

Глава 3. Детерминационный анализ как метод обработки многомерных экологических данных

Детерминационный анализ (ДА), созданный первоначально для проведения социологических исследований (Чесноков, 1982), в применении к экологическим данным позволяет (Замолодчиков и др., 1992; Булгаков и др., 1992; Максимов и др., 2000а; Левич и др., 2001) устанавливать наличие зависимостей между различными компонентами экосистем (в том числе, между живым и косным), включать в анализ как количественные, так и качественные переменные, учитывать совокупное действие многих факторов, ранжировать установленные зависимости по величине описанных выше критериев точности и полноты, проводить контекстный анализ, т.е. разбивать исследуемый массив данных на части (по территориальному, временному или любому иному признаку) и работать с каждой из частей в отдельности. Перечисленные достоинства метода ДА позволяют относиться к нему, как к весьма привлекательному инструменту для реализации описанных выше разделов экологического контроля.

3.1. Процедуры детерминационного анализа

При детерминационном анализе данных используется программное обеспечение “ДА-система” (фирма “Контекст”), обладающего всеми необходимыми функциями для осуществления экологического контроля.

Выше уже шла речь (глава 2) о специально разработанном методе обнаружения связи между переменными — методе таблиц сопряженности или перекрестных таблиц (*contingency tables, cross-tabulation*), подразумевающим, как и ДА, введение качественных признаков для количественных переменных. Согласно этому методу, пред-

лагается более или менее произвольно разбивать шкалу измеряемых переменных на классы и подсчитывать частоты попадания результатов измерений в каждый из классов. Те же процедуры реализованы и в ДА. Однако основное преимущество ДА заключается в том, что, в отличие от метода таблиц сопряженности, с его помощью возможно вычисление значений химических или физических параметров окружающей среды, сопряженных с установленными ранее признаками благополучия или неблагополучия биотического компонента экосистемы. Этот этап анализа экологических данных, называемый нормированием потенциально опасных воздействий, является краеугольным камнем всей технологии экологического контроля. На его основе строятся и прогноз состояния экосистемы на перспективу, и меры по управлению “здоровьем” экосистемы.

Рассмотрим подробнее ДА-технология (Левич и др., 2001; Булгаков, 2001б), остановившись отдельно на процедурах, используемых при анализе экологических данных. Все эти процедуры реализованы в прикладном пакете программ “ДА-система” (версия 4.0), предназначенном для работы в операционной среде Windows.

Характерная особенность ДА в том, что в нем наряду с количественными, числовыми, признаками данных можно ввести их качественные, нечисловые, признаки. При этом анализ качественных и количественных данных ведется с учетом их специфики, но с помощью единых процедур. Количество и наполненность маркированных определенными качественными признаками интервалов на шкале дискретных значений числовой переменной задается исследователем в зависимости от стоящей перед ним конкретной задачи и исходя из неких априорных представлений о том, какие значения изучаемой характеристики организма, например, считать низкими, а какие — высокими.

По ходу анализа часто приходится формировать новые, *вторичные*, переменные на основе тех, что уже имеются в исходной матрице данных. Вторичные переменные используются для конструирования всевозможных группировок переменных, для превращения числовых переменных в качественные путем введения интервалов, для закрепления в анализе различных интересующих исследователя сочетаний количественных и качественных признаков.

ДА устанавливает связь (сопряженность) между двумя переменными, одна из которых является объясняющей (качественной или количественной), а другая — объясняемой (всегда качественной). Значимость такой сопряженности задается критериями точности и полноты. Точность — это доля наблюдений, когда сопряженность подтверждается, среди всех наблюдений в определенном диапазоне значений объясняющей переменной; полнота — это доля наблюдений, когда сопряженность подтверждается, среди всех наблюдений в определенном диапазоне значений объясняемой переменной. Примеры вычисления точности и полноты для конкретных сопряженностей даны в разделе 7.2.

Технология ДА позволяет работать не только с полным массивом данных, но и выделять из него субмассивы, задавая определенный контекст. Контекст в ДА — это набор признаков, выполняющих особую роль. Он ограничивает анализируемые данные подвыборкой только тех наблюдений, которые обладают указанными признаками. Задать контекст — это значит предложить ДА-системе работать так, словно в анализируемом массиве данных не существует никаких других наблюдений, кроме тех, которые обладают выделенными признаками. При анализе экологических данных это бывает полезным, когда необходимо ограничить выборку либо определенным периодом времени, либо определенным географическим местоположением, либо однородными климатическими, хозяйственными, территориальными или иными условиями.

В ДА предусмотрена также возможность многофакторного анализа, т.е. получения ответа, например, на вопрос, при каком количественном сочетании различных физико-химических факторов достигаются те или иные значения индикаторных биотических показателей. При этом в ДА существует процедура, позволяющая вычислить вклад каждого фактора в суммарную точность и полноту, реализующиеся в случае одновременного применения всех факторов. Совместное действие нескольких факторов на сообщество может быть проанализировано также с помощью задания контекста, где контекстом будут служить определенные диапазоны значений каких-либо абиотических факторов, или путем объединения нескольких переменных в одну вторичную.

С помощью ДА решается также задача экологического нормирования, т.е. нахождения на множестве значений числовой переменной такого интервала, что совокупность значений этой переменной в пределах границ интервала оказываются наилучшим объясняющим признаком в заданной сопряженности. Наилучшим в том смысле, что точность сопряженности с искомым объясняющим признаком не ниже заданной, а полнота сопряженности максимальна. Соответствующая процедура в ДА называется *оптимизацией* числовой переменной. Таким образом, выбрав в качестве объясняемой переменной какой-либо биотический параметр, свидетельствующий о неудовлетворительном состоянии сообщества организмов, можно для любого фактора окружающей среды определить те его значения, которые как раз и отвечают за возникновение экологического неблагополучия.

3.2. Применение детерминационного анализа для целей экологического контроля

Для анализа были привлечены данные о сообществе речного зоопланктона и воздействующего на него комплекса гидрохимических и гидрологических показателей в реке Суре (Максимов и др., 1999, 2000). Гидрохимические и гидробиологические пробы отбирали в 1994-1997 гг. В качестве гидробиологических показателей исследовали численности видов и экологических групп (классифицированных по величине индекса сапробности) зоопланктона. Среди измеряемых физико-химических переменных в анализе принимали участие 12 показателей: БПК₅ (БПК), концентрации железа (Fe), марганца (Mn), аммония (NH₄), нитритов (NO₂), нитратов (NO₃), фосфатов (PO₄), углеводов, фенолов, растворенного кислорода (O₂), взвешенных веществ, рН. Количество наблюдений, по которым имелись и биологические, и физико-химические сведения, составило 199.

3.2.1. Выбор адекватных индикаторов и границы между нормой и патологией при оценке экологического состояния

Исходя из схемы проведения экологического контроля (рис. 1 во Введении), выбор биотического индикатора, наиболее адекватно описывающего “здоровье”

(“нездоровье”) экосистемы, представляется важнейшим этапом всей технологии экологического контроля. От этого этапа зависит эффективность всех дальнейших шагов по установлению нормативов допустимого воздействия факторов среды и, в конечном счете, по проведению конкретных природоохранных мероприятий.

Для решения этой задачи с помощью пакета ДА был проведен ряд подготовительных операций. В физико-химическом массиве данных каждая из 12 исследованных числовых переменных была преобразована во вторичную качественную переменную, для чего весь ряд значений был разбит на классы в соответствии с 6-балльным классификатором качества по гидрохимическим показателям (Оксиюк и др., 1993), где 1-му классу соответствует наиболее благополучное значение, а 6-му — наименее благополучное. В качестве индикаторных характеристик зоопланктонного сообщества выбрали: 1) общую численность зоопланктона; 2) численность экологических групп зоопланктона, классифицированных на основе сапробности (способности организмов жить при большом содержании загрязняющих веществ в среде) входящих в них видов: в порядке возрастания стойкости к загрязнителям — группы олигосапробных видов, группы олиго-β-сапробных видов, группы β-сапробных видов; 3) класс качества вод (Руководство..., 1992), рассчитанный по величинам индекса сапробности зоопланктоценоза (Pantle, Buck, 1955; Sládeček, 1973) Очевидно, что экологическое неблагополучие зоопланктона или какой-либо его составляющей должно характеризоваться низкой численностью, а экологическое благополучие — наоборот, высоким обилием населяющих ценоз организмов. Возникает вопрос, какие значения численности считать низкими, а какие — высокими? В нашем случае численность каждой из указанных групп была разделена на два примерно равнонаполненных класса: “мало” (низкая численность или отсутствие) и “много” (высокая численность). Известно, что при обработке таких биотических характеристик, как численность или биомасса отдельных групп гидробионтов, наличие в массиве данных нулевых или пропущенных значений сказывается на результативности традиционных статистических методов (Максимов и др., 1999), поскольку в действительности значение численности, равное нулю, совсем не обязательно говорит о его отсутствии в пробе. При существующих методиках измерения численности вполне вероятно, что ни один экземпляр вида с низким обилием просто не попадает в поле зрения исследователя. Су-

существуют ситуации, когда при введении качественного признака “Низкая численность зоопланктона” оправдано включение в него нулевых проб с тем, чтобы не задумываться, как относиться к нулевым значениям — действительно ли их приравнять к нулю или считать пропущенными.

Впрочем, возможны и иные подходы к проведению границы между нормой и отклонением от нормы. Так, при наличии выборки с большим числом наблюдений за длительный промежуток времени (порядка нескольких десятков лет) более эффективным было бы вычислить среднемноголетнее значение численности и считать экологическим благополучием и неблагополучием ситуации, когда численность была соответственно выше и ниже этого значения.

Объясняемыми признаками служили низкие численности суммарного зоопланктона, олигосапробов, олиго- β -сапробов, β -сапробов, высокая численность β -сапробов, а также 3-й (соответствующий максимальным наблюдаемым значениям индекса сапробности) класс качества вод. Объясняющими признаками служили классы качества каждой физико-химической переменной (в случае малой наполненности несколько классов объединяли в один). При исследовании сопряженности численности с классами качества отбирали тот из них, для которого получена наивысшая точность сопряженности. В случае если величины точности для следующих по значению классов были меньше максимального значения не более чем на 5%, более значимым считали класс с максимальной полнотой. Например, при исследовании влияния концентрации PO_4 на низкую численность олигосапробов оказалось, что самые высокие точности получены для 2-го (50%) и 3-го (51%) классов PO_4 . В то же время полнота оказалась значительно выше для 2-го класса (58% против 34%), поэтому истинной признали сопряженность, где объясняющей переменной был 2-й класс качества. В зависимости от переменной благополучными считали классы качества с 1-го по 3-й, неблагополучными — со 2-го по 6-й. Т.е. для тех переменных, для которых классы качества с 3-го по 6-й содержали малое количество наблюдений, благополучным считали только 1-й класс. В том случае, если все классы оказывались примерно равнонаполненными, классы с 1-го по 3-й характеризовали экологическое благополучие, а классы с 4-го по 6-й — неблагополучие. Табл. 3.1 показывает, какие индикаторные биологические характеристики, свидетельствующие об ухудшении экологической обстановки (низкая

численность всего зоопланктона и его олигосапробной составляющей, высокий индекс сапробности зоопланктоценоза), наиболее адекватно отражают степень ущерба от увеличения внешнего воздействия. Снижение численности зоопланктона в целом, олиго-β-сапробов и β-сапробов было сопряжено с неблагоприятными классами качества вод по большинству (8-9) физико-химических показателей, тогда как количество переменных, объясняющих в области неблагоприятных значений три других характеристики, составило менее 50% от общего числа абиотических параметров. Особый интерес вызывает поведение β-сапробных (мезосапробных) организмов, которые занимают промежуточное между олиго- и полисапробами положение в водоеме по характеру отклика на рост внешней нагрузки. В изученном нами случае β-сапробы оказались ближе к олигосапробам, поскольку увеличение концентраций большинства веществ и снижение содержания кислорода приводят, скорее, к падению их численности. Таким образом, предварительный анализ показывает, что различные индикаторные биологические характеристики экосистемы далеко не равнозначны при использовании их как основы для объективной оценки экологического состояния природного объекта. Исходя из данных табл. 3.1, примем низкую численность суммарного зоопланктона, олиго-β-сапробов и β-сапробов в качестве наиболее подходящих характеристик, отражающих максимально возможный комплекс абиотических факторов.

Таблица 3.1. Сопряженность биотических идентификаторов с классами качества вод по физико-химическим показателям (подчеркнуты неблагоприятные для данного показателя классы качества)

Физико-химический показатель	Физико-химические классы качества вод (в скобках значения точности и полноты сопряженности)					
	для низкой общей численности зоопланктона	для низкой численности олигосапробов	для низкой численности олиго-β-сапробов	для низкой численности β-сапробов	для высокой численности β-сапробов	для 3-го (наихудшего) класса качества вод на основе индекса сапробности зоопланктона

БПК	1 (61, 40)	1 (62, 46)	1 (58, 39)	1 (56, 43)	2 (69, 49)	2 (68, 45)
Fe	<u>4</u> (62, 16)	<u>4</u> (54, 16)	<u>4</u> (62, 16)	<u>4</u> (58, 17)	1 (58, 56)	1 (62, 56)
O ₂	<u>3-4</u> (54, 7)	1 (49, 62)	<u>2</u> (52, 22)	<u>3-4</u> (62, 9)	1 (63, 64)	1 (64, 62)
Mn	<u>3-5</u> (69, 22)	1 (47, 56)	<u>3-5</u> (72, 23)	<u>3-5</u> (75, 28)	1 (62, 59)	1 (59, 53)
NH ₄	1 (100, 9)	1 (78, 8)	1 (89, 8)	1 (100, 10)	3 (73, 34)	3 (73, 32)
NO ₂	1-3 (61, 22)	<u>4</u> (47, 43)	<u>4</u> (53, 45)	1-3 (58, 24)	<u>5</u> (72, 28)	<u>5</u> (65, 23)
NO ₃	<u>2</u> (80, 44)	<u>2</u> (69, 42)	<u>2</u> (76, 43)	<u>2</u> (69, 44)	1 (66, 80)	<u>3-4</u> (88, 6)
Углеводороды	<u>5</u> (70, 7)	<u>4</u> (60, 7)	<u>5</u> (70, 7)	<u>5</u> (70, 8)	<u>4</u> (70, 6)	<u>4</u> (70, 6)
pH	<u>3</u> (64, 9)	<u>3</u> (64, 10)	<u>3</u> (71, 10)	<u>3</u> (64, 10)	<u>4</u> (83, 21)	1 (66, 57)
Фенолы	1 (61, 28)	1 (50, 26)	1 (61, 29)	1 (67, 36)	<u>2-3</u> (64, 87)	1 (74, 28)
PO ₄	<u>3</u> (59, 36)	2 (50, 58)	<u>3</u> (61, 38)	<u>3</u> (52, 37)	1 (85, 10)	<u>4</u> (79, 9)
Взвешенные вещества	<u>2</u> (81, 13)	<u>3-6</u> (80, 9)	<u>2</u> (81, 13)	<u>2</u> (69, 13)	1 (59, 91)	<u>3-6</u> (70, 6)

3.2.2. Диагностика причин экологического неблагополучия

После оценивания экологического состояния изучаемого объекта на основе выбранной индикаторной биотической характеристики следует выявить факторы, способствующие возникновению экологического неблагополучия, и ранжировать их в соответствии с величиной вклада в возникающий ущерб.

Положим, что показателем “здоровья” изучаемой пресноводной экосистемы является суммарная численность зоопланктонного сообщества, а границей между экологическим благополучием и неблагополучием является граница соответственно между высокой и низкой численностью. Посмотрим, как низкая численность сопряжена с потенциальными ее причинами — неблагополучными значениями физико-химических показателей. Неблагополучными считали значения, относящиеся к нескольким максимальным для данного показателя классам качества вод. Критерием значимости сопряженности являлась ее точность. При этом был установлен нижний порог точности для значимых переменных — 50%. Полученные сопряженности можно представить в порядке убывания полноты (табл. 3.2). Тогда у каждой абиотической

переменной появляется ранг, характеризующий ее значимость, т.е. степень вклада в снижение численности зоопланктона. Напомним, что полнота Π сопряженности “Если значение фактора высокое, то численность зоопланктона низкая” означает, что $\Pi\%$ случаев высокого значения фактора совпадает со случаями низкой численности зоопланктона, а в остальных $(100-\Pi)\%$ случаев низкая численность зоопланктона должна объясняться влиянием других факторов. В соответствии с установленным порогом точности, в категорию значимых попали 8 переменных, а содержание кислорода, нитритов, фенолов и рН были признаны факторами, не существенными для объяснения причин снижения численности. Заметим, что если изменить порог точности, то изменится и разбиение факторов на значимые и незначимые.

Таблица 3.2. Ранжирование факторов среды, сопряженных с низкой численностью зоопланктона

Объясняющая переменная	Ранг	Точность	Полнота
Значимые факторы			
NH ₄ (4-5 классы)	1	52	62
Fe (2-5 классы)	2	54	49
NO ₃ (2-4 классы)	3	76	48
PO ₄ (3-6 классы)	4	56	45
Углеводороды (3-5 классы)	5	50	29
БПК (3-4 классы)	6	51	27
Mn (3-5 классы)	7	69	22
Взвешенные вещества (2-6 классы)	8	77	20
Незначимые факторы			
NO ₂ (4-6 классы)		47	78
Фенолы (2-3 классы)		46	71
рН (2-4 классы)		44	42
O ₂ (2-4 классы)		49	27

3.2.3. Нормирование нарушающих абиотических воздействий

При осуществлении экологического контроля после определения причин возникновения экологического неблагополучия следует этап их нормирования, т.е. выявления для соответствующих факторов тех значений, выход за пределы которых приводит к переходу экосистемы за границы благополучия. Предусмотренная в ДА процедура оптимизации позволяет определить диапазон значений количественной объясняющей переменной, наиболее точно и полно сопряженный с благополучными или неблагополучными значениями индикаторной характеристики. Если в нашем примере в качестве объясняемой характеристики будем рассматривать показатели благополучия зоопланктоценоза (высокая численность всего зоопланктона, олиго-β-сапробов, β-сапробов), то найденные диапазоны можно рассматривать как ЭДУ исследованных физико-химических факторов.

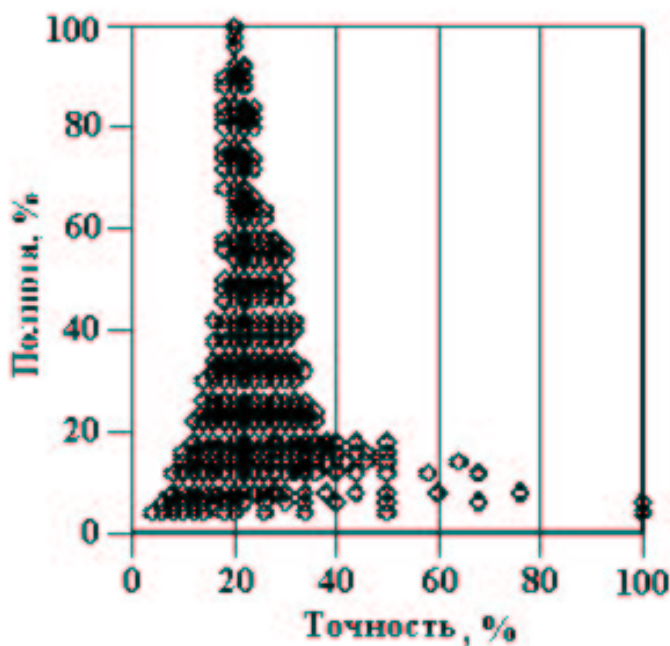


Рисунок 3.1. График зависимости полноты от точности оптимизации числовой переменной

При оптимизации полагали, что концентрации веществ-загрязнителей (Fe, Mn, углеводов, фенолов и взвешенных веществ), а также БПК могут приводить к снижению численности только в области высоких значений, поэтому при оптимизации искали верхний уровень “благополучного” интервала. Для содержания кислорода ситуация обратная — только снижение этого показателя может приводить к неблагоприятным последствиям для зоопланктона, поэтому отыскивали

нижнюю границу интервала. Что касается концентраций аммония, нитритов, нитратов, фосфатов и pH, то заранее не накладывали никаких условий на возможные границы, поскольку как слишком высокие, так и слишком низкие значения этих переменных могут вызывать отклонения от благополучного состояния организмов. В про-

цессе оптимизации задавали нижнюю границу точности (51%), после чего максимизировали полноту. С помощью графиков зависимости полноты от точности, задаваемых процедурой ДА (рис. 3.1), легко можно увидеть, на какой максимум полноты можно рассчитывать в пределах заданного порога точности.

Результаты нормирования (табл. 3.3) свидетельствуют о том, что по большинству физико-химических показателей между ЭДУ, вычисленными для разных индикаторных характеристик, не существует существенной разницы. Рядом со значениями ЭДУ проставлены значения точности и полноты. Вклад каждого фактора в возникновение экологического неблагополучия определялся полнотой.

Таблица 3.3. ЭДУ факторов среды для различных биологических индикаторов (н.у. — нижний уровень; в.у. — верхний уровень)

Физико-химический показатель	Диапазон наблюдаемых значений	Значение ЭДУ (в скобках точность и полнота)		
		для численности суммарного зоопланктона	для численности олиго-β-сапробов	для численности β-сапробов
БПК (в.у.), мг/л	0.48-12.16	4.48 (51, 80)	4.56 (52, 82)	4.64 (58, 84)
Fe (в.у.), мг/л	0.01-5.88	0.84 (56, 85)	0.84 (57, 85)	0.84 (63, 86)
O ₂ (н.у.), мг/л	4.6-18.48	5.28 (53, 88)	6.32 (53, 79)	7.6 (61, 70)
Mn (в.у.), мг/л	0-0.98	0.07 (56, 74)	0.07 (58, 75)	0.07 (64, 76)
NH ₄ (н.у.; в.у.), мг/л	0.04-2.9	0.2-1.28 (58, 71)	0.2-1.29 (59, 71)	0.13-1 (63, 69)
NO ₂ (н.у.; в.у.), мг/л	0-1.58	0.04-0.2 (60, 72)	0.03-0.24 (58, 74)	0.03-0.16 (66, 71)
NO ₃ (н.у.; в.у.), мг/л	0.02-6.5	0.02-0.82 (66, 78)	0.02-0.84 (64, 76)	0.02-0.8 (67, 70)
Углеводороды (в.у.), мг/л	0-0.7	0.45 (51, 90)	0.09 (51, 75)	0.45 (56, 88)
pH (н.у.; в.у.)	5.5-9.56	7.75-9.56 (57, 69)	7.7-9.56 (60, 74)	7.75-9.56 (65, 71)
Фенолы (в.у.), мг/л	0.0002-0.016	0.0038 (55, 77)	0.0038 (53, 74)	0.016 (56, 100)
PO ₄ (н.у.; в.у.), мг/л	0-2.4	0-0.27 (54, 75)	0-0.26 (57, 75)	0-0.26 (62, 73)
Взвешенные вещества (в.у.), мг/л	0.4-127	16.5 (57, 94)	11 (57, 76)	16 (62, 90)

Зарегистрированные несовпадения ЭДУ, вычисленных для разных индикаторов экологического состояния, не должны вводить в заблуждение. ДА только констатирует, насколько потенциально опасен тот или иной избыток или, наоборот, недостаток данного вещества (или любого другого фактора нехимической природы) для конкретного участка биоты, выбранного по некоторым соображениям в качестве показателя, отражающего степень “здоровья” экосистемы. Понятно, что другие индикаторы даже в пределах одной и той же группы организмов могут совсем иначе воспринимать возникающие внешние возмущения.

3.2.4. Анализ совокупного действия факторов среды

В программе ДА предусмотрена возможность многофакторного анализа причин экологического неблагополучия. Соответствующая процедура позволяет использовать в качестве объясняющих одновременно до пяти независимых переменных. Единственное ограничение — только одна из них может носить количественный характер.

Рассмотрим ситуацию с определением классов качества вод по физико-химическим показателям, ответственным за снижение численности зоопланктона в целом и отдельных его групп, на предмет анализа совместного действия нескольких факторов. Методика ДА в этом случае предусматривает создание комбинированной объясняющей переменной, объединяющей несколько исходных качественных переменных (не более пяти). Мы разделили 12 имевшихся в нашем распоряжении показателей на три группы: биогенные элементы (азот аммонийный, нитритный, нитратный, фосфор минеральный); вещества-загрязнители (Fe, Mn, углеводороды, фенолы, взвешенные вещества); показатели, свидетельствующие о характере продукционно-деструкционных процессов в водоеме (БПК, концентрация кислорода, pH). После этого поочередно устанавливали сопряженности индикаторных характеристик со всеми возможными сочетаниями классов качества переменных в группе. Для каждого случая отбирали сопряженность, имеющую максимальную точность, превышающую 49%, но с полнотой не менее 10% (табл. 3.4). Решаемая с помощью описанного комбинирования нескольких переменных задача формулируется как поиск сочетания та-

ких значений нескольких факторов, которое наиболее точно объясняет выбранное значение индикаторной переменной.

Оказалось, что для набора переменных-загрязнителей не существует такого сочетания классов качества, которое с удовлетворительной точностью объясняло бы ухудшение экологического состояния реки по всем трем выбранным индикаторным группам переменных. Неблагополучные классы качества вод по всем биогенным элементам с высокой степенью точности сопутствуют низким численностям всех групп зоопланктона. В то же время для продукционно-деструкционных характеристик на-

Таблица 3.4. Комбинированные зависимости биотических индикаторов от классов качества по физико-химическим показателям с указанием их существенности

Набор физико-химических показателей, составляющих комбинированную объясняющую переменную	Физико-химические классы качества вод (в круглых скобках — значения суммарных точности и полноты сопряженности, в квадратных — вклады в суммарную полноту отдельных переменных)		
	для низкой общей численности зоопланктона	для низкой численности олиго-β-сапробов	для низкой численности β-сапробов
NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , PO ₄	4-5, 4-6, 2-4, 3 (86, 12) [-6, -1, -6, -17]	4-5, 4-6, 2-4, 3 (86, 12) [-6, -1, -7, -17]	4-5, 4-6, 2-4, 2 (63, 11) [-7, -1, -8, -15]
Fe, Mn, углеводороды, фенолы, взвешенные вещества	нет правил	нет правил	нет правил
БПК, O ₂ , pH	1, 1, 1 (82, 18) [-14, -4, -9]	1, 1, 1 (77, 17) [-18, -4, -8]	1, 1, 1 (77, 20) [-13, -6, -8]

блюдается обратная картина: экологическому неблагополучию, идентифицированному по численности зоопланктеров, соответствует полное благополучие по БПК, кислороду и pH. Если вернуться к результатам однофакторного анализа (табл.3.1), то по крайней мере для O₂ и pH было показано влияние высоких классов качества этих показателей на неблагополучие биоты. Очевидно, комбинированное исследование нескольких факторов заставляет несколько пересмотреть установленные ранее связи между компонентами экосистемы. Дело в том, что найденные ранее объясняющие классы качества (1-й для БПК, 3-4-й для O₂, 3-й для pH) вместе встретились всего

один раз. Естественно, что даже при 100%-ой точности полнота такой сопряженности не могла превысить 1%. Отсюда вывод — три названных физико-химических показателя слабо сопряжены друг с другом в том смысле, что их наиболее точные однофакторные зависимости, будучи объединенными в один объясняющий признак, как бы “растворяются” в общем массиве данных и теряют свою значимость. Какому же классу качества, например, для O_2 , в этой ситуации доверять — 3-4-му, исходя из однофакторного анализа, или 1-му, ориентируясь на комбинированный? Договоримся, что при установленной нижней границе точности 50% критерием ценности той или иной сопряженности является ее полнота. Полнота однофакторных сопряженностей O_2 и рН с индикатором “общая численность зоопланктона” (соответственно 7 и 9%) оказалась ниже полноты комбинированной сопряженности (18%). Поэтому примем значения классов, полученные в ходе комбинированного исследования, за истинные. Корректировка результатов однофакторного анализа не требуется лишь при объяснении низкой численности олиго-β-сапробов 2-м классом качества по O_2 (полнота 22% против 17% при комбинированном исследовании). Что касается биогенных элементов, то здесь, наоборот, корректировка необходима только для NH_4 при объяснении низкой численности суммарного зоопланктона и олиго-β-сапробов (табл. 3.1 и 3.4).

Учет сразу нескольких объясняющих переменных возможен не только при описанном комбинированном анализе, но и при однофакторном анализе, когда на основе заданных значений нескольких физико-химических факторов конструируется одна сложная вторичная переменная. В качестве основы для подобного исследования использовали данные табл. 3.3 об ЭДУ факторов, объясняющих низкую численность суммарного зоопланктона. Для количественной переменной “взвешенные вещества”, обладающей наибольшей полнотой (94%), была создана качественная переменная “значение переменной выходит за границы ЭДУ”. Та же процедура была проделана также для трех других произвольно выбранных переменных: рН, NH_4 , NO_2 . После этого вычисляли сначала точность и полноту объяснения низкой численности зоопланктона каждой из полученных вторичных переменных в отдельности, а затем путем поочередного добавления к “взвешенным веществам” трех других факторов и образования трех новых вторичных переменных исследовали сопряженности типа “если значение хотя бы одной (двух, трех, четырех) переменных выходит за границы ЭДУ,

то наблюдается низкая численность зоопланктона” (табл.3.5). Как показывают значения полноты, чем большее количество факторов входит во вторичную переменную, тем полнее возникающее экологическое неблагополучие описывается данным набором факторов, поэтому указанный способ анализа решает задачу поиска совокупности факторов, наиболее полно объясняющей выбранное значение индикаторной переменной. Величина полноты 92% для переменной, объединяющей все четыре фактора, свидетельствует о том, что 8% случаев неблагополучия объясняется иными факторами, т.е. существуют ситуации, когда численность снижается при соблюдении ЭДУ по взвешенным веществам, рН, NH₄ и NO₂.

Таблица 3.5. Учет сопряженности низкой численности зоопланктона с несколькими объясняющими факторами путем конструирования вторичной переменной

Объясняющая переменная	Точность сопряженности с низкой численностью зоопланктона	Полнота сопряженности с низкой численностью зоопланктона
Взвешенные вещества (несоблюдение ЭДУ)	83	29
рН (несоблюдение ЭДУ)	60	47
NH ₄ (несоблюдение ЭДУ)	62	48
NO ₂ (несоблюдение ЭДУ)	59	52
Взвешенные вещества + рН (несоблюдение ЭДУ хотя бы по одному из факторов)	63	61
Взвешенные вещества + рН + NH ₄ (несоблюдение ЭДУ хотя бы по одному из факторов)	58	81
Взвешенные вещества + рН + NH ₄ + NO ₂ (несоблюдение ЭДУ хотя бы по одному из факторов)	54	92

Анализ совместного действия факторов с помощью задания контекста описан в следующем разделе.

3.2.5. Роль контекстов при исследовании сопряженностей

Иногда оказывается, что трудно или невозможно найти определенные связи между различными компонентами экосистем, работая с полным массивом данных. В этих случаях эффективность анализа может быть повышена за счет выделения части данных по какому-либо признаку (например, пространственному или временному) в более узкий подмассив.

Напомним, что при поиске биотических индикаторов, наиболее адекватно характеризующих неблагоприятное экологическое состояние сообщества зоопланктона под влиянием внешних воздействий, выяснилось, что неблагоприятный, 3-й, класс качества воды, вычисленный по значениям индекса сапробности зоопланктона, сопряжен с ухудшением качества воды лишь по 5 из 12 физико-химических показателей (табл. 3.1). Это относится ко всему включенному в анализ массиву данных. Однако отбор зоопланктонных и физико-химических проб проводили на двух участках реки (русло и водохранилище вместе с приплотинной акваторией), которые могли отличаться по характеру взаимодействия между живым и неживым компонентами экосистемы. Метод ДА с помощью задания контекста позволил разделить данные согласно указанным пространственным границам и провести анализ сопряженностей внутри каждого выделенного участка.

Таблица 3.6. Сопряженность экологического неблагополучия зоопланктона с классами качества вод по физико-химическим показателям в зависимости от контекста исследования (подчеркнуты неблагоприятные для данного показателя классы качества)

Физико-химический показатель	Физико-химические классы качества вод для 3-го класса качества воды по состоянию зоопланктона (в скобках значения точности и полноты сопряженности)		
	без контекста	контекст “русло”	контекст “водохранилище и приплотинный участок”
БПК	2 (68, 45)	2 (56, 44)	2 (76, 45)
Fe	1 (62, 56)	<u>2-3</u> (59, 51)	1 (73, 69)
O ₂	1 (64, 62)	<u>2</u> (57, 37)	1 (73, 73)
Mn	1 (59, 53)	<u>2</u> (63, 35)	1 (71, 60)

NH ₄	3 (73, 32)	3 (78, 16)	<u>5</u> (100, 10)
NO ₂	<u>5</u> (65, 23)	<u>5</u> (63, 28)	<u>6</u> (83, 25)
NO ₃	<u>3-4</u> (88, 6)	<u>2</u> (65, 47)	<u>3-4</u> (88, 9)
Углеводороды	<u>4</u> (70, 6)	<u>4</u> (67, 5)	1-2 (69, 57)
pH	1 (66, 57)	1 (61, 70)	1 (70, 49)
Фенолы	1 (74, 28)	1 (72, 42)	1 (76, 21)
PO ₄	<u>4</u> (79, 9)	<u>4</u> (63, 12)	<u>4</u> (100, 8)
Взвешенные вещества	<u>3-6</u> (70, 6)	<u>2</u> (58, 16)	<u>3-6</u> (78, 9)

Оказалось, что для проб, отобранных в русле реки, высокие значения индексов сапробности соответствуют неблагоприятным классам качества вод по 8 физико-химическим показателям (табл. 3.6), тогда как для проб из водохранилища число таких показателей не превышает 5. Таким образом, мы видим, что индекс сапробности сообщества зоопланктона, признанный нами не вполне пригодным для оценки экологического состояния речной экосистемы в целом, предстает характеристикой, более адекватно описывающей степень экологического ущерба зоопланктерам, обитающим в проточной воде, от действия большинства абиотических факторов.

Взглянем с точки зрения задания временного контекста на проблему нормирования физико-химических показателей. Посмотрим, насколько будут отличаться результаты оптимизации факторов, влияющих на общую численность зоопланктона в зависимости от времени отбора пробы. Для этого массив данных был разделен на два подмассива, объединяющих наблюдения соответственно за 1993-1995 (93 наблюдения) и 1996-1997 (106 наблюдений) гг.

Обращает на себя внимание факт повышения толерантности зоопланктоценоза по отношению к большинству факторов в 1996-1997 гг. по сравнению с начальным периодом исследования (табл. 3.7). Диапазоны безопасных (т.е. не приводящих к снижению численности зоопланктона) значений таких факторов, как БПК, содержание кислорода, концентрации аммонийного азота, углеводов, фенолов, фосфатов, взвешенных веществ со временем стали шире, что может свидетельствовать о постепенной адаптации сообщества к условиям данного водоема. Интервалы ЭДУ для нитратного, нитритного азота и марганца несколько сузились, хотя и в небольшой степени, что скорее всего говорит о стабилизировавшемся отклике зоопланктона на эти воздействия. Снижение значений ЭДУ для pH — по-видимому, знак того, что про-

изошло смещение зоны толерантности зоопланктонных организмов в сторону более кислой среды.

Таблица 3.7. Сравнение ЭДУ факторов среды, вычисленных для различных периодов исследования

Физико-химический показатель	Значение ЭДУ для численности суммарного зоопланктона		
	Контекст “1993-1995 гг.”	Контекст “1996-1997 гг.”	1993-1997 гг.
БПК (в.у.), мг/л	2.72	8.8	4.48
Fe (в.у.), мг/л	0.84	0.84	0.84
O ₂ (н.у.), мг/л	10.7	4.8	5.28
Mn (в.у.), мг/л	0.07	0.06	0.07
NH ₄ (н.у.; в.у.), мг/л	0.2-0.63	0.13-1.28	0.2-1.28
NO ₂ (н.у.; в.у.), мг/л	0.04-0.12	0.04-0.08	0.04-0.2
NO ₃ (н.у.; в.у.), мг/л	0.02-0.75	0.03-0.59	0.02-0.82
Углеводороды (в.у.), мг/л	0.02	0.12	0.45
pH	7.76-9.56	7.35-8.25	7.75-9.56
Фенолы (в.у.), мг/л	0.0019	0.0034	0.0038
PO ₄ (н.у.; в.у.), мг/л	0.06-0.24	0-0.31	0-0.27
Взвешенные вещества (в.у.), мг/л	11.5	16.5	16.5

При анализе данных экологического мониторинга с помощью введения контекста можно накладывать на включаемые в анализ данные практически любые необходимые исследователю условия. Например, при поиске значений факторов среды, в пределах которых суммарная численность зоопланктона остается высокой, можно задать контекст, согласно которому будут отобраны те наблюдения, в которых была также высока численность отдельных видов, например, доминирующих в зоопланктоценозе. Или, чтобы вычислить ЭДУ какого-либо показателя при благополучии других абиотических факторов, предлагается контекст “значения выделенных пользователем физико-химических показателей, но не оптимизируемого, относятся к 1-му

классу качества”. Впрочем, такую сопряженность можно отнести к способу комбинированного анализа данных, о котором шла речь в разделе 3.2.4.

Рассмотрим другие варианты учета при анализе нескольких факторов с помощью задания контекста. Посмотрим, как изменятся ранее вычисленные ЭДУ всех физико-химических показателей (табл.3.8) при условии, что все остальные переменные имеют значения, относящиеся к благополучным классам качества (от 1-го до 3-го в зависимости от переменной). Анализ проводили отдельно для каждой качественной группы: биогенных элементов, веществ-загрязнителей и показателей продукции-деструкции. Для БПК, O₂, Fe и фенолов при заданной нижней границе точности (50%) не удалось получить значимых интервалов. Для большинства других переменных (NH₄, NO₂, NO₃, углеводороды, pH, PO₄, взвешенные вещества) границы ЭДУ получились более узкими (для биогенных элементов это касается, прежде всего, верхних границ). Только для фенолов верхний уровень ЭДУ (0.0055) был немного выше, нежели при однофакторном исследовании. Очевидно, когда большинство абиотических факторов имеют безопасные для зоопланктона значения, сами организмы, “привыкнув” к таким благоприятным условиям, сужают границы толерантности по отношению к этим факторам. При одновременном ухудшении качества вод по некоторому количеству физико-химических показателей (что, по всей вероятности, и случается, если не накладывать на них дополнительных условий в виде контекста) происходит адаптация к новым уровням воздействия, и границы ЭДУ могут стать шире.

Таблица 3.8. Комбинированная оптимизация физико-химических показателей путем задания контекста

Физико-химический показатель	Контекст	Контекстные ЭДУ для суммарной численности зоопланктона	Точность	Полнота	ЭДУ без задания контекста
БПК (в.у.), мг/л	благополучие по O ₂ , pH	-	-	-	
Fe (в.у.), мг/л	благополучие по Mn, углеводородам, фенолам,	-	-	-	

	взвешенным веществам				
O ₂ (н.у.), мг/л	благополучие по БПК, рН	-	-	-	
Mn (в.у.), мг/л	благополучие по Fe, углеводородам, фенолам, взвешенным веществам	0.07	55	86	0.07
NH ₄ (н.у.; в.у.), мг/л	благополучие по NO ₂ , NO ₃ , PO ₄	0.18-0.45	86	60	0.2-1.28
NO ₂ (н.у.; в.у.), мг/л	благополучие по NH ₄ , NO ₃ , PO ₄	0.02-0.036	79	55	0.04-0.2
NO ₃ (н.у.; в.у.), мг/л	благополучие по NO ₂ , NH ₄ , PO ₄	0.3-0.62	83	83	0.02-0.82
Углеводороды (в.у.), мг/л	благополучие по Fe, Mn, фенолам, взвешенным веществам	0.014	67	50	0.45
рН	благополучие по O ₂ , БПК	8.12-9.11	64	53	7.75-9.56
Фенолы (в.у.), мг/л	благополучие по Fe, Mn, углеводородам, взвешенным веществам	0.0055	62	92	0.0038
PO ₄ (н.у.; в.у.), мг/л	благополучие по NO ₂ , NH ₄ , NO ₃	0.06-0.23	75	60	0-0.27
Взвешенные вещества (в.у.), мг/л	благополучие по Fe, Mn, углеводородам, фенолам	-	-	-	

3.2.6. Выявление неполноты программ мониторинга

Когда в разделе 3.2.1 мы искали индикаторные биотические характеристики, наиболее достоверно свидетельствующие о процессах деградации в экосистеме, выяснилось, что, например, низкая численность олигосапробов не годится для подобной индикации, поскольку сопряжена с ухудшением качества вод лишь по немногим из определяемых физико-химических показателей. Вполне вероятно, что снижение численности данной специфической группы видов, обычно заселяющих наиболее чистые воды, могло быть связано с некоторыми иными факторами неживой природы, не учтенными нами при анализе. То, что причины экологического неблагополучия лежат вне исследованного набора факторов, свидетельствует также низкая суммарная полнота сопряженностей при анализе, учитывающем совокупное действие факторов (раздел 3.2.4). Таким образом, ДА дал возможность установить, что для более объективного выбора самого адекватного индикатора качества вод необходим как можно более широкий набор абиотических факторов среды, включая не только физические и химические, но и, например, что очень важно для водных экосистем, гидрологические параметры (расходы воды, водность, уровень воды).

Занимаясь оценкой экологического состояния, нормированием и ранжированием факторов, нарушающих экологическое благополучие, необходимо учитывать влияние этих факторов на различные компоненты биоты. В частности, для водных экосистем в идеале средствами ДА можно провести экологический контроль отдельно для фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, перифитона, макрофитов, nekтона, а затем из всех полученных ЭДУ для данного показателя выбрать самый жесткий. Впрочем, возможен путь, когда исследуются сопряженности между отдельными биотическими компонентами (см. следующий раздел), и если удастся найти некую биотическую переменную, позволяющую объективно провести границу между благополучием и неблагополучием биоценоза в целом (к примеру, продукция консументов 2-3-го порядка), то предлагается его и считать истинным индикатором экологического состояния и по нему проводить все описанные этапы контроля.

3.3. ДА как способ исследования сопряженностей между различными компонентами экосистемы

В работах Д.Г.Замолодчикова с соавторами (1992) и Н.Г.Булгакова с соавторами (1992) детерминационный анализ использовали для выявления зависимости биотических показателей нагульных и выростных прудов с поликультурой карпа и растительных рыб (рыбопродуктивности, конечной навески и выживаемости рыбы) от тех или иных переменных гидрохимического и гидробиологического характера.

Исходные данные для статистической обработки по выростным прудам, функционировавшим в режиме поликультуры, были взяты из соответствующих материалов Волжского экспериментального рыбного завода Астраханской области. За период с 1987 по 1990 гг. для двенадцати выростных годопрудов был составлен массив переменных (Булгаков и др., 1992). Термин "годопруд" означает наблюдение в данном конкретном пруду в определенный год, поскольку один и тот же водоем мог быть задействован в разные сезоны. Набор переменных, для которых имелись данные по всем годопрудам, включал следующие блоки:

- 1) Рыбоводные характеристики — начальные и конечные навески, плотность посадки, выживаемость, продуктивность отдельно по видам рыб и общая рыбопродуктивность;
- 2) количество внесенных азотных и фосфорных удобрений (сумма за сезон и отдельно за апрель-май, июнь-июль и август-сентябрь);
- 3) гидрология пруда — глубина и площадь;
- 4) гидрохимические параметры прудов — содержание кислорода, рН, перманганатная окисляемость, концентрация азота и фосфора, отношение азота к фосфору в воде;
- 5) абсолютные и относительные биомассы таксонов фитопланктона (хлорококковые, вольвоксовые, зеленые, диатомовые, эвгленовые, цианобактерии) и общая его биомасса;
- 6) абсолютные биомассы таксонов зоопланктона (веслоногие, ветвистоусые, колероватки) и общая его биомасса;

7) максимальные сезонные биомассы, а также время в сутках от заливки пруда до достижения этого максимума для отдельных таксонов и суммарного фитопланктона.

Для переменных из п.п. 4-6 в виде самостоятельных переменных фигурировали среднесезонные значения соответствующего параметра, а также усреднения за апрель-май, июнь-июль, август-сентябрь.

Всего, таким образом, было проанализировано 138 переменных. Посредством ДА весь ряд из 12 значений для каждой переменной был разделен на два условных класса — "мало" и "много". Разбиение в каждом случае происходило нелинейным образом так, чтобы в каждом классе оказалось не менее четырех и не более восьми значений. При этом граница между классами "мало" и "много" для каждой конкретной переменной принималась исходя из гидрохимических нормативов для рыбоводных прудов, а также из общих представлений о том, какая биомасса фито- и зоопланктона считается высокой, а какая — низкой. Если высокому значению объясняемой переменной соответствовало высокое значение объясняющей переменной, то такую детерминацию (сопряженность) именовали положительной, если наоборот — отрицательной. Для анализа были отобраны только значимые детерминации, т.е. те, которые соответствуют определенным порогам точности и полноты (соответственно не менее 50 и 60 %).

Объясняемой переменной "высокая общая рыбопродуктивность" сопутствовало повышенное содержание азота в удобрениях, но не в воде прудов. Вероятно, активное вовлечение минерального азота в процессы ассимиляции ведет к наблюдаемому снижению его концентрации. Фосфор, как и предполагалось, не требуется в большом количестве для роста ихтиомассы. На рост рыбопродуктивности положительно влияет повышенное содержание кислорода, особенно в конце сезона, а отрицательно — высокая окисляемость. Оказалось также, что наиболее благоприятны весной низкие значения водородного показателя, а осенью — высокие. Последний факт, впрочем, может быть связан с метаболической деятельностью рыб и других гидробионтов. Так что в данном случае нельзя однозначно ответить на вопрос, что было причиной, а что — следствием. И тогда весьма вероятно, что рыбопродуктивность следует перекалибровать в объясняющую переменную. В отношении фитопланктона была отме-

чена положительная сопряженность рыбопродуктивности со среднесезонной биомассой зеленых и с осенней биомассой эвгленовых водорослей. Хлорококковые и диатомовые водоросли сопряжены с высокой рыбопродуктивностью, имея низкую биомассу. Правда, для относительной биомассы хлорококковых картина обратная. Высокая продуктивность сопряжена с малым обилием цианобактерий как по абсолютной, так и по относительной биомассе. Отрицательная детерминация была найдена и для общей массы водорослей. Заметим также, что на повышение рыбопродуктивности влияют также ранние пики цветения вольвоксовых и зеленых водорослей. Среди таксонов зоопланктона положительную сопряженность обнаруживала только биомасса веслоногих раков. У остальных групп и зоопланктона в целом знак сопряженности менялся на протяжении сезона.

Большой продуктивности по белому толстолобику соответствовало повышенное количество азотных и пониженное — фосфорных удобрений; высокая концентрация всех минеральных форм азота и низкая — фосфора, и, соответственно, повышенные соотношения этих элементов в воде; увеличенное содержание растворенного кислорода и уменьшенная окисляемость (за исключением конца сезона); большая годовая сумма тепла; повышенная биомасса (абсолютная и относительная) представителей отдела зеленых водорослей и пониженная — цианобактерий. Для диатомовых водорослей существенных детерминаций не найдено, а в отношении эвгленовых положительная детерминация выявлена с низкой относительной биомассой (в среднем за сезон). Примечательно, что в тех случаях, когда пруды обладали высокой продуктивностью по белому толстолобику, чаще всего в них было мало зоопланктона, что согласуется еще и с отрицательной сопряженностью с продуктивностью по пестрому толстолобику. Известно, что последний является основным потребителем зоопланктонной продукции в пруду. Продукция белого толстолобика прямо зависела от его конечной навески и выживаемости, а также от выживаемости пестрого толстолобика, но была отрицательно сопряжена с конечной навеской последнего. Поэтому можно говорить, что весь комплекс указанных факторов влиял прежде всего на конечную навеску, а не на выживаемость: бедность прудов зоопланктоном не стала причиной массового отхода пестрых толстолобиков, но и не позволила существенно прибавить в весе, что и предопределило в конечном счете рыбоводные итоги.

Для высокой продуктивности по пестрому толстолобику практически не существовало положительных сопряженностей ни с количеством удобрений, ни с концентрацией биогенных элементов, ни с кислородным режимом, ни с биомассой фитопланктона и отдельных его частей. Высокому съему продукции этого вида рыб сопутствовала лишь постоянно высокая вторичная продукция копепод, а также коловраток и всего зоопланктона в отдельные моменты сезона.

Единственным таксоном фитопланктона, чья абсолютная биомасса положительно сопряжена с высокой продукцией карпа, стали цианобактерии. Высокая биомасса зоопланктона, главным образом, веслоногих, совпадала с высокой продуктивностью карпа в августе-сентябре. В остальное время никаких положительных сопряженностей не было обнаружено.

При исследований факторов, влияющих на рыбопродуктивность и относительную биомассу зеленых водорослей в 20 нагульных прудах (Замолодчиков и др., 1992), выяснилось, что большая общая рыбопродуктивность наблюдалась при низком и среднем содержании кислорода в воде (все переменные были разделены на три класса "мало", "средне" и "много"). В целом для данной объясняемой переменной было выявлено небольшое количество значимых сопряженностей.

В конце сезона (август-сентябрь), т.е. тогда, когда биомасса рыб достигает до максимума, высокой продуктивности по белому толстолобику сопутствовали низкие концентрации кислорода. Велики также сопряженности с низкими значениями биомассы зоопланктона, который, во-первых, не представляет никакой пищевой ценности для белого толстолобика, во-вторых, может действовать как конкурент за пищевой ресурс.

Следствием высокой продукции пестрых толстолобиков также было пониженное содержание кислорода. Характерно, что для данной объясняемой переменной было выявлено мало сопряженностей с фитопланктонными показателями — микроводоросли, как известно, не являются основной пищей этого вида рыб.

Рыбопродуктивность по карпу была сопряжена с низкой биомассой большинства таксонов фитопланктона. Это доказывает, что в системе трофических связей пруда не наблюдается никакого взаимодействия между микроводорослями и карпом, который питается бентосом и зоопланктоном.

Наиболее важными из переменных, объясняющих высокую относительную среднесезонную биомассу зеленых водорослей, оказались низкие относительные биомассы цианобактерий и пиррофитовых водорослей, что свидетельствует о конкуренции за ресурс между двумя последними отделами водорослей и зелеными. Также была отмечена сопряженность с низкой среднесезонной биомассой зоопланктона. В данном случае зеленые водоросли в результате ослабления пресса выедания получают условия для массового развития.