

## **Глава 8. Практика региональной экологической диагностики и нормирования абиотических факторов в пресноводных объектах России и сопредельных стран**

### 8.1. Сравнение речных бассейнов по значениям ЭДУ значимых факторов среды

Кроме бассейна Дона, по значениям индексов сапробности фито-, зоопланктона и зообентоса с помощью метода ЭДУ была проведена диагностика экологического состояния и рассчитаны экологически допустимые уровни абиотических факторов, приводящих к экологическому неблагополучию в бассейнах большинства крупнейших рек бывшего СССР. На основе полученных сведений проводили сравнение бассейнов по значениям ЭДУ значимых факторов и анализировали причины расхождений в уровнях региональных нормативов.

#### 8.1.1. Исследование водных экосистем Восточной Европы

Анализ причин экологического неблагополучия проводили для 8 бассейнов крупнейших рек Европы (Максимов и др., 2001а):

- 1) бассейн Западной Двины (р. Западная Двина);
- 2) бассейн Немана (реки Неман, Виляя);
- 3) бассейн Дуная (реки Дунай, Тиса, Белая Тиса, Прут);
- 4) бассейн Днестра (р. Днестр, Дубоссарское водохранилище);
- 5) бассейн Днепра (реки Днепр, Припять, водохранилища Киевское, Кременчугское, Днепродзержинское, Каховское);
- 6) бассейн Волги (р. Волга, водохранилища Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Куйбышевское, Саратовское, Волгоградское).

Исходные гидробиологические данные включали в себя сведения о численности, и биомассе фито-, зоопланктона, перифитона и зообентоса. Оценку экологического состояния проводили отдельно для толщи воды (по показателям индексов сапробности фито- и зоопланктона, перифитона) и для грунтов (по показателям олигохетных и биотических индексов зообентоса). В результате по каждому створу наблюдения за период 1980-1990 гг. ежегодно имели по две среднегодовые оценки состояния на 5-балльной экспертной шкале (Ежегодники состояния..., 1981-1991), соответствующей экологическим модификациям состояния сообществ (Абакумов, 1991), где 1 баллу соответствует наибольшее экологическое благополучие, а 5 баллам — наибольшее неблагополучие. Чтобы оценить экологическое состояние водной толщи, брали наихудший из имеющихся баллов по трем группам организмов. Наблюдения с баллами 1 и 2 маркировали как благополучные, а наблюдения, оцененные баллами от 3 до 5, как неблагополучные.

В качестве абиотических факторов исследовали среднегодовые значения следующих показателей: концентрации растворенного кислорода ( $O_2$ ), взвешенных веществ, общего фосфора (P), азота аммонийного ( $NH_4$ ), нитратного ( $NO_3$ ) и нитритного ( $NO_2$ ), фенолов, нефтепродуктов, пестицидов, меди (Cu), железа (Fe), хрома (Cr), ртути (Hg), цинка (Zn), никеля (Ni), фтора (F), синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>), химическое потребление кислорода (ХПК), водность, температура (Ежегодники качества..., 1984-1991; Ежегодные данные..., 1990; Ежеквартальные бюллетени..., 1975-1983). Поскольку программы наблюдений за абиотическими характеристиками в разных бассейнах различались, всего оказалось 7 факторов, измеряемых во всех бассейнах:  $NH_4$ , Cu, нефтепродукты, БПК<sub>5</sub>, P,  $NO_2$ , фенолы.

Во всех указанных выше речных бассейнах были получены ЭДУ факторов, значимых для возникновения экологического неблагополучия биоценозов водной толщи (организмы фито-, зоо-, бактериопланктона) и грунтов (организмы зообентоса). Значения ЭДУ по Дунаю, Днестру, Днепру и Волге взяты из литературы (Замолотчиков, 1993). Соответственно для каждого бассейна и подбассейна должны были быть составлены два списка значимых факторов с указанием их ЭДУ. Однако оказалось, что все оценки экологического состояния биоценозов водной толщи в бассейнах Запад-

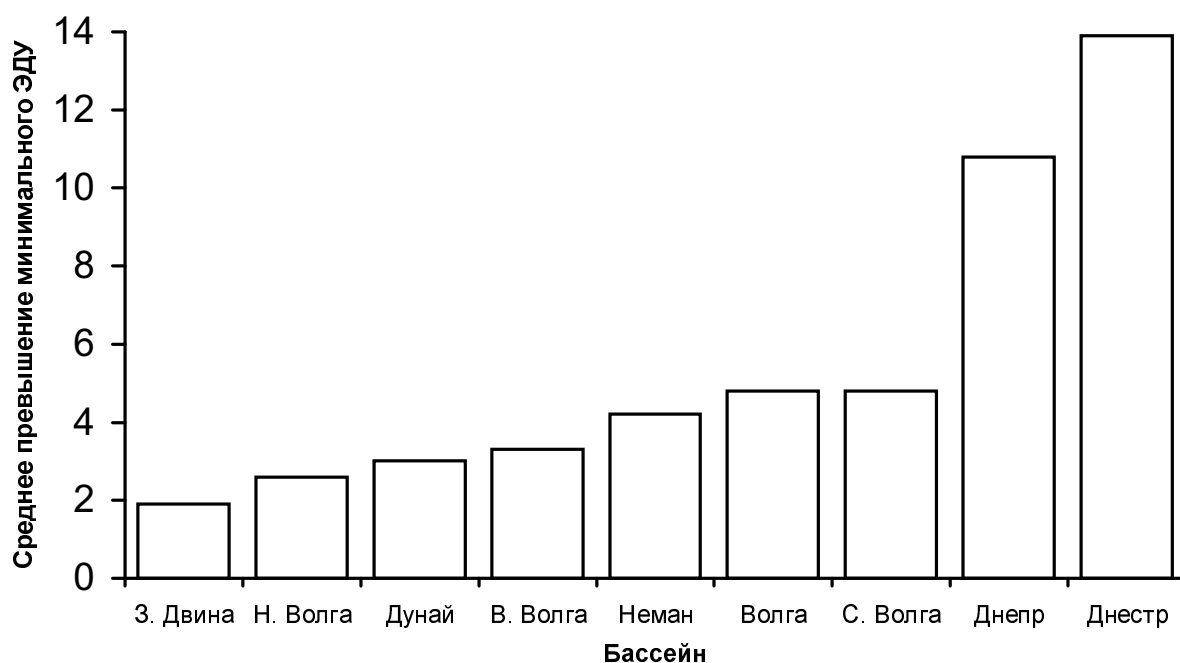
ной Двины и Немана были неблагополучными, а все оценки в подбассейне Верхней Волги, наоборот, благополучными. В такой ситуации, возникшей из-за слишком малого количества наблюдений в этих бассейнах, определение ЭДУ становится невозможным, так как в противном случае мы должны принять за ЭДУ либо наименьшее, либо наибольшее из всех встреченных значений нормируемой переменной. Малое общее количество наблюдений за грунтами в бассейнах Дуная и Днестра и отсутствие благополучных оценок состояния грунтов в бассейне Днестра стали причиной того, что в указанных бассейнах не был проведен анализ причин неблагополучия сообществ донных организмов.

Результаты расчетов ЭДУ и их сравнение с нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК) приведены в Приложении 1. Значимыми считали переменные, для которых точность предсказания экологического неблагополучия была не ниже 80%. Рядом со значением ЭДУ фактора дана его полнота, характеризующая его значимость. Кроме того, для незначимых переменных, измеряемых в данном бассейне или подбассейне, приведены экологически безопасные границы (ЭБГ), т.е. максимальные или минимальные за все время наблюдения значения фактора. Поскольку никакие встреченные значения незначимых факторов при заданном критерии точности не приводили к возникновению экологического неблагополучия, ЭБГ могут служить приблизительными нормативами безопасного воздействия абиотических факторов. При этом следует понимать, что они никогда не выходят за границы ЭДУ.

Наибольшее число переменных, значимых для неблагополучия организмов водной толщи (11), было получено для бассейна Дуная. Максимальное число переменных, влияющих на бентосное сообщество (7), зарегистрировано в бассейне Западной Двины. Чаще других переменных за возникновение экологического неблагополучия отвечали  $\text{NH}_4$  (в 9 экосистемах из 12 исследованных), нефтепродукты (в 5),  $\text{BPK}_5$  (в 6),  $\text{NO}_2$  (в 5). С другой стороны, концентрации  $\text{O}_2$ , Hg, F, а также водность и среднегодовая температура воды ни для одной из экосистем не попали в число значимых.

Для того чтобы сравнить между собой исследованные бассейны рек по наборам значимых факторов и значениям их ЭДУ, провели ранжирование 6 бассейнов и 3 волжских подбассейнов по относительной величине ЭДУ или ЭБГ (ОЭДУ), усредненной по 7 переменным, измеряемым во всех бассейнах. Для этого минимальное

среди всех бассейнов значение ЭДУ или ЭБГ для данной переменной принимали за единицу, а в остальных бассейнах ОЭДУ рассчитывали как отношение его ЭДУ или ЭБГ к минимальному. Например, для  $\text{NH}_4$  наименьшим (0,05 мг/л) было значение ЭДУ в бассейне Дуная. Соответственно ОЭДУ для Дуная равнялось 1, для Западной Двины (0,1/0,05) — 2, для Немана (0,38/0,05) — 7,6 и т.д. Если значения нормативов какой-либо переменной в данном бассейне различались для толщи воды и для грунтов, брали наименьшее (т.е. наиболее жесткое) из двух значений. После того как в каждом бассейне и подбассейне были получены ОЭДУ, для 7 участвовавших в анализе переменных, вычисляли среднее по всем переменным значение ОЭДУ (рис. 8.1).



**Рисунок 8.1.** Ранжирование речных бассейнов по средней величине относительного ЭДУ физико-химических факторов

Наименьшие диапазоны экологической толерантности характерны для сообществ грунтов в бассейне Западной Двины, где зарегистрировано самое низкое значение ОЭДУ. С другой стороны, сообщества водной толщи Днепра и Днестра обнаружили самые широкие границы толерантности (особенно в отношении  $\text{NH}_4$ , P и  $\text{NO}_2$ ). В целом наблюдается определенная тенденция: самая слабая приспособленность сообществ гидробионтов к существующим внешним нагрузкам наблюдается в бассейнах, расположенных в более высоких широтах, за исключением Дуная и Нижней Волги (Западная Двина, Неман, Верхняя Волга). При этом хотя среднее значение ОЭДУ

для Верхней Волги оказалось выше, чем для Дуная и Нижней Волги, сразу три верховолжских ЭДУ (по  $\text{Cu}$ , БПК и  $\text{NO}_2$ ) были наименьшими среди всех ЭДУ и ЭБГ. Таким образом, хотя температура и не фигурировала среди значимых для неблагополучия факторов ни в одной из экосистем, косвенным образом она влияла на характер взаимодействия в них между живым и неживым компонентами. Вероятно, степень адаптации сообществ южных бассейнов к многолетнему воздействию высоких температур, способствующих усиленному эвтрофированию за счет накопления в водоеме биогенных элементов, оказывается выше, чем у сообществ, “привыкших” к меньшей трофности, обусловленной более низкими концентрациями веществ.

#### 8.1.2. Исследование водных экосистем азиатской части России и Узбекистана

Анализ причин экологического неблагополучия проводили для 5 бассейнов рек (Максимов и др., 2002):

- 1) бассейн Оби (реки Чулым, Урюп, Береш, Кадат, Базыр, Ужур, Можары, Серез, Иртыш, Бухтарма, Ульба, Глубочанка, Уба, Тобол, Ишим, Берешское, Кадатское, Бухтарминское и Усть-Каменогорское водохранилища, озера Белое, Зайсан);
- 2) бассейн Енисея (реки Енисей, Тья, Верхняя Ангара, Баргузин, Турка, Селенга, Чикой, Темник, Хилок, Уда, Большая Речка, Оронгой, Вилюйка, Ангара, Ушаковка, Иркут, Ока, Ия, Бирюса, Куда, Кая, Малая Белая, Иреть, Большая Белая, Белая, Мана, Кача, Уярка, Кан, Большая Уря, Илань, Тины, Решеты, Татарка, Тасеева, Мурожное, Рыбное, Аладьино, Каменка, Манзя, Иркинеева, Карабула, Чуна, Усолка, Малый Енисей, Тапса, Большой Енисей, Верхний Енисей, Элегаст, Унгеш, Хемчик, Ус, Ак-Суг, Большой Он, Абакан, Большая Тель, Братское, Иркутское, Саяно-Шушенское, Красноярское, Хантайское водохранилища, оз. Байкал);
- 3) бассейн Лены (реки Лена, Витим, Алдан, Вилуей, Кенгдей, озеро Мелкое);
- 4) бассейн Амура (реки Ингода, Тында, Зея, Деп, Большая Бира, Тунгуска, Амур, Сунгач, Хор, Черная, Березовая, Шилка, Аргунь, Онон, Спасовка, Кулешовка, Илистая, Абрамовка, Нестеровка, Мельгуновка, Тур, Большие Усачи, Комис-

саровка, Арсеньевка, Уссури, Большая Уссурка, Бикин, Малиновка, Дальняя, озеро Ханка);

5) бассейн Сырдарьи (реки Сырдарья, Карадарья);

Бассейн Оби был разделен на два подбассейна (район КАТЭК и подбассейн Иртыша), бассейн Енисея — на три подбассейна (район Забайкалья, подбассейны Ангары и Верхнего Енисея), бассейн Амура — на два подбассейна (собственно Амура и Уссури). Расчет ЭДУ вели как по всему бассейну в целом, так и по составляющим его подбассейнам.

В качестве абиотических факторов исследовали среднегодовые и максимальные (для концентрации кислорода — минимальные) за год значения следующих показателей: БПК<sub>5</sub>, ХПК, концентрации растворенного кислорода (O<sub>2</sub>), азота нитратного (NO<sub>3</sub>), нитритного (NO<sub>2</sub>) и аммонийного (NH<sub>4</sub>), общего фосфора (P), цинка (Zn), железа (Fe), меди (Cu), никеля (Ni), ртути (Hg), свинца (Pb), хрома (Cr), кадмия (Cd), магния (Mg), кальция (Ca), нефтепродуктов, фенолов, летучих фенолов, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), сероводорода (H<sub>2</sub>S), метилмеркаптана, формальдегида, лигнина, лигносульфоната, альфа-ГХЦГ, гамма-ГХЦГ, ксантогенатов, роданидов, цианидов, мышьяка, pH (только среднегодовое значение), взвешенных веществ, гексахлорана, линдана, метанола, алюминия, ДДТ, ДДД, ДДЕ, натрия, сульфатов (SO<sub>4</sub>), хлоридов (Cl), фторидов (F), бора (B), пропанида, сатурна; минерализация, сумма ионов (Ежегодники качества..., 1984-1991; Ежегодные данные..., 1990). Из-за региональных особенностей программ физико-химического мониторинга списки анализируемых физико-химических переменных различались в зависимости от бассейна как количественно, так и качественно.

Значимые для возникновения экологического неблагополучия фито-, зоопланктона, зообентоса факторы отбирали на основе 80%-го критерия точности. Данные по Сырдарье взяты из литературы (Замолодчиков, 1993).

Результаты расчетов ЭДУ для организмов водной толщи и грунтов и их сравнение с нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК) приведены соответственно в Приложениях 2 и 3. Для трех исследованных бассейнов и подбассейнов данные об ЭДУ грунтов отсутствуют: в районе КАТЭКа общее количество наблюдений за зообентосом было менее 10; в бассейне Сырдарьи сведения о донной фауне

вообще отсутствовали; в подбассейне Иртыша все 86 наблюдений имели неблагоприятные оценки экологического состояния, т.е. ЭДУ оказались равны минимальным за весь период наблюдений значениям всех факторов. Кроме того, для незначимых переменных, измеряемых в данном бассейне или подбассейне, приведены экологически безопасные границы (ЭБГ), т.е. максимальные или минимальные (для содержания кислорода) за все время наблюдения значения фактора. Следует обратить внимание, что в подбассейне Ангары не было найдено ни одного значимого фактора, удовлетворяющего описанным выше критериям вычисления ЭДУ, поэтому приведены только значения ЭБГ измеряемых переменных.

Примечательно, что в пределах одного бассейна или подбассейна те гидрохимические факторы, превышение ЭДУ по которым закономерно связано с неблагоприятием оценок водной толщи, являются экологически значимыми и для грунтов. Перечни значимых переменных для толщи и грунтов в бассейне Амура в целом, например, почти полностью совпадают. Более того, значения ЭДУ по этим переменным также не зависят от того, какие организмы исследовались как индикаторы неблагоприятия — бентосные или планктонные. Как правило, ЭДУ по отдельному фактору для воды равно или близко к ЭДУ для дна. Это касается, в первую очередь бассейна Амура в целом, подбассейнов собственно Амура и Уссури, бассейна Енисея в целом и подбассейнов Верхнего Енисея и Ангары. В то же время список значимых переменных толщи значительно отличался от такового грунтов в бассейне Лены и в подбассейне Забайкалья. Совпадение или несовпадение данных по грунтам и водной толще зависит от различной степени запаздывания отклика гидробионтов (бентоса и планктона) на неблагоприятные воздействия среды. Очевидно, в водных объектах Амура, Уссури, Енисея и Ангары неблагоприятие донных биоценозов сопровождается неблагоприятием биоценозов пелагиали и наоборот. В других бассейнах такого соответствия нет.

В бассейне Лены и подбассейне Забайкалья ЭДУ для грунтов, как правило, более жесткие, чем для воды. Это говорит о том, что бентосные организмы менее толерантны к воздействию неблагоприятных факторов.

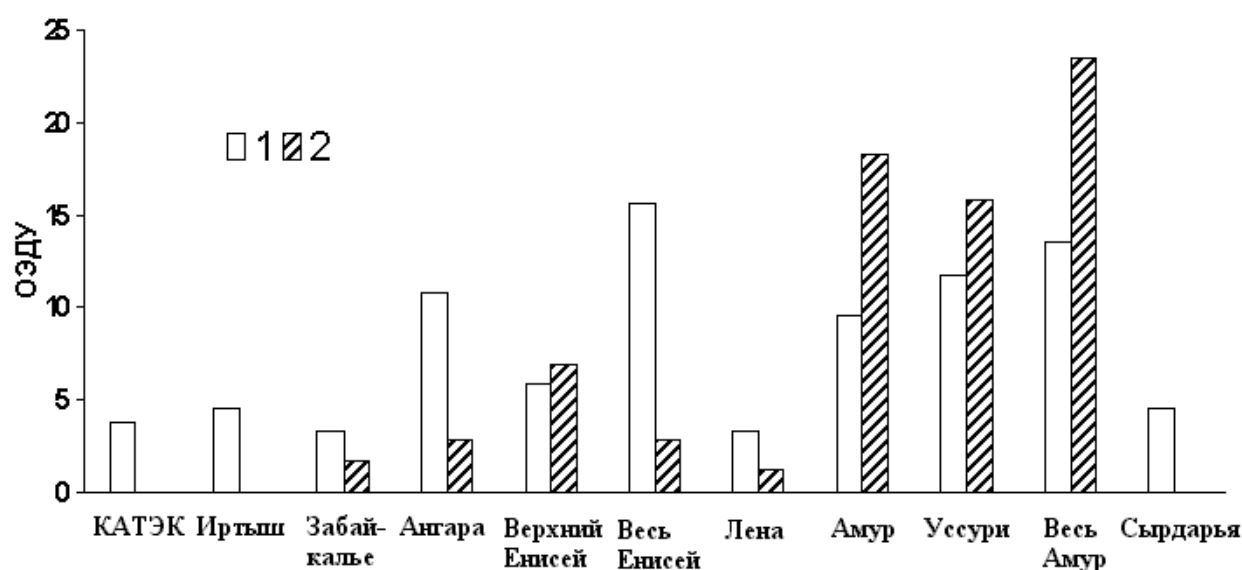
Набор экологически значимых факторов неодинаков для разных бассейнов и подбассейнов. В больших пределах варьирует также общее количество этих факто-

ров: от 0 (толща воды подбассейна Ангары) до 29 (толща воды подбассейна Иртыша и грунты подбассейна Усури).

Тем не менее, существует минимальный набор гидрохимических переменных, ЭДУ для которых найдено для большинства бассейнов и подбассейнов. Из них наиболее часто оказываются сопряженными с экологическим неблагополучием БПК<sub>5</sub>, азот аммонийный и нитритный, растворенный кислород (средние за сезон и экстремальные значения), СПАВ (только средние).

Для того чтобы сравнить между собой исследованные бассейны рек по наборам значимых факторов и значениям их ЭДУ, провели ранжирование всех бассейнов и подбассейнов по величине ОЭДУ (см. раздел 8.1.1) для водной толщи и грунтов, усредненной по переменным, измеряемым как минимум в 5 бассейнах (для водной толщи) и как минимум в 4 бассейнах (для грунтов). Усредненные по всем отобранным переменным значения ОЭДУ для каждого бассейна и подбассейна отображены на рис. 8.2.

Наиболее высокие значения ОЭДУ как водной толщи, так и грунтов зарегистрированы в бассейне Амура, включая оба подбассейна. Также высоки оказались значения нормативов в Ангаре, Верхнем Енисее и в Енисее в целом. В остальных регионах ОЭДУ значительно ниже, а самые жесткие ЭДУ предъявляются к водным объектам Забайкалья и Лены.



**Рисунок 8.2.** Усредненные значения относительных экологически допустимых уровней (ОЭДУ) физико-химических факторов: 1 — водная толща, 2 — грунты



Отсюда следует, что экосистемы водных объектов Дальневосточного региона характеризуются наиболее высокой устойчивостью к неблагоприятным воздействиям. Это означает, что только очень высокие концентрации веществ могут привести к возникновению в биоценозе элементов экологического регресса. Отметим, что бассейн Амура уникален также тем, что бентосные организмы здесь более толерантны по отношению к факторам среды, чем представители планктона и перифитона

Что касается бассейна Енисея, то отдельные его участки качественно отличаются друг от друга по степени отклика на внешние воздействия. Если в Забайкальском регионе уже небольшое содержание в воде загрязнителей приводит к появлению неблагоприятных оценок, то в водной толще Ангары экологическая обстановка близка к той, что была описана для Амура. То, что средние ЭДУ для бассейнов Амура и Енисея (водная толща) оказались выше ОЭДУ для любого из составляющих подбассейнов, доказывает, что необходима как можно более высокая степень регионализации при нормировании, т.е. по возможности выделение территорий, ограниченных небольшими площадями в пределах водосборного бассейна крупной реки. Понятно, что эта возможность реализуема только при условии достаточного количества наблюдений за биологическими и физико-химическими факторами (как минимум 10-20).

### 8.1.3. Зависимость значений экологически допустимых уровней факторов среды от географических и климатических особенностей бассейна и подбассейна

На основе полученных наборов ЭДУ факторов среды, значимых для экологического неблагополучия гидробионтов в бассейне р. Дон (Булгаков и др., 1995; Левич и др., 1996), в бассейнах европейской части России и сопредельных стран (Замолодчиков, 1993; Максимов и др., 2001а), в бассейнах азиатской части России и Узбекистана (Замолодчиков, 1993; Максимов и др., 2002) был проведен обобщенный сравнительный анализ величин ЭДУ пресных вод на всей территории бывшего СССР с учетом географических и климатических особенностей исследованных речных бассейнов и подбассейнов (Булгаков, 2003).

Всего в анализ была включена 21 пресноводная экосистема (9 бассейнов и подбассейнов европейской части бывшего СССР из раздела 8.1.1 плюс бассейн Дона и 11

бассейнов и подбассейнов азиатской части из раздела 8.1.2). В некоторых экосистемах ЭДУ или ЭБГ факторов были найдены только для одной из групп организмов — фитопланктона или зообентоса (табл. 8.1). Таким образом, с учетом того, что 12 из 21 исследованной экосистемы, были представлены дважды (отдельно для планктонных и бентосных видов), всего получилось 33 набора ЭДУ.

**Таблица 8.1.** Классификация бассейнов и подбассейнов

Бассейн, подбассейн	Широта	Климат	Близость к устью	Плотность населения
Западная Двина (грунты)	север	морской	близко	высокая
Неман (грунты)	север	морской	близко	высокая
Дунай (толща)	юг	морской	близко	высокая
Днестр (толща)	юг	морской	далеко	высокая
Днепр (толща)	юг	морской	далеко	высокая
Волга в целом (толща и грунты)		умеренный		высокая
Верхняя Волга (грунты)	север	умеренный	далеко	высокая
Средняя Волга (толща и грунты)	середина	умеренный	далеко	высокая
Нижняя Волга (толща и грунты)	юг	умеренный	близко	высокая
Дон (толща и грунты)	юг	морской	близко	высокая
Район КАТЭКа (толща)	середина	континентальный	далеко	низкая
Иртыш (толща)	середина	континентальный	далеко	низкая
Енисей в целом (толща и грунты)	середина	континентальный	далеко	низкая
Забайкалье (толща и грунты)	середина	континентальный	далеко	низкая
Ангара (толща и грунты)	середина	континентальный	далеко	низкая
Верхний Енисей (толща и грунты)	середина	континентальный	далеко	низкая
Лена (толща и грунты)	север	умеренный	близко	низкая
Амур в целом (толща и грунты)	юг	морской		низкая
Уссури (толща и грунты)	юг	морской	далеко	низкая
Амур (толща и грунты)	юг	морской	близко	низкая
Сырдарья (толща)	юг	континентальный	далеко	низкая

Было составлено четыре типа классификации исследованных экосистем:

- 1) по месту отбора пробы — водная толща или грунты;

- 2) по географической широте экспериментального региона — высокие широты, низкие широты или промежуточная зона;
- 3) по климату, характерному для экспериментального региона — морской, умеренный или континентальный;
- 4) по степени удаленности от моря или озера, в который впадает главная река бассейна — низовья реки или верхнее и среднее течение;
- 5) по плотности населения территориальных образований, где расположены водные объекты экспериментального региона — низкая (менее 20 человек на 1 км<sup>2</sup>) и высокая (более 20 человек на 1 км<sup>2</sup>). По сути данная классификация оказалась равнозначной делению всех экосистем на западные и восточные.

Некоторые бассейны невозможно было определенным способом классифицировать из-за их слишком большой протяженности и, соответственно, распространения их на разные категории одного классификатора. Это касается бассейна Волги в целом при классификации по широте и удаленности от моря и бассейна Амура в целом при классификации по удаленности от моря. Результаты классификации для всех бассейнов и подбассейнов представлены в табл. 8.1.

Для обобщающего анализа были отобраны абиотические переменные, ЭДУ или ЭБГ для которых были найдены не менее чем в 7 из исследованных экосистем. Все абиотические переменные, участвовавшие в анализе, были разделены на 4 группы: биогенные элементы (азот аммонийный, нитритный, нитратный, фосфор минеральный); металлы (Fe, Cu, Zn), органические загрязнители (нефтепродукты, СПАВ, фенолы); показатели, свидетельствующие о характере продукционно-деструкционных процессов в водоеме (БПК<sub>5</sub>, ХПК, концентрация кислорода, pH).

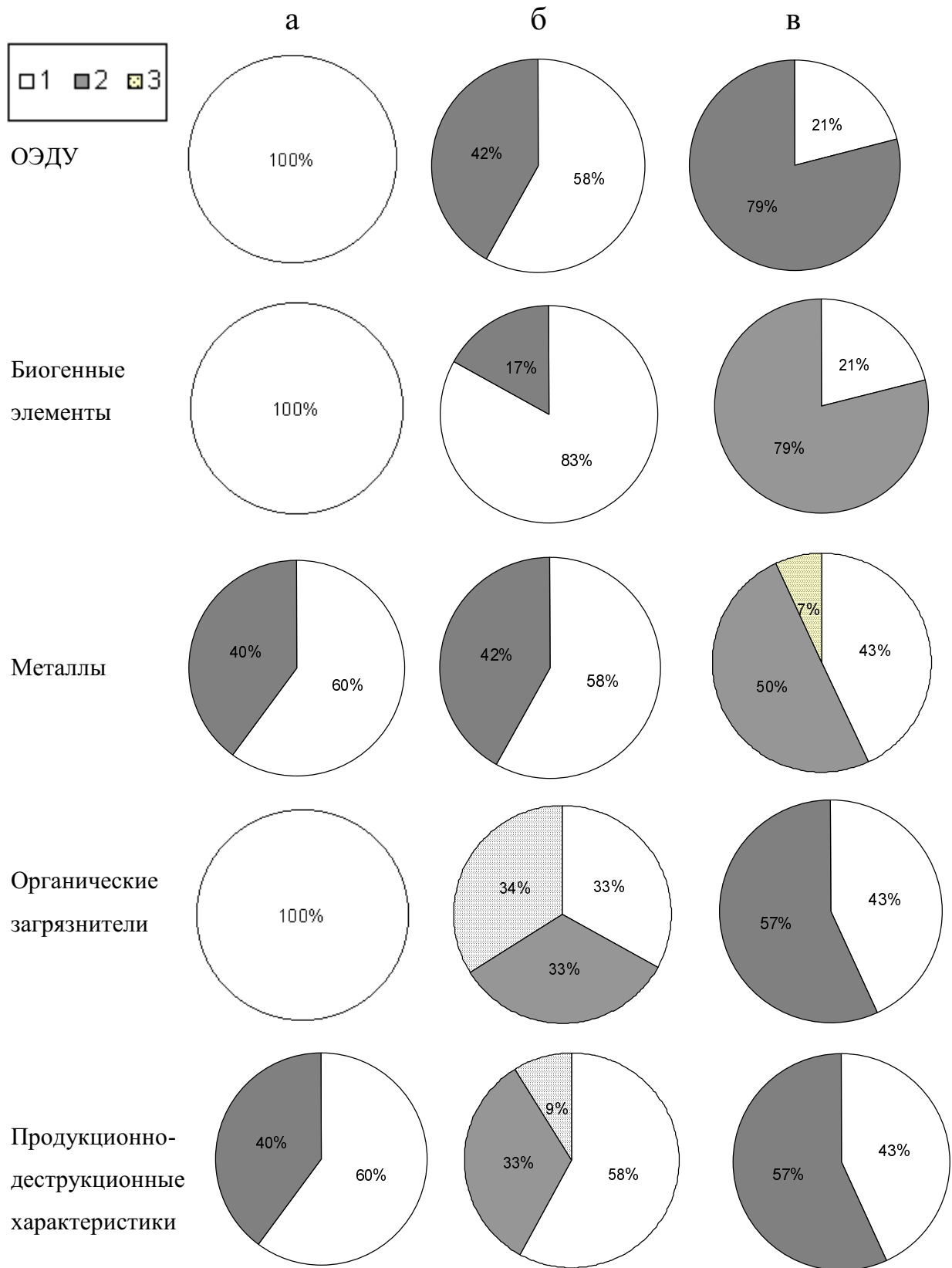
Для корректного сравнения речных экосистем по значениям ЭДУ, проводили ранжирование бассейнов и подбассейнов по относительной величине ОЭДУ, усредненной по всем перечисленным выше переменным (см. раздел 8.1.1).

Связь между усредненными значениями ОЭДУ и принадлежностью экосистем к определенной географической или климатической группе исследовали посредством детерминационного анализа (раздел 4.4). Для этого 5 указанных числовых переменных ОЭДУ были преобразованы в качественные, т.е. весь ряд значений делили на два примерно равнонаполненных класса (16 и 17 наблюдений в каждом). После этого из-

меряли сопряженность между низким (высоким) значением каждого из 5 ОЭДУ (объясняемые признаки) и качественными категориями пяти описанных выше классификаторов экосистем (объясняющие признаки). Значимость сопряженностей устанавливали при помощи критерия точности. В силу того что некоторые качественные категории классификаторов были представлены крайне малым числом экосистем (например, в категорию северных попали только 5 экосистем), другой критерий значимости полнота (доля случаев совпадения объясняющего и объясняемого признаков среди всех случаев применения объясняемого признака) был не показательным и не использовался при анализе.

В табл. 8.2 приведены сопряженности между характеристиками пресноводных экосистем и усредненными значениями ОЭДУ, где точность была не ниже 60%. Для классификатора "место отбора проб" практически не удалось обнаружить сколько-нибудь значимых зависимостей — наблюдения как с "жесткими", так и с "мягкими" ОЭДУ практически равномерно распределялись между водной толщей и грунтами, а соответствующие точности, за единственным исключением, всюду были ниже 60%. Для классификатора "широта экспериментального региона" была получена определенная закономерность, выражающаяся в том, что для северных экосистем (Западная Двина, Неман, Верхняя Волга, Лена) характерны низкие нормативы ЭДУ (точность сопряженностей для некоторых ОЭДУ достигает 100%). Среди южных экосистем, напротив, существенно преобладают те, в которых ЭДУ более мягкие. Экосистемы, расположенные посередине, занимают промежуточное положение. Более наглядно тенденция расширения границ ЭДУ по мере продвижения с севера на юг показана на рис. 8.3. Изображенные диаграммы демонстрируют соотношение количества экосистем с жесткими и мягкими ОЭДУ среди всех экосистем данной широты. Присутствие на диаграммах секторов, обозначающих отсутствие данных, связано с тем, что в некоторых бассейнах и подбассейнах в программу физико-химических наблюдений не вошла ни одна переменная внутри групп "металлы", "органические загрязнители" и "продукционно-деструкционные показатели".





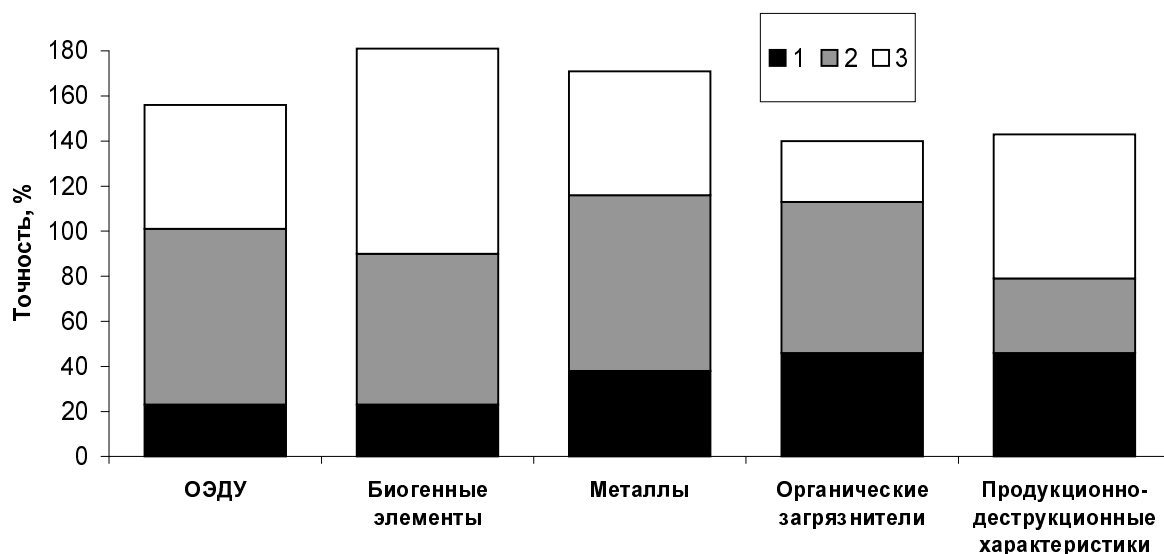
**Рисунок 8.3.** Значения точности сопряженностей между усредненными ЭДУ и географической широтой расположения бассейна или подбассейна. а — северные бассейны, б — бассейны промежуточной зоны, в — южные бассейны. 1 — жесткие ЭДУ, 2 — мягкие ЭДУ, 3 — нет значений ЭДУ

Замечено также ужесточение ЭДУ в водоемах промежуточной (за исключением ОЭДУ продукционно-деструкционных характеристик), и в определенной степени — континентальной (за исключением ОЭДУ органических загрязнителей) климатических зон по сравнению с водоемами, подверженными морскому климату (рис. 8.4).

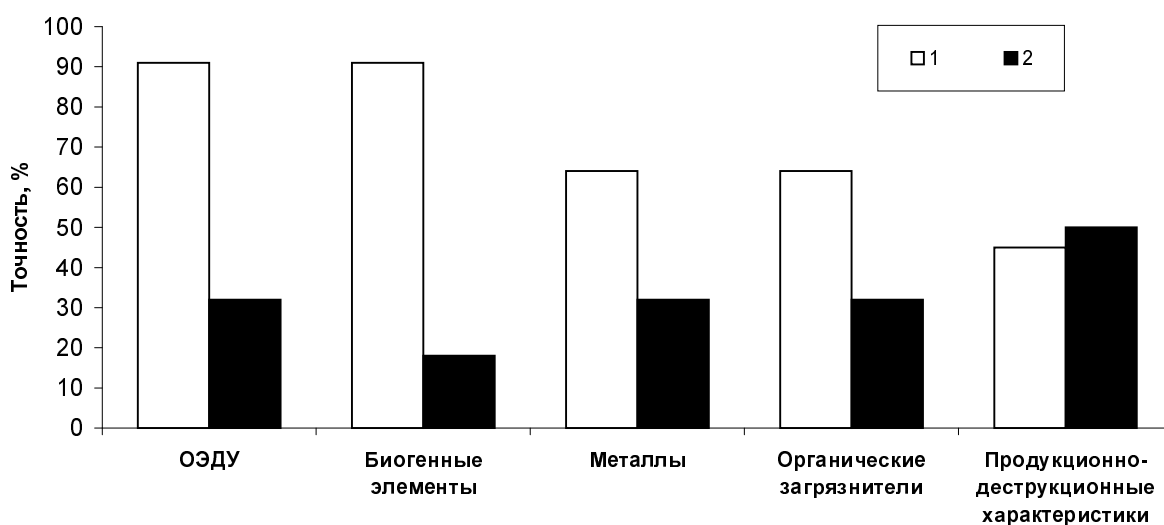
Что касается удаленности от моря и плотности населения, то определенной закономерности в величинах ЭДУ, общей для всех категорий абиотических переменных, обнаружить не удалось. Наиболее значимыми можно считать сопряженности, из которых следует, что высокой плотности населения соответствует смягчение ЭДУ по продукционно-деструкционным показателям, и ужесточение ЭДУ по металлам.

Судя по табл. 8.2, наибольшую адаптированность к внешним воздействиям (т.е. более широкие границы ЭДУ) демонстрируют бассейны и подбассейны, расположенные в южной части бывшего СССР и испытывающие воздействие морского климата — Нижний Дон, Дунай, Днестр, Днепр, Амур и Уссури. В связи с этим любопытно было посмотреть, насколько значима соответствующая сопряженность "если экосистема расположена в южной широте и относится к морскому климату, то ЭДУ в ней более мягкие". Оказывается (рис. 8.5), что для всех категорий абиотических переменных, кроме продукционно-деструкционных показателей, процент экосистем с более мягкими ЭДУ существенно больше среди отмеченных выше 6-ти экосистем, нежели среди экосистем, расположенных севернее и обладающих более выраженной континентальностью.

Отметим, что в отношении ЭДУ показателей продукционно-деструкционных процессов распределение между различными категориями экосистем оказывается чаще всего иным в сравнении с другими ЭДУ (табл. 8.2). Это касается климата (среди экосистем умеренного климата преобладают бассейны и подбассейны с мягкими ЭДУ БПК<sub>5</sub>, ХПК, рН и содержания кислорода, для других абиотических переменных картина обратная), близости к морю (также противоположны данные, касающиеся экспериментальных участков, прилегающих к устьевым зонам), плотности населения (наиболее компактно заселенные территории бассейнов обладают широкими границами ЭДУ продукционно-деструкционных показателей, тогда как ЭДУ металлов здесь, наоборот, более жестки).



**Рисунок 8.4.** Вклад климатических групп бассейнов и подбассейнов в категорию наблюдений с жесткими усредненными ЭДУ. 1 — морской климат, 2 — умеренный климат, 3 — континентальный климат



**Рисунок 8.5.** Сравнение двух типов экосистем по точности сопряженности с мягкими усредненными ЭДУ. 1 — южные экосистемы с морским климатом, 2 — прочие экосистемы

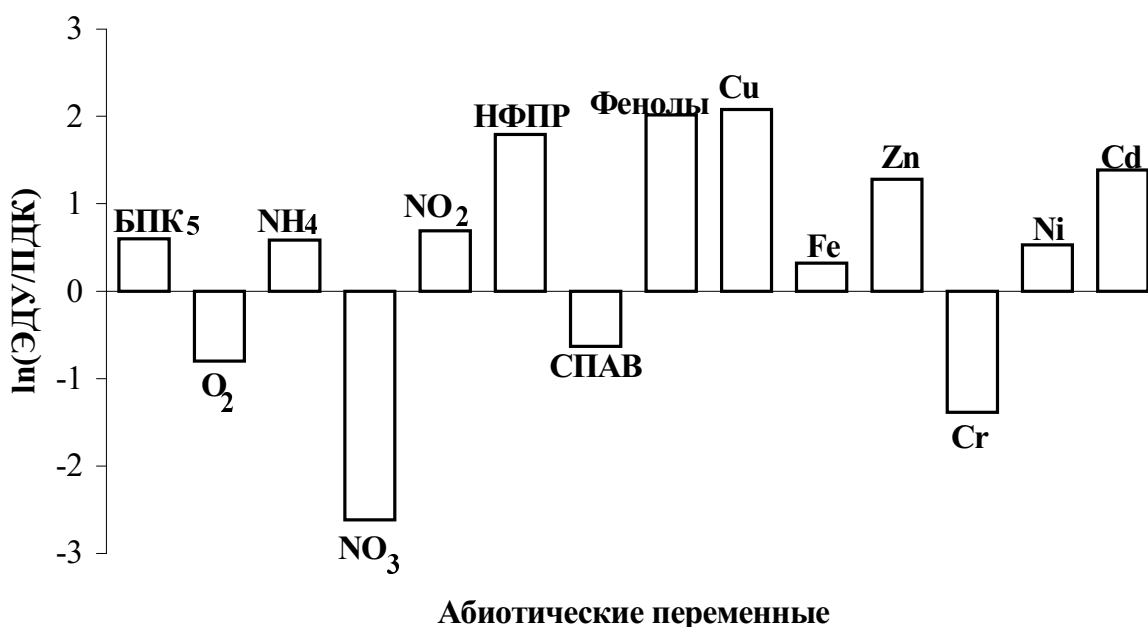
Итак, при сравнительном изучении большинства основных пресноводных экосистем на территории бывшего СССР подтверждены существенные различия в уровнях ЭДУ между регионами. Обнаружено, что границы толерантности имеют тенденцию к расширению в реках, озерах и водохранилищах с теплым и влажным климатом. Иначе



говоря, приспособленность гидробионтов к неблагоприятным условиям среды здесь выше, чем в других местообитаниях. Это не относится к границам толерантности по отношению к тем факторам, которые являются производными от концентраций веществ в водоеме и от жизнедеятельности самих гидробионтов (БПК<sub>5</sub>, ХПК, рН, содержание кислорода).

#### 8.1.4. Сравнение рассчитанных ЭДУ с нормативами ПДК

По большинству переменных значения ЭДУ, как правило, превышают нормативы ПДК (Приложения 2 и 3). Например, в Амуре почти по всем факторам, кроме хрома, СПАВ, альфа-ГХЦГ и гамма-ГХЦГ, ЭДУ выше ПДК. Существуют переменные, для которых отношение ЭДУ/ПДК всегда либо больше (нефтепродукты, медь), либо меньше (азот нитратов) единицы. Для того чтобы сравнить ЭДУ с ПДК независимо от бассейна, для 14 наиболее распространенных значимых переменных рассчитывали средние по всем бассейнам величины. На рис. 8.6 представлены логарифмы отношения усредненных ЭДУ к ПДК.



**Рисунок 8.6.** Соотношение значений ЭДУ и ПДК значимых абиотических факторов для пресноводных бассейнов России и сопредельных стран

Как видно, только для четырех переменных (концентрации растворенного кислорода, нитратов, СПАВ, хрома) нормативы ПДК завышены по сравнению с ЭДУ (т.е. являются более мягкими). Наибольшее несоответствие выявлено для концентрации нитратов — государственный норматив устанавливает предельный ее уровень в 9 мг/л, тогда как в реальности изменения в сообществах гидробионтов во всех бассейнах происходят уже при среднегодовых концентрациях менее 1 мг/л. ЭДУ максимальных за год концентраций  $\text{NO}_3$  не превышает 3 мг/л. Для большинства же переменных ЭДУ имеют более широкие границы, чем ПДК, что отражает приспособленность сообществ к многолетнему воздействию повышенных нагрузок.

## 8.2. ЭДУ факторов среды, значимых для экологического неблагополучия р. Элисты, определенного по параметрам ранговых распределений сообществ фитоперифитона

Изучение сообществ перифитона проводили в трех водоемах Калмыкии с различной антропогенной нагрузкой: реке Элиста и Ярмарочном и Улан-Эргинском прудах, расположенных на этой реке (Максимов и др., 1997а,б). Исследования на трех водоемах были проведены в мае-ноябре 1992 г. и в мае-октябре 1993 г. Сбор перифитона осуществляли с искусственных и естественных субстратов.

Для выявления причин экологического неблагополучия при дальнейшем анализе были использованы гидрохимические показатели водоемов, предоставленные санитарно-эпидемиологической службой Калмыкии: водородный показатель (рН), сухой остаток, ХПК, БПК<sub>5</sub>, концентрация взвешенных веществ, нефтепродуктов, хлоридов, сульфатов, азота нитратного, азота нитритного, азота аммонийного, железа, хрома, фосфора фосфатов, кальция, магния и меди. Поскольку даты отбора гидробиологических и гидрохимических проб не совпадали, каждой дате отбора гидробиологической пробы ставилась в соответствие ближайшая к ней дата отбора гидрохимической пробы.

По данным гидрохимического анализа вода р.Элиста по сравнению с другими водоемами оказалась наименее загрязненной, значения по всем показателям химического анализа были минимальным и не носили выраженного характера загрязненности, хотя некоторые значения превышали предельно допустимые концентрации (на-

пример, по хлоридам, БПК<sub>5</sub>). В Ярмарочном пруду отмечены наибольшие значения показателей азота аммиачного, показателей химического и биологического потребления кислорода. В целом для данного пруда характерно скорее всего загрязнение органического характера. Наибольшие значения большинства физико-химических показателей, в несколько раз превышающие предельно допустимые концентрации, принадлежат Улан-Эргинскому пруду. Для Улан-Эргинского пруда характерно загрязнение неорганического характера, выражающееся в повышенном содержании хлоридов, сульфатов, нитратов, фосфатов. Содержание Cu, а также Ca и Mg также намного превышает их содержание в двух других водоемах.

Для характеристики состояния фитоперифитонных сообществ исследовали ранговые распределения размерно-морфологических групп микроводорослей (Максимов и др., 1997а,б). Каждый вид был отнесен к одной из 32 размерно-морфологических групп (16 для одноклеточных и 16 для колониальных форм водорослей). Ранговые распределения размерно-морфологических групп фитоперифитона описывали с помощью дзета-модели (Левич, 1980):

$$n(i) = c\chi^{i-1} / i^\gamma$$

где  $n(i)$  - численность клеток размерно-морфологической группы с рангом  $i$  в ряду по убыванию численности,  $\chi$  и  $\gamma$  — параметры распределения. Раздельное оценивание обоих параметров проводили методом нелинейного регрессионного анализа. При  $\chi = 1$  дзета-модель описывает гиперболическое распределение групп по обилию, при  $\gamma = 0$  — экспоненциальное распределение.

Для параметров  $\chi$  и  $\gamma$  строили функцию желательности, т.е. функцию, которая конкретным значениям экологических параметров ставит в соответствие условные баллы экологического состояния на шкале от 0 (наихудшее значение) до 1 (наилучшее значение) (глава 5).

Для каждого из параметров была установлена так называемая статистическая норма, т.е. наиболее часто встречающееся значение на кривой их распределения. При этом в качестве эталона были использованы кривые распределения не во всех трех водоемах в совокупности, а только в одном из них, наименее загрязненном (р. Эли-

ста). После этого с помощью функции желательности оценивали "качество" обоих параметров рангового распределения во всех исследованных пробах. Значениям параметров, равным статистической норме или близких к ней, присваивали максимальную желательность, равную 1. Для остальных значений параметров, отличающихся от статистической нормы как в большую, так и в меньшую сторону, рассчитывали величины желательности, убывающие пропорционально отклонению от нормы так, что желательность для наиболее отклоняющихся значений оказывалась близкой или равной нулю.

Частную желательность  $d(x)$  рассчитывали как произведение эмпирической функции распределения  $f_e(x)$  на вспомогательную функцию с параметром  $z$ :

$$y(z) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(z-z_{\text{ОПТ}})^2}{z(1-z)}\right), & z \in [0,1], \\ 0, & z = 0, \quad z = 1 \end{cases}$$

где  $z_{\text{ОПТ}}$  задается как нормированное значение модального класса для функции  $f_e(x)$ . Т.е.  $z_{\text{ОПТ}}$  представляет собой некоторую норму для данной переменной, как правило, наиболее часто встречающееся ее значение.

Обобщенную желательность для обоих параметров рангового распределения определяли по обычной формуле для среднего геометрического:  $D = \sqrt{d_\chi d_\gamma}$ . После получения значений желательности по каждой пробе для оценок экологического состояния по ранговым распределениям размерно-морфологических групп фитоперифитона была проведена граница между нормой и патологией состояния экосистемы. Значения желательности  $D \leq 0.7$  относили к неблагоприятному состоянию, значения  $D > 0.7$  — к благополучному состоянию.

Результаты расчетов параметров ранговых распределений и значений желательности фито- и зооперифитона во всех пробах представлены в табл. 8.3. Как видно, наименьшие значения обобщенной желательности обнаружены в Ярмарочном пруду. Согласно установленной границе между нормой и патологией, ни в одной из проб в этом водоеме не было экологического благополучия. В то же время в Улан-

Эргинском пруду зарегистрировано наибольшее число проб (14), попадающих в категорию принятой статистической "нормы". Река Элиста по количеству благополучных наблюдений (8) занимает промежуточное положение. Очевидно, загрязнения органического характера, которые характерны главным образом для Ярмарочного пруда, в гораздо большей степени затрагивают размерно-морфологическую структуру фитоперифитона, нежели неорганические загрязнения, свойственные Улан-Эргинскому пруду. С другой стороны, не исключено, что в каждом из трех исследованных водоемов могла быть своя, специфическая "норма" для параметров ранговых распределений, не совпадающая с двумя другими, что, в свою очередь, связано с многолетней адаптацией сообществ.

**Таблица 8.3.** Значения параметров ранговых распределений и функции желательности

Название пробы	Параметр $\chi$	Параметр $\gamma$	Обобщенная желательность	Название пробы	Параметр $\chi$	Параметр $\gamma$	Обобщенная желательность
92J1	0.87	0.48	0.0312	92U12	1.02	1.18	0.8003
92J2	0.9	0.29	0.0509	92U13	0.96	0.7	0.6194
92J3	0.94	0.34	0.1512	93J1	0.83	0.05	0.0007
92J4	0.9	0.18	0.0298	93J2	0.91	0.28	0.0631
92J5	0.8	0.08	0	93J3	0.92	0.12	0.0353
92J6	0.9	0.19	0.0325	93J4	0.91	0.12	0.0306
92J7	0.82	-0.4	0	93J5	0.78	-0.04	0
92J8	0.88	0.01	0.0067	93J6	0.85	-0.02	0.0015
92J9	0.88	0.09	0.0092	93J7	0.85	0.1	0.0031
92J10	0.89	0.16	0.0171	93J8	0.85	-0.23	0.0003
92J11	0.82	-0.14	0	93J9	0.85	-0.11	0.0009
92J12	0.85	0.12	0.0024	93J10	0.82	-0.05	0
92J14	0.88	0.23	0.0155	93J11	0.87	0.34	0.0196
92E2	1.07	1.55	0.1389	93E1	0.98	0.74	0.7828
92E3	0.92	0.97	0.4317	93E2	0.97	0.76	0.7832
92E4	0.99	1.27	0.845	93E3	0.97	0.81	0.7975
92E5	1.07	1.5	0.2004	93E4	0.88	0.16	0.014
92E6	1.05	1.43	0.3598	93E5	0.97	0.77	0.7594
92E7	1.02	1.34	0.6313	93E6	0.97	0.61	0.5487
92E8	1	1.25	0.8533	93E7	0.94	0.53	0.3064
92E9	1.07	1.53	0.1552	93E8	0.97	0.75	0.751

92E10	1.05	1.49	0.3039	93E9	0.96	0.61	0.5167
92E11	1.06	1.52	0.2233	93E10	0.92	0.5	0.1912
92E12	1.07	1.53	0.1746	93E11	0.83	0.03	0.0006
92E13	0.97	1.12	0.8803	93E12	0.89	0.32	0.0327
92U1	0.98	0.76	0.7994	93U1	0.97	0.66	0.613
92U2	1.01	0.91	0.9	93U2	0.99	0.81	0.8808
92U3	0.97	0.64	0.5856	93U3	0.95	0.5	0.3197
92U4	1.01	0.93	0.8995	93U4	1.02	0.97	0.8614
92U5	1.02	1.03	0.8691	93U5	0.95	0.61	0.4503
92U6	1.02	1	0.8778	93U6	0.97	0.65	0.5947
92U7	1.01	0.98	0.9345	93U7	0.96	0.77	0.7331
92U8	0.96	0.69	0.6019	93U8	0.99	0.85	0.8888
92U9	0.96	0.7	0.6373	93U9	0.97	0.85	0.8615
92U10	0.98	0.85	0.9075	93U10	0.94	0.52	0.2784
92U11	1	1.04	0.9814	93U12	0.93	0.53	0.2784

Первые две цифры означают год отбора, J - Ярмарочный пруд, E - река Элиста, U - Улан-Эргинский пруд, цифры в конце - порядковый номер пробы.

Анализ причин экологического неблагополучия в р. Элиста. В табл. 8.4 сведены результаты расчета экологически допустимых уровней значимых химических факторов, приводящие к отклонению от нормального состояния исследованных объектов. К значимым относили факторы с полнотой > 15 %. Как видно, лишь четыре фактора из общего списка связаны с появлением этого отклонения. Обращает на себя внимание высокое значение ЭДУ для концентрации аммонийного азота, существенно превышающее соответствующие нормативы в большинстве бассейнов из раздела 8.1. Для трех других значимых переменных величины ЭДУ сопоставимы с ЭДУ в других бассейнах.

**Таблица 8.4.** Экологически допустимые уровни факторов среды, значимых возникновения экологического неблагополучия фитоперифитона р. Элисты

Фактор	ЭДУ, мг/л	Точность, %	Полнота, %
БПК5	3.6	80	72
Аммонийный азот	1.7	81	44
ХПК	35.6	83	40
Железо	0.7	80	16

ЭДУ, полученные для значимых факторов, оказываются выше их санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных ПДК. Вероятно, размерно-морфологическая структура фитоперифитонных сообществ р. Элиста обладает определенной стабильностью, выработанной в результате адаптации к высокому уровню загрязнений. Поэтому высокие для сообществ других водоемов концентрации загрязнителей оказываются нормальными для сообществ исследуемого региона.

### 8.3. ЭДУ факторов среды, значимых для экологического неблагополучия р. Суры, определенного по численности видов зоопланктона

С помощью процедуры оптимизации детерминационного анализа (ДА) для экосистемы р. Суры в районе Сурского водохранилища определяли ЭДУ как диапазоны значений абиотических факторов, приводящих к снижению численности отдельных видов зоопланктона (Максимов и др., 2000а).

В работе были использованы данные по гидрохимии, гидрологии (1-й массив) и гидробиологии (численность видов зоопланктона, 2-й массив) на трех участках р. Суры — собственно река, Сурское водохранилище и приплотинный участок водохранилища. Пробы отбирали в течение пяти лет (1993-1997) в реке и водохранилище только в летние месяцы (несколько проб в месяц), в приплотинном участке — раз в месяц в течение всего года. Общее количество наблюдений составило: по гидрохимии и гидрологии — 215, по гидробиологии — 199.

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, для анализа были отобраны 13 переменных, значения которых менялись в пределах минимум 4-х классов качества. Это БПК<sub>5</sub> (БПК), концентрации железа (Fe), марганца (Mn), аммония (NH<sub>4</sub>), нитритов (NO<sub>2</sub>), нитратов (NO<sub>3</sub>), фосфатов (PO<sub>4</sub>), углеводов, фенолов, растворенного кислорода (O<sub>2</sub>), взвешенных веществ, pH.

Во 2-м массиве были отобраны 11 видов и 3 личиночные стадии зоопланктона, которые встречались не менее, чем в 20% наблюдений: *Bosmina coregoni*, *Bosmina longirostris*, *Chydorus sphaericus*, *Daphnia cucullata*, *Daphnia longispina*, *Epistylis* sp.,

*Euchlanis dilatata*, *Eudiaptomus* sp., *Eudiaptomus gracilis*, *Keratella quadrata*, *Mesocyclops leuckarti*, личинки Copepoda, прочие личинки, науплии. Каждая из 14 групп была разделена на два класса: “мало” (низкая численность или отсутствие) и “много” (высокая численность).

При разбиении численностей видов на классы “мало” и “много” нулевые пробы не отбрасывали, а относили к классу “мало” (см. раздел 3.2.1). В нашем случае, поскольку доля наблюдений с нулевыми численностями практически для всех видов превышала 50%, классы “мало” и “много” сильно отличались по наполненности. Так как в класс “мало” попали, кроме нулевых, значения численности меньше  $0.15 \cdot 10^3$  кл/л, он оказался примерно в 3 раза больше по числу наблюдений, чем класс “много”. Из-за этого в качестве объясняемого признака рассматривали численности видов в классе “мало”. В противоположном случае точности исследуемых правил были бы слишком низки, чтобы отличить самое ценное правило от менее ценных.

Предварительно проведенный средствами ДА анализ сопряженностей между численностями видов показал, что существуют три организма *Epistylis* sp., *Euchlanis dilatata* и *Eudiaptomus gracilis*, которые обнаруживают высокие численности при низких обилиях практически всех остальных видов и личиночных стадий, оставаясь при этом отрицательно сопряженными и друг с другом. Оставшиеся 8 видов и 3 личиночные стадии образуют достаточно устойчивую группу, внутри которой снижение численности всех организмов взаимно сопряжено. Численности 3-х первых видов, как следует из анализа, не сопряжены ни с остальными видами, ни друг с другом.

Для оценки влияния колебаний гидрохимических и гидрологических показателей на численность отдельных видов устанавливали, какой интервал на шкале значений абиотических переменных наиболее точно и полно объясняет высокие численности видов. При этом предполагалось, что БПК, концентрация Fe, Mn, углеводов, фенолов и взвешенных веществ может приводить к снижению численности только в области высоких значений этих показателей, поэтому при оптимизации задавали верхний уровень искомого интервала. Для содержания кислорода ситуация обратная — только снижение этого показателя может приводить к неблагоприятным последствиям для зоопланктона, поэтому фиксировали нижнюю границу интервала. Что касается концентраций аммония, нитритов, нитратов, фосфатов, температуры и pH, то



заранее не накладывали никаких условий на их возможные границы, поскольку как слишком высокие, так и слишком низкие значения этих переменных могут вызывать отклонения от благополучного состояния организмов. Так как нужные классы объясняемых переменных (высокие численности видов) получились малонаполненными (для большинства видов — 25-30% от общего числа проб), а количество наблюдений в пределах оптимизируемого диапазона абиотических факторов, наоборот, было большим (как правило, более 50%) нельзя было рассчитывать на высокую точность исследуемых правил: как правило, она не превышает 30-40%. Поэтому при оптимизации задавали нижнюю границу полноты (51%), после чего максимизировали точность.

Результаты расчетов (табл. 8.5) показывают, что 11-видовая группировка взаимно сопряженных по численности зоопланктеров, демонстрирует, как правило, однородность по отношению к значениям безопасных диапазонов абиотических факторов. Безопасность в данном случае понимается как состояние организма, при котором его численность остается в пределах выбранных нами высоких значений. Здесь численность отдельных видов и личиночных стадий зоопланктона является индикатором экологического состояния биоценоза, в силу чего полученные диапазоны можно называть экологически допустимыми уровнями (ЭДУ) факторов, воздействующих на биоценоз (Левич, 1994; Maximov *et al.*, 1999). Если же рассмотреть отклики 3-х не попавших в указанную группу видов, то заметно, что по отношению ко многим факторам они более толерантны, т.е. ЭДУ этих факторов имеют более широкие границы. Для *Epistylis* sp. это относится к концентрациям Fe, Mn, O<sub>2</sub>, аммония (верхний уровень), нитритов (нижний уровень), фенолов, фосфатов (верхний уровень); для *Euchlanis dilatata* — к БПК, концентрациям Fe, O<sub>2</sub>, Mn, аммония (верхний уровень), нитритов (верхний уровень), углеводов, фосфатов (верхний уровень), взвешенных веществ, pH (нижний уровень), температуре (верхний уровень); для *Eudiatomus gracilis* — к концентрации нитритов (нижний уровень), нитратов (верхний уровень), pH (нижний уровень), фосфатов (верхний уровень), температуре (нижний уровень). Вместе с тем, по большинству показателей найденные для этих 3-х видов ЭДУ существенно различаются, что, видимо, еще раз говорит об особом положении каждого из них в сообществе зоопланктона. По большинству показателей (кроме концентраций

марганца, нитритов, нитратов, содержания кислорода) полученные границы ЭДУ оказываются шире стандартных нормативов ПДК. Так что можно утверждать, что зоопланктонное сообщество р. Суры достаточно устойчиво к действию внешних факторов, а определенные в лабораторных условиях ПДК не вполне отражают его адаптационный потенциал.

