечит системе стабильное функционирование (развитие) на определенном (характерном для системы) временном интервале. По сути, это уже посткризис. Однако существует две причины, по которым этот этап включен в общую схему кризиса.

Во-первых, процессы, происходящие на этом этапе, сходны с процессами, имеющими место на предкризисном и кризисных этапах, только имеют обратную последовательность. Становление системы показывает процессы, аналогичные разрушению, так как в процессах деструкции и созидания обычно задействованы одни и те же механизмы. Например, и разрушению, и становлению сообщества способствуют низкоспециализированные элементы (симптомы 1.3.4., 2.3.3., 5.1.2.). Характеризуемые этими симптомами процессы наступления и отступления экотонов имеют единый механизм активизации (наличие/отсутствие лицензий в сообществе), хотя отражают разные этапы кризиса (этап 2 – разрушение структуры, этап 5 – становление первичной структуры).

Во-вторых, в процессе построения вторичной структуры (особенно в окрестности ранних посткризисных стадий) возможен каскад вторичных кризисов (цикл этапов 5 – 6 – 7). Этап 7 заканчивается процессами оптимизации и адаптации, которые на протяжении дальнейшего развития системы, происходят в рамках гомеостатического диапазона. В дальнейшем, развитие системы (после этапа 7) со временем приобретает характерные черты этапа 1, т.е. система самопроизвольно наращивает потенциал для следующего кризиса. Это согласуется с данными о циклах филоценогенеза (Н.Н.Каландадзе, А.С.Раутиан и др.), сукцессионных циклах (В.Ф.Левченко, Я.И.Старобогатов и др.), процессах самоорганизованной критичности (Bak P.).

Отображенная СКТ последовательность процессов, и, как следствие, симптомов, воспроизводит общую причинно-следственную цепочку развертывания кризисных процессов в системе (рис. 7).

Рис. 7. Структура кризиса

- 1 – предкризис
 - 2 – разрушение структуры
 - 3 – хаос
 - 4 – ядра кристаллизации
 - 5 – становление первичной структуры
 - 6 – вторичный кризис
 - 7 – построение вторичной структуры
- тк – точка кризиса (переломный момент конфликта в системе или точка воздействия внешнего возмущающего фактора).

Сопоставление процессов, происходящих в различных системах и на разных временных отрезках, обусловлено подобием этих процессов по характеру и этапности прохождения. Кризисные процессы аналогичны некоторым процессам, характерным для стабильных этапов развития, но имеют более интенсивный характер. Главные отличия кризисных и стабильных этапов развития отображены в таблице 7.

Как видно из таблиц 3-7, основными отличиями кризисных и стабильных этапов развития являются:

- интенсивность протекания процессов (кризисный этап – высокая интенсивность, стабильный этап – низкая);
- ведущий механизм преобразования системы (кризисный этап – замена элементов, стабильный этап – адаптация);
- материал (ресурс) для изменения системы: кризисный этап – использование элементов (ресурсов, разнообразия) внешней среды, стабильный этап – преобладает использование внутреннего потенциала элементов самой системы.

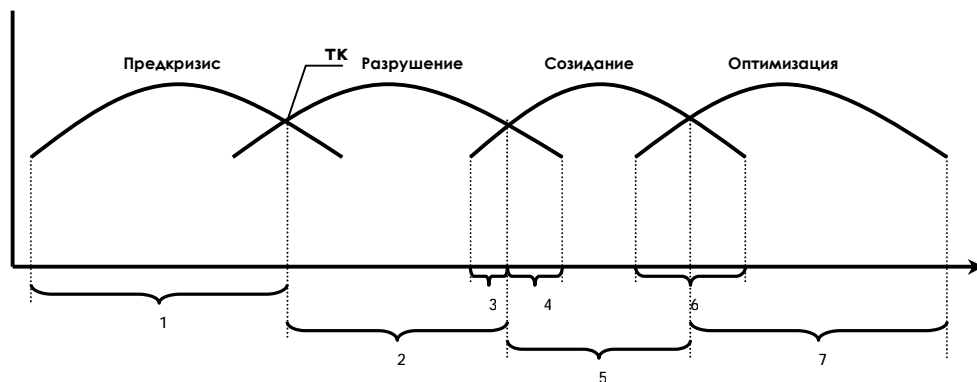
Таблица 7. Отличительные особенности кризисных и стабильных этапов развития

Процесс	Стабильный этап	Кризисный этап
Временной масштаб процессов	Длительный	Короткий
Смена элементов	Постепенная	Резкая
Изменение внутренней среды	Постепенное	Резкое
Элиминация элементов	Единичная	Массовая
Механизм изменения структуры	Адаптация, подстройка	Разрушение, перестройка
Распространение экотонов	Блокирование	Расширение

Исходя из выявленных отличий, можно сформулировать **определение кризиса**: высокоинтенсивный процесс изменения структурно-функциональной организации системы за счет привлечения потенциала внешней среды, сопровождаемый заменой части элементов, подсистем и взаимосвязей.

О кризисных процессах в конкретной системе можно говорить только относительно стабильных этапов развития этой системы. Только сравнивая характер процессов в стабильном и кризисном состояниях, можно говорить о том, являются ли эти процессы действительно кризисными для данной системы. Если в системе проявился комплекс симптомов, можно говорить о наличии кризисных процессов. Проявление одного симптома может свидетельствовать о локальных внутренних флуктуациях, не имеющих кризисную причину (сезонность, цикличность процессов и т.д.).

Кризисы являются естественным, закономерным этапом развития систем любой природы, в том числе экосистем. Положительная роль кризисов подтверждается тем, что именно в критические моменты развития возможны перестройка структуры и появление новаций, которые в обычном, стабильном состоянии нивелируются действием механизмов поддержания устойчивости. Кризисные процессы в системах различной природы имеют ряд общих закономерностей. В критических точках происходит смена программ поведения систем и их элементов, однако закономерности этих изменений основываются на универсальных процессах самоорганизации. Знание этих процессов может позволить провести анализ причин возникновения кризисных явлений, осуществить диагностику состояния системы, определить этап кризиса. Это позволит осуществлять прогнозирование динамики кризисных явлений и определять характер



необходимых управляющих воздействий.

3. ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ характеристик стабильных и кризисных этапов развития экосистем позволил выявить главные отличия между этими стадиями и сформулировать определение кризиса: высокоинтенсивный процесс изменения структурно-функциональной организации системы за счет привлечения потенциала внешней среды, сопровождаемый заменой части элементов, подсистем и взаимосвязей.

2. Разработана методика кризис-мониторинга, основанная на междисциплинарном системно-синергетическом подходе, которая позволяет проводить комплексный анализ кризисных явлений экосистем различных типов и уровней организации: выявлять этапы развития кризиса, осуществлять отслеживание и прогнозирование дальнейшего развития кризисных процессов. Предложенный подход к исследованию кризисных процессов основан на изучении изменения структурных, функциональных, пространственных и временных свойств и характеристик экосистемы, прежде всего динамики различных аспектов биоразнообразия.

3. Анализ кризисных процессов в экосистемах позволил выявить закономерности протекания кризиса, который проявляется в виде последовательного прохождения ряда этапов. Каждый этап имеет свойственные ему показатели, симптомы и процессы, отображающие специфику структурных и функциональных изменений в экосистеме на данном этапе. Выявлено 109 показателей, 55 симптомов, 19 процессов и 7 этапов кризисов в экосистемах.

4. В процессе анализа причин, которые приводили к кризисным явлениям в экосистемах, было выявлено, что все многообразие возмущающих воздействий можно свести к изменению главного основополагающего фактора: интенсивности протекания потоков энергии (количества и соотношения биогенных веществ) через экосистему. Это позволило в процессе исследования разработать и применить универсальную схему протекания кризисных процессов в экосистемах при различных типах возмущающих воздействий.

5. Разработана системная модель протекания кризисных процессов, которая имеет универсальный обобщающий характер и позволяет провести качественную оценку кризисных явлений. На основе этой модели было проведено исследование 22 примеров кризисных явлений, имевших место в различных экосистемах. По материалам палеонтологических исследований биотических кризисов и по данным кризисных процессов в пелагических и бентосных сообществах Черного моря были разработаны две детальные модели, описывающие общие и специфические черты кризисов в исследуемых экосистемах.

6. Установлено, что характеристики начальных условий кризиса – тип и стадия развития экосистемы (этап сукцессии), характер возмущающего воздействия, – определяют специфику процесса протекания кризиса, не изменяя общей схемы кризиса и целевого назначения каждого этапа.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Славинский Д.А. Динамика экосистемы леса и его экономическая оценка. СПб., ЦППК ЕН СПбГУ, 1997. 54 с. (рукопись)
2. Slavinsky D. Role of biodiversity in ensuring the stability of ecosystem/ Proc. of the Nordic-Russian-Baltic GIS and Biodiversity Workshop, Helsinki, 1999. – p. 13-14.
3. Славинский Д.А. Экосистема как самоорганизующаяся система. Функциональная модель кризисных этапов развития экосистем // Вестник СПбГУ, сер. 3, вып. 1, 2000. С. 23-29.
4. Славинский Д.А. Структура баз данных по биоразнообразию в сети Интернет // Прос. семинара «Теоретические основы биоразнообразия», СПб, 19-20 мая 2000 г., тезисы, с. 37-40.
5. Славинский Д.А. Исследование кризисных процессов в экосистемах: системный подход. СПб., ЦППК ЕН СПбГУ, 2000. - 65 с.
6. Славинский Д.А., Левченко В.Ф. Структура информационных ресурсов по биоразнообразию в Интернете // Proc. 2nd International symposium «Information technology in biodiversity research»,

St.Petersburg, 14-17 May, 2001. Pp. 105-106.

7. Славинский Д.А., Черникова С.А. Самоорганизация природных и социальных систем // Роль высшей школы Санкт-Петербурга в реализации концепции устойчивого развития. Сборник материалов по образованию в области устойчивого развития под общ. ред. Бродского А.К., СПб, изд. «Облик», 2003, с. 80-85.
8. Таксами Ч.М., Левченко В.Ф., Славинский Д.А., Черникова С.В. Проблемы развития коренных народов Северных территорий. Этно-экологический подход к исследованию // Коллективная монография под ред. акад. РАН Ч.М.Таксами. Институт Проблем Малочисленных Народов Севера СО РАН, изд. СПбГУ, СПб, 2003. - 110 с.
9. Жуковский А.Н., Бродский А.К., Славинский Д.А. Природа и общество в цифрах на пороге нового тысячелетия // Коллективная монография, СПб, ЦППК ЕН СПбГУ, 2004, 66 с.
10. Славинский Д.А., Черникова С.А. Деятельность и развитие Молодежной научной школы «Устойчивое развитие глазами студентов» в 2004 году //Сб. Теория и практика эколого-географических исследований. Под ред. В.В. Дмитриева, А.И. Чистобаева, Т.А. Алиева, И.О. Шилова. СПб.: ТИН, 2005. – с. 516-520.
11. Славинский Д.А., Черникова С.А. Коренные народы Севера: проблемы устойчивого развития/Сб. Устойчивое развитие и экологический менеджмент. Вып. 1. Материалы международной конференции. Под ред. В.Н. Трояна, И.А. Дементьева. – СПб.: СПбГУ, ВВМ: 2005. – с. 449-460.
12. Славинский Д.А., Черникова С.А. Самоорганизация природных и социальных систем //Образование для устойчивого развития. Программы СПбГУ для дополнительного профессионального образования. Отв ред. В.Н. Троян, И.А. Дементьев. – СПб.: СПбГУ, 2005. – с. 40.
13. Дементьев И.А., Заварзин А.А., Касевич В.Б., Славинский Д.А., Троян В.Н., Черникова С.А. Инновационные подходы в образовании для устойчивого развития//Материалы V Международного Симпозиума «Наука и образование в интересах устойчивого развития», 6-7 апреля 2006 г., Москва, Зеленоград. – 2006. (в печати).