

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет»  
Научно-исследовательский институт биологии

**Е. А. Зилов**

# **ГИДРОБИОЛОГИЯ И ВОДНАЯ ЭКОЛОГИЯ**

**(ОРГАНИЗАЦИЯ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ  
И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ)**

*Учебное пособие*



УДК 574.5 (078.5)

ББК 28.082я73

361

**Рецензенты:**

проф., д-р биол. наук В. В. Дрюккер,  
гл. науч. сотр., д-р биол. наук Г. И. Поповская

**Зилов Е. А.**

361

Гидробиология и водная экология (организация, функционирование и загрязнение водных экосистем) : учеб. пособие / Е. А. Зилов. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. – 147 с.

ISBN 978-5-9624-0388-5

В учебном пособии рассматриваются место гидробиологии и водной экологии в системе естественных наук, их предметы, цели, составные части, методы исследования. Приведен краткий обзор истории гидробиологии и основы терминологии. Подробно описывается стратификация озер и ее сезонный ход для водоемов пояса умеренного климата. Описаны существующие на настоящее время классификации озер – генетическая (по происхождению), классификации, основанные на особенностях стратификации разных озер, биологическая классификация водоемов по трофическому статусу и классификация вод по сапробности. Кратко рассмотрены компоненты водных экосистем и главные процессы жизнедеятельности гидробионтов. Особое внимание уделено функционированию водных экосистем, его особенностям в экосистемах разного типа, экологической сукцессии гидробиоценозов, эвтрофированию, загрязнению водоемов и водотоков.

Адресовано студентам, аспирантам и специалистам, изучающим гидробиологию, водную экологию и лимнологию, всем занимающимся проблемами водных ресурсов, их охраны и рационального использования.

Издание подготовлено при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» по теме № 2.1.1/1359, федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009–2013 годы) по государственному контракту № 02.740.11.0018.

Библиогр. 154 назв. Ил. 41. Табл. 38.

УДК 574.5 (078.5)

ББК 28.082я73

ISBN 978-5-9624-0388-5

© Зилов Е. А., 2009

© ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет», 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
<b>I. ОБЗОР ГИДРОБИОЛОГИИ И ВОДНОЙ ЭКОЛОГИИ</b>	<b>9</b>
1. Гидробиология и водная экология, их место в системе естественных наук	9
2. Предмет, цель, задачи, методы исследований гидробиологии и водной экологии	10
3. Основные направления гидробиологии и водной экологии	13
4. История возникновения гидробиологии	15
<b>II. ОРГАНИЗАЦИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ</b>	<b>18</b>
5. Основы терминологии	18
5.1. Водотоки и водоемы	18
5.2. Вертикальное и горизонтальное деление водоемов	18
5.3. Пруд и озеро, ручей и река	20
5.4. Классификация гидробионтов по биотопам	21
6. Разнообразие и классификации озер	33
6.1. Гидросфера	33
6.2. Разнообразие озер	38
6.3. Генетические классификации озер	41
7. Температурная стратификация озер	55
7.1. Сезонные изменения стратификации и роль в годовой динамике гидробиоценозов	55
7.2. Классификации озер, основанные на стратификации	58
8. Водные экосистемы	62
8.1. Компоненты водных экосистем	62
8.2. Особенности водных сообществ по сравнению с наземными	63
<b>III. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ</b>	<b>66</b>
9. Продукция в водных экосистемах	66
10. Специфика водных экосистем циклического, транзитного и каскадного типов	67
11. Пример сезонной динамики водного сообщества	70
12. Биологическая классификация озер	78
13. Комплексная классификация озер	81
14. Экологическая сукцессия в водоемах	83

15. Влияние биогенов на лимитацию первичной продукции в водной экосистеме	84
<b>IV. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ</b>	<b>85</b>
16. Антропогенное эвтрофирование: причины и контроль	85
16.1. Агенты эвтрофирования	85
16.2. Стадии эвтрофирования	86
16.3. Хозяйственные последствия эвтрофирования	87
16.4. Борьба с эвтрофированием	87
17. Загрязнение бытовыми сточными водами	88
18. Загрязнение водной среды углеводородами	93
18.1. Нефтепродукты	93
18.2. Полициклические ароматические соединения	99
19. Консервативные токсиканты в водных экосистемах	103
19.1. Загрязнение вод металлами	104
19.2. Синтетические органические вещества	112
19.3. Пестициды	116
19.4. Синтетические поверхностно-активные вещества	121
20. Проблема повышения кислотности вод	124
20.1. Источники и распространение	125
20.2. Действие кислотных осадков на окружающую среду	126
20.3. Борьба с закислением	129
Заключение	131
Примерные вопросы к семинарским занятиям	132
Предлагаемые темы рефератов	135
Рекомендуемая литература	139
Цитированные источники	147



*Памяти моего Учителя – гидробиолога  
**Ольги Михайловны Кожовой** (1931–2000),  
профессора, доктора биологических наук,  
заслуженного деятеля науки Российской Федерации*

Гидробиология – наука о жизни в водоемах, исследующая закономерности существования популяций водных организмов и биотических сообществ (биоценозов) в их неразрывной связи со средой обитания (биотопом) и служащая теоретической основой сохранения и обеспечения воспроизводства биологических ресурсов гидросферы. Исходя из этого определения основным объектом гидробиологии как науки следует считать водные экологические системы, т. е. структурно-организованные системы, в которых биотические и абиотические элементы связаны функционально в единое целое на базе круговорота веществ и трансформации потока энергии. Основным методом современной гидробиологии как науки является системный анализ структуры, функции и связей популяций и биоценозов между собой и с факторами среды обитания. Он строится на количественной основе с целью выявления закономерностей, позволяющих управлять структурой и функционированием элементов гидросферы

*О. М. Кожова*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Автор взял на себя смелость предложить на суд учащейся молодежи и их преподавателей настоящее пособие, скорее от отчаяния, нежели желая прославиться, как автор учебного пособия по гидробиологии. Уже более 20 лет в нашей стране не появлялось учебников и учебных пособий по нашей дисциплине. Последние известные мне отечественные учебники (Константинов, 1986, Кожова, 1987) вышли в свет поколение назад, причем один из них сразу стал библиографической редкостью, а второй – достаточно специфичен и адресован в первую очередь студентам-биологам. С лимнологией еще хуже – единственное пособие по ней (Хатчинсон, 1969) – перевод фундаментального труда, вышедшего в оригинале в 1957 г., изданный у нас 4 десятилетия назад. Классические работы А. Ф. Алимова (1989, 2000) – все-таки в большей степени монографии и рассчитаны на специалистов, а не на студентов. Некоторую надежду вселяет появление в последнее время учебных пособий по отдельным специальным гидробиологическим дисциплинам (например, Садчиков, 2004) и справочных изданий, таких как словари (Гольд, 2004, Зданович, 2004). Тем не

менее, потребность в обзорном общем курсе, пусть не всеобъемлющем и неизбежно неполном, остается.

Автор тешит себя надеждой, что опыт двадцати пяти лет практической работы в гидробиологии: полевая работа, эксперименты с мезокосмами и микрокосмами<sup>1</sup>, математическое моделирование водных экосистем, анализ рядов долговременных наблюдений на разных водоемах (озера Байкал и Ньяса, Братское водохранилище, небольшие водоемы в Дании и Корее) дает ему право предложить читателям свой вариант учебного пособия по гидробиологии и водной экологии. Дополнительную уверенность в своих силах вселяют опыт стажировки под руководством профессора С. Э. Йоргенсена в Копенгагене и, особенно, многолетняя работа под руководством О. М. Кожовой. Должен сразу признаться, что никогда сам не слушал курса гидробиологии, кроме отдельных обзорных лекций профессоров О. М. Кожовой, С. Э. Йоргенсена, А. Гнаука, М. Страшкраба, Р. Де Бернарди, Х. Г. Тундизи, Пу Пеймина, С. Мацуи. Настоящее учебное пособие постепенно сложилось из отдельных курсов лекций, которые мне довелось читать в Королевском Университете Фармакологии (Копенгаген, Дания), Университете Пэ Джэ (Тэджон, Республика Корея). Большой вклад в работу над пособием внесли студенты гидрологи и природопользователи географического факультета Иркутского государственного университета, которым автор преподавал гидробиологию с 2003 по 2007 гг. и которым признателен за их интерес к этой науке и неожиданные вопросы.

Данное учебное пособие является вводным по курсам «Гидробиология и водная экология» и «Гидробиология» для студентов очной и заочной форм обучения по специальностям «Биология», «Экология», «Гидрология» и «Природопользование», хотя автор надеется, что оно может оказаться полезным и для студентов, обучающихся на других факультетах по специальностям «Геоэкология» и «Биоэкология». Цели, которые преследовал, автор, в частности, при подготовке данного пособия, – вкратце обрисовать предмет гидробиологии, ее связи с другими науками, методы, цели и задачи; ввести студента в историю гидробиологии. Одной из

---

<sup>1</sup> Микрокосмы – лабораторные установки, например – аквариумы, мезокосмы – полевые установки. В нашем случае это были полиэтиленовые мешки объемом 2 м<sup>3</sup>, экспонировавшиеся в озере.

главных задач было – познакомить с терминологией, принятой в этой дисциплине, поскольку гидрологи и гидробиологи зачастую одними терминами обозначают разные объекты и явления, а многие термины (особенно биологические) – совсем неизвестны гидрологам. Вообще, данное учебное пособие должно, в первую очередь, служить дополнением учебников А. С. Константинова и О. М. Кожовой. Кроме того, при изучении гидробиологии обидно мало внимания уделяется ее «физической основе» – самим водоемам, которые должны бы изучаться в курсе «Лимнология», но который далеко не всегда сопутствует курсу гидробиологии. Поэтому в учебном пособии достаточно подробно рассматриваются стратификация озер и ее сезонный ход для водоемов пояса умеренного климата. Описаны существующие на настоящее время классификации озер – генетическая (по происхождению), классификации, основанные на особенностях стратификации разных озер, биологическая классификация водоемов по трофическому статусу и классификация вод по сапробности. Кратко рассмотрены компоненты водных экосистем и главные процессы жизнедеятельности гидробионтов. Особое внимание уделено функционированию водных экосистем: процессам продукции и деструкции, их особенностям в экосистемах разного типа, экологической сукцессии гидробиоценозов, эвтрофированию и загрязнению водоемов и водотоков. Насколько автору удалось справиться с поставленными задачами – решать читателям, а я всегда буду рад получить замечания и отзывы по адресу [eugenasilow@hotmail.com](mailto:eugenasilow@hotmail.com). Для успешного усвоения материала курса студенты должны предварительно знать основы физики, химии, общей биологии и общей экологии.

# I. ОБЗОР ГИДРОБИОЛОГИИ И ВОДНОЙ ЭКОЛОГИИ

## 1. ГИДРОБИОЛОГИЯ И ВОДНАЯ ЭКОЛОГИЯ, ИХ МЕСТО В СИСТЕМЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

*Биосфера* нашей планеты существует в виде живых организмов и продуктов их жизнедеятельности в газообразной оболочке Земли – *атмосфере*, твердой – *литосфере* и жидкой – *гидросфере*. Наиболее широкой ареной жизни является гидросфера. Если общая площадь поверхности планеты  $510 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ , то  $362 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  (более 70,5 %) занимает водное зеркало. На самом деле гидросфера обширнее. В нее входят и ледники, покрывающие  $16,3 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  (11 %) суши, озера и реки, занимающие  $2,3 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  (1,7 %) суши, болота и водно-болотные угодья –  $3 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  (2 %) суши. Таким образом, постоянно покрыты водой  $380 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ , т. е. 75 % поверхности планеты. Во время зимы в Северном полушарии снег покрывает дополнительно  $59 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  и площадь гидросферы составляет  $439 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ , т. е. 86 % поверхности Земли.

Предложено и предлагается много определений гидробиологии. Представляется наиболее корректным следующее: **гидробиология** – наука о надорганизменных формах организации жизни, изучающая структуру и функционирование водных экосистем. Данное определение охватывает изучение отдельных водных организмов (*гидробионтов*), их популяций и сообществ, взаимодействий между ними и с неживой природой.

**Водная экология** (гидроэкология, экология гидросферы) – часть геоэкологии, изучающая водные экосистемы как совокупность трех взаимодействующих компонентов: водной среды, водных организмов и деятельности человека.

Гидробиология и водная экология тесно связаны, прежде всего, с науками о гидросфере – гидрохимией, гидрофизикой, гидрологией.

*Гидрохимия* – часть геохимии, изучающая химический состав естественных вод и протекающие в них химические реакции. *Гидрофизика* – часть геофизики, исследующая физические свойства природных вод и протекающие в них физические процессы. *Гид-*

*рология* – часть географии, изучающая природные воды, закономерности круговорота воды в природе.

Близка гидробиология и к таким географическим дисциплинам, как *океанология* и *лимнология*.

*Океанология* – наука о Мировом океане (т. е. совокупности океанов и морей земного шара) и процессах, протекающих в нем.

*Лимнология*<sup>1</sup> (или озероведение) изучает воды замедленного стока поверхности суши. Кроме того, в гидрологии суши можно выделить еще науку о водотоках (*потамология*<sup>2</sup>), ледниках (*гляциология*).

*Лимноэкология* – часть гидроэкологии, изучающая структуру и функционирование экологических систем поверхностных пресных вод суши (озер, водохранилищ, рек).

Гидробиология связана и с рядом биологических дисциплин (зоологией, ботаникой, микробиологией).

Естественно, являясь дисциплинами биологическими и географическими, гидробиология и водная экология, тем не менее, в первую очередь, теснейшим образом связаны с *экологией*, частями которой они являются. Следует отметить, что именно водная экология является одной из самых успешно развивающихся частей экологии.

## **2. ПРЕДМЕТ, ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОБИОЛОГИИ И ВОДНОЙ ЭКОЛОГИИ**

*Предметом исследований* гидробиологии являются экологические процессы в водной среде, т. е. процессы взаимодействия гидробионтов, их популяций и сообществ между собой и с абиотическими компонентами водных экосистем. Водная экология исследует, кроме того, и воздействие человека на эти процессы.

*Цель гидробиологии* может быть определена как понимание экологических процессов, происходящих в водной среде. Управление этими процессами с целью оптимизации использования водных ресурсов может считаться *целью водной экологии*.

---

<sup>1</sup> От греч. *лимнос* – озеро.

<sup>2</sup> От греч. *потамос* – река.

*Основной задачей гидробиологии* является изучение экологических процессов в гидросфере, тогда как применение их в интересах освоения гидросферы и оптимизации взаимодействия человеческого общества с водными экосистемами – *основная задача водной экологии*.

*Главная теоретическая задача гидробиологии*: изучение общих внутренних закономерностей структурно-функциональной организации водных экосистем, которые и определяют круговорот вещества и поток энергии в них, а *водной экологии*: исследование зависимостей круговоротов вещества и потоков энергии от факторов внешней среды, в том числе и антропогенных.

*Конкретные практические задачи* гидробиологии и водной экологии:

1. Повышение биологической продуктивности водоемов для получения из них наибольшего количества биологического сырья.

2. Разработка биологических основ обеспечения людей чистой водой, в том числе оптимизация функционирования экосистем, создаваемых для промышленной очистки питьевых и сточных вод.

3. Экспертная оценка экологических последствий зарегулирования, перераспределения и переброски стока рек, антропогенного изменения гидрологического режима озер и морей.

4. Оценка вновь создаваемых промышленных, сельскохозяйственных и других предприятий для водных экосистем с целью охраны последних от недопустимых повреждений.

5. Мониторинг состояния водных экосистем.

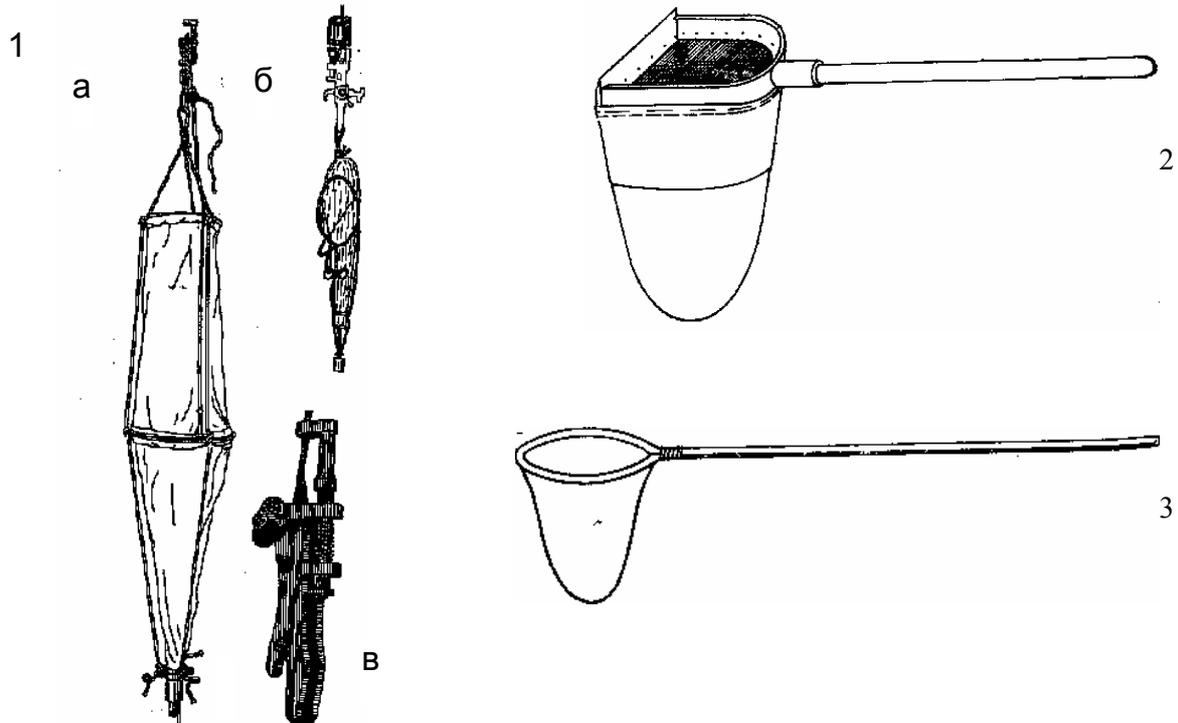
*Главным методом* гидробиологии, как и остальных экологических дисциплин, является системный подход, т. е. рассмотрение экосистемы как целого, и количественный учет протекающих в ней потоков энергии, вещества и информации. Следовательно, гидробиология всегда оперирует величинами численности организмов, их биомассы и продукции<sup>1</sup>.

Для количественного учета используют различные орудия и приборы как специфически гидробиологические – планктонные сети (рис. 1), дночерпатели (рис. 2), драги, планктоночерпатели,

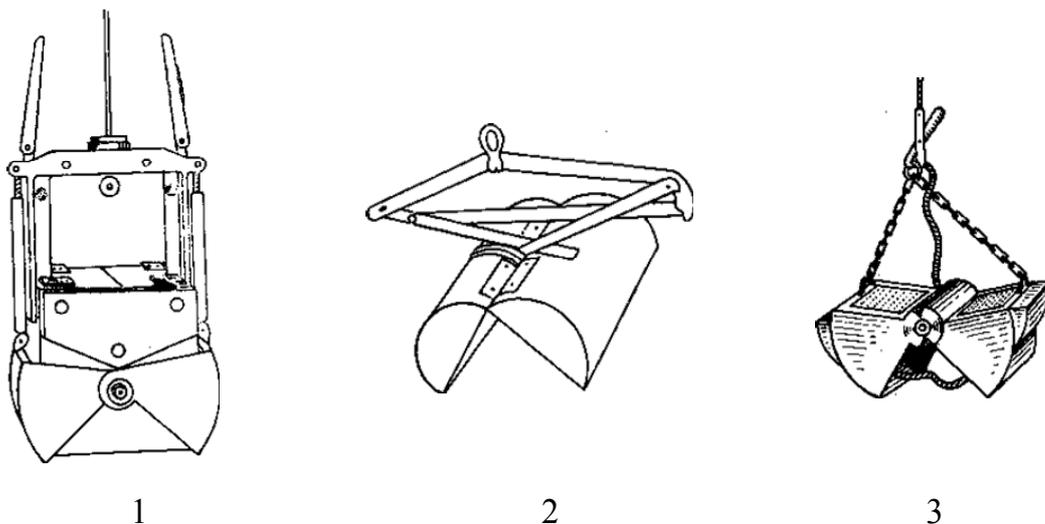
---

<sup>1</sup> Продукция – прирост массы организмов (в единице объема воды, под единицей площади водоема, на единице площади его дна) в единицу измерения времени.

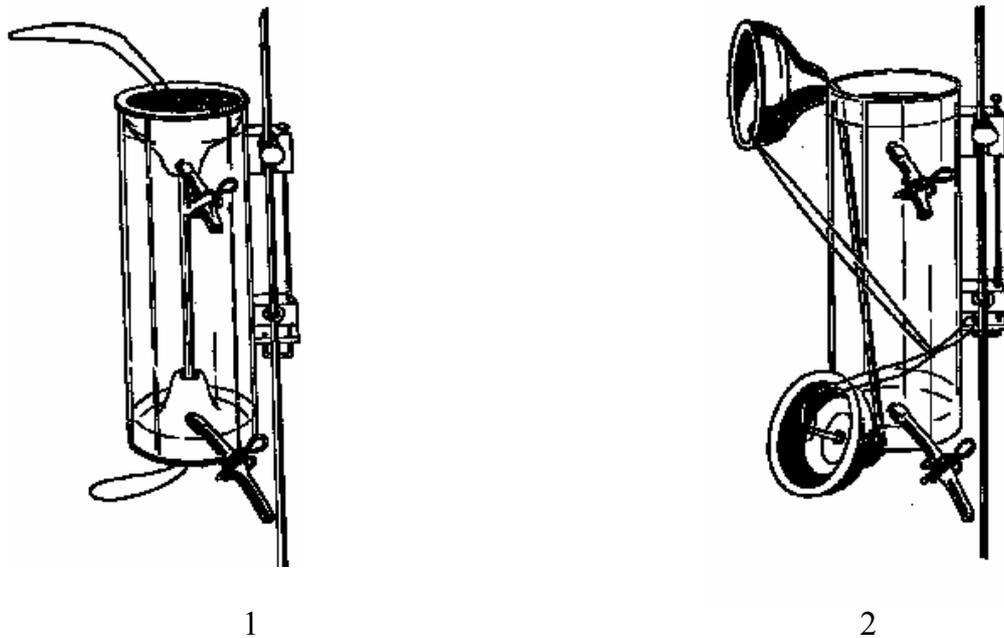
батометры (рис. 3) различных конструкций, так и многие приборы, заимствованные из арсеналов гидрохимии, гидрофизики, гидрологии. В последнее время часто используются погружные и дистанционные биофизические приборы.



**Рис. 1.** Гидробиологические орудия. 1 – планктонная сеть Джели для количественного сбора зоопланктона: а – в открытом, б – в закрытом состоянии, в – за-  
мыкатель сети; 2 – скребок для сбора бентоса, 3 – сачок



**Рис. 2.** Гидробиологические орудия. Дночерпатели для количественного сбора бентоса: 1 – Экмана-Берджа, 2 – Петерсена, 3 – Петерсена модифициро-  
ванный



**Рис. 3.** Гидробиологические орудия. Батометр Ван Дорна для количественного сбора фито- и бактериопланктона с разных глубинных горизонтов: 1 – в открытом и 2 – в закрытом виде

### 3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГИДРОБИОЛОГИИ И ВОДНОЙ ЭКОЛОГИИ

*Общая гидробиология* изучает экологические процессы в водоемах и водотоках. В ней выделяются:

- системная гидробиология;
- трофологическая гидробиология;
- энергетическая гидробиология;
- этологическая гидробиология;
- палеогидробиология;
- бентология;
- планктология.

*Системная* гидробиология – приложение общей теории систем и ее методов в водной экологии. Она занимается общими проблемами организации биосистем в гидросфере, их поведением, самоорганизацией и самоуправлением, моделированием водных биосистем, прогнозом их состояния при различных внешних воздействиях.

По изучаемым процессам различаются *трофологическая*<sup>1</sup> гидробиология – пищевые связи, биологическая трансформация веществ, *энергетическая* гидробиология – поток энергии, ее биологическая трансформация, *этологическая* гидробиология – поведение гидробионтов, *палеогидробиология* – исторические изменения водных экосистем.

По локализации изучаемых процессов в общей гидробиологии можно выделить *бентологию* и *планктологию*. Первая занимается экологическими процессами, проходящими на дне водоемов и водотоков, вторая – в толще вод.

**Частная гидробиология** изучает специфику экологии водных объектов разного типа. Выделяют гидробиологию морей, озер, прудов, болот, луж, временных и пересыхающих водоемов и др. То же происходит и для водотоков: гидробиология рек различных типов, ручьев. Кроме того, существует гидробиология подземных и пещерных вод, гидробиологии полярных и тропических водоемов, водоемов умеренного пояса и субтропических.

**Водная экология**, изучающая взаимодействие водных экосистем и человеческой деятельности тесно смыкается с **прикладной гидробиологией**. Последняя, как это следует из самого её названия, занимается прикладными приложениями результатов общей или теоретической гидробиологии. В нее входят:

- **Продукционная** гидробиология, изучающая биологические основы продуктивности водоемов (например, повышения вылова рыбы, урожая морепродуктов и т. п.).
- **Санитарная** гидробиология, занимающаяся решением проблем чистой воды, самоочищения водоемов.
- **Медицинская** гидробиология, исследующая происхождение и распространение болезней, связанных с водой (в первую очередь – инфекционных). Ее подразделом является *гидропаразитология*, разрабатывающая методы борьбы с паразитическими животными, обитающими в водоемах, в том числе личиночными стадиями паразитов.
- **Токсикологическая** гидробиология или *водная токсикология*, изучающая возможность вреда продуктов техногенеза для

---

<sup>1</sup> От греч. *трофос* – пища.

водных объектов, в частности влияние токсикантов на гидробионтов и экосистемные процессы.

- *Радиологическая* гидробиология, решающая вопросы, связанные с поступлением в водоемы радионуклидов, влиянием их на гидробионтов, накоплением их в трофических цепях.

- *Техническая* гидробиология, изучающая биологические явления, представляющие опасность для техники, контактирующей с водой (биокоррозия, обрастания и т. п.). Частным случаем ее можно считать *навигационную* гидробиологию, которая исследует водные биологические процессы, препятствующие судоходству.

#### 4. ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОБИОЛОГИИ

Еще до возникновения гидробиологии, как науки, началось накопление фактов, составляющих ее научный багаж. Можно отметить следующие заметные события этого процесса:

- 1650 г. Варениус выделил четыре типа озер по присутствию или отсутствию притоков и поверхностного стока.

- 1674 г. ван Левенгук описал микроскопическую водоросль спирогиру, некоторые особенности динамики водорослей в озерах, влияние на нее ветра.

- 1780 г. Соссюр описал тепловую стратификацию озер<sup>1</sup>.

- 1810 г. Лесли изучил формирование физической структуры водного тела некоторых шотландских озер под воздействием поступления света и тепла, ветра, температуры воды.

- 1819 г. Де ла Беш описал металимнион (термоклин)<sup>2</sup> в Женевском озере.

- 1826 г. Де Кандолль выполнил первое научное описание цветения водорослей в озере.

- 1845 г. Мюллер описал планктон.

---

<sup>1</sup> Тепловая или температурная стратификация основана на аномальном свойстве воды – наличии максимума плотности при 4 °С. Благодаря этому вода с температурой как выше, так и ниже этой, занимает вышележащие слои водного тела, а вода с температурой максимальной плотности – нижние.

<sup>2</sup> Металимнион, термоклин или слой температурного скачка отделяет слой воды с температурой максимальной плотности от лежащих выше слоев.

Начиная с середины XIX в. гидробиология начинает оформляться в самостоятельную науку. Ничто не происходит само по себе и, естественно, науки о жизни вод потребовали какие-то практические потребности человечества. *Первая* из них – забота о хлебе насущном. Иллюзия неиссякаемости рога изобилия, – промысла продуктов океана, – рассеялась: произошло снижение объема добычи устриц и мидий, уловы рыбы уменьшились, китобойный промысел стал сокращаться. Возникла необходимость реально оценивать запасы объектов промысла, особенности их воспроизводства и возможность искусственного разведения. *Вторая* – опасность жажды. Угроза загрязнения источников питьевой воды – пресных водоемов из-за развития промышленности, сельского хозяйства, транспорта, роста населения стала реальной. Мыслящая часть человечества постепенно осознала, что без знания механизмов самоочищения природных вод цивилизация рискует остаться без пригодной для питья воды.

Начинаются планомерные работы, которые с полным правом уже можно назвать гидробиологическими. Московское общество любителей естествознания в 1867 г. организует планомерное изучение подмосковных озер. В 1872 г. образуются первые морские биологические станции: в Севастополе, основанная А. О. Ковалевским (ныне – Институт биологии Южных морей НАН Украины), и в Неаполе, основанная А. Дорном. Морская биологическая станция на Атлантическом побережье США основывается А. Агассизом в 1876 г. в Ньюпорте. Возникают и биологические станции для изучения пресных водоемов. В 1880 г. в Богемии (Чехия) А. Фриген создал станцию на Почерницком пруду; в 1892 г. в Германии О. Захариас – на оз. Плён (ныне Макс-Планк Институт Лимнологии); в 1891 г. в России на оз. Глубокое, затем в 1896 г. на оз. Бологовском. Наступает очередь водотоков: в 1894 г. – на р. Иллинойс в США, в 1900 г. – на р. Волге в Саратове. На оз. Байкал первая биологическая станция была создана в 1918 г. в пос. Большие Коты. Байкальская экспедиция АН СССР начала работу на Байкале с 1925, в 1931 г. была основана Лимнологическая станция АН СССР в пос. Маритуй, позже переведенная в пос. Лиственничное. Ныне это – Лимнологический институт СО РАН.

Возникает гидробиологическая аппаратура. Создаются устройства для количественного учета гидробионтов. В. Гензен в

1887 г. изобретает орудие лова планктона – специальную коническую сеть из мелкоячеистого шелкового сита («газа»). Й. Петерсен разрабатывает дночерпатель для количественного сбора обитателей дна. Наука рождается окончательно, когда издаются первые обобщающие монографии и учебники. Такими для гидробиологии и лимнологии стали книги Ф. А. Фореля: «Le Léman. Monographie limnologique», 1893–1901 (в 3 томах) и «Handbuch der Seenkunde. Allgemeine Limnologie», 1901.

## II. ОРГАНИЗАЦИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

### 5. ОСНОВЫ ТЕРМИНОЛОГИИ

#### 5.1. Водотоки и водоемы

«Текучие воды» (ручьи и реки) называют лотическими<sup>1</sup>, а «стоячие воды», т. е. водоемы замедленного водообмена – лентическими<sup>2</sup>. Иногда эти термины применяют и для характеристик участков рек с разной скоростью течения. Участки реки с быстрым течением называют лотическими, с медленным – лентическими.

Можно перечислить множество основных отличий водотоков от водоемов. С точки зрения гидробиологии главными являются следующие:

- Течение в реках относительно быстрое и направленное, тогда как в озерах – медленное и ненаправленное.
- Уровень воды в реках, как правило, более изменчив, чем в озерах.
- Условия существования гидробионтов в реках сильнее зависят от воздействия водосборного бассейна, чем в озерах.
- Озера характеризуются вертикальным градиентом, т. е. условия существования гидробионтов в них изменяются от поверхности к дну, тогда как в реках практически никогда не наблюдается вертикального градиента.
- В реках наблюдается изменение условий (температура воды, скорость течения, гидрохимические показатели и др.) от истока к устью.

#### 5.2. Вертикальное и горизонтальное деление водоемов

*Литоральная зона* – зона, где свет достигает дна озера (рис. 4), но у многих авторов *литораль* это прибрежная зона озера,

---

<sup>1</sup> От греч. *лотус* – омывать.

<sup>2</sup> От греч. *ленис* – успокаивать.

характеризующаяся мелководностью и воздействием волнения, *сублитораль* – зона, простирающаяся до нижней границы распространения донной растительности (для гидробиологов) или подводный откос (для гидрологов). *Профундаль* это остальная площадь дна озера.

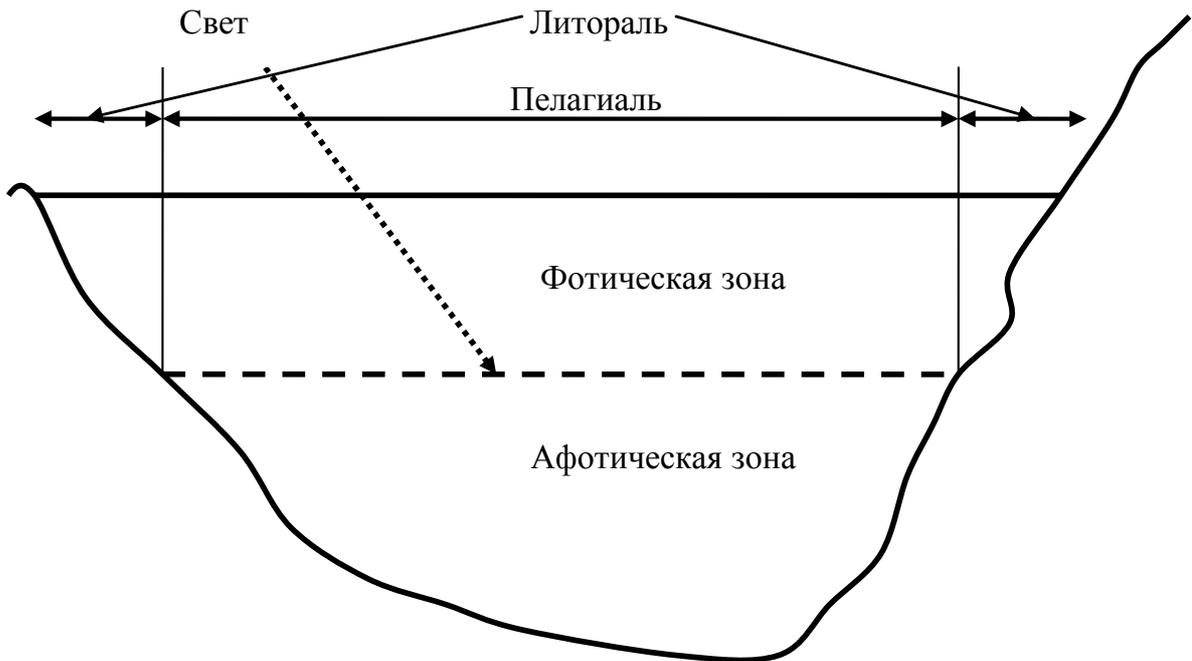


Рис. 4. Принятое в гидробиологии разбиение озера на слои и зоны

Ряд авторов называют литоральной зону, расположенную между нижним и верхним пределами колебаний уровня воды в озере. Иногда ее называют *эулитораль*. Еще можно встретить: *эпилитораль* (не контактирующая с водой) и *супралитораль* (зона брызг). Можно встретить и термины *инфралитораль*: верхняя – населенная полупогруженными водными растениями, средняя – укорененные водные растения с плавающими по поверхности листьями, нижняя – укорененные погруженные растения; *литопрофундаль* – населенная фотосинтезирующими водорослями.

***Пелагическая*<sup>1</sup> зона** – зона, где свет не достигает дна озера. В большинстве озер можно выделить *подводную террасу*, харак-

<sup>1</sup> От греч. *пелагос* – море.

теризующуюся постепенным понижением дна, и *свал* с более крутым углом понижения, переходящий в *котел*, который занимает большую часть озерного дна.

**Фотическим слоем** или зоной называется область, освещаемая лучами солнца, **афотическим** – неосвещаемая. Нижняя граница фотической зоны проходит на глубине, которую достигает 1 % света с поверхности.

### 5.3. Пруд и озеро, ручей и река

Применение терминов *ручей* и *река*, *пруд* и *озеро* у гидрологов и гидробиологов несколько различается. Для гидрологов пруд – это обычно искусственный водоем площадью менее 1 км<sup>2</sup>, озеро – естественный водоем суши с замедленным водообменом. Река – водоток, питающийся атмосферными осадками со своего водосборного бассейна площадью не менее 50 км<sup>2</sup>. Меньший водоток называется ручьем.

В гидробиологии главным признаком, отличающим пруд от озера и ручей от реки, является естественная освещенность дна, играющая важную роль в формировании биологической структуры водного тела. По общепринятой в гидробиологии классификации прудом считается водоем замедленного водообмена, все дно которого освещается солнцем (пелагиаль отсутствует), а озером – полноценный водоем, имеющий и литораль, и пелагиаль, т. е. настолько глубокий, что части его дна никогда не касается солнечный свет. То же относится и к рекам и ручьям. Значительная часть дна реки расположена ниже границы проникновения солнечного света, дно ручья может быть полностью освещено солнцем.

Тем не менее, и в гидробиологии многие авторы отличают пруд от озера по глубине, другие – по наличию или отсутствию растительности на дне, третьи – по происхождению.

## 5.4. Классификация гидробионтов по биотопам

*Биотопом*<sup>1</sup> называется местообитание организма, тогда как его *экологическая ниша* – функциональная роль в экологической системе, т. е. является ли данный организм продуцентом, редуцентом или консументом<sup>2</sup>, и каким именно – растительноядным или хищником, паразитом и т. п. В понятие экологической ниши входят и температурные границы существования данного вида, и требования к качеству воды, состав пищи, хищники, которые питаются им. Это можно сформулировать и так: биотоп – «место проживания» организма, а экологическая ниша – занимаемая им «должность» в экологической системе. Какие же биотопы можно найти в типичном водоеме? На рис. 5 приведена схема водоема.

Если мы обратимся к ней, то увидим, что существуют четыре принципиально различные группы биотопов: на границах – воздух/вода, вода/дно, воздух/вода/дно и собственно толща воды. Организмы, населяющие разные биотопы, представляют собой разные *жизненные формы*.

Толщу вод населяют две группы организмов – планктон и нектон. *Планктон*<sup>3</sup> составляют организмы слишком мелкие, чтобы иметь возможность противостоять силам движения воды и контролировать свое положение в воде. Они парят в толще воды и переносятся ею. Растительные организмы планктона составляют *фитопланктон* – это, главным образом, одноклеточные (хотя могут быть и колониальные) микроскопические водоросли (рис. 6–9).

---

<sup>1</sup> От греч. *биос* – жизнь, *топос* – место.

<sup>2</sup> Продуценты – организмы (как правило, автотрофные, но могут быть и хемотрофные), производящие органическое вещество из неорганического используя при этом энергию солнечного света (автотрофы) или химическую (хемотрофы); консументы – организмы, использующие для поддержания жизнедеятельности энергию, заключенную в готовых органических веществах, производимых продуцентами; редуценты – организмы, живущие за счет мертвого органического вещества продуцентов и консументов и минерализующие его до простых неорганических веществ, затем использующихся продуцентами для воспроизводства живого органического вещества.

<sup>3</sup> От греч. *планктос* – парящий.

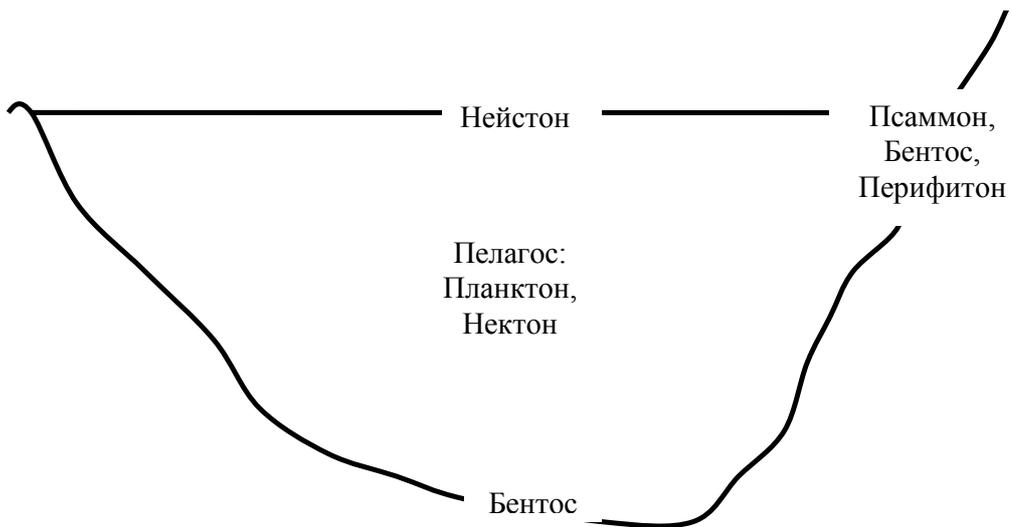


Рис. 5. Основные группы организмов, занимающие разные биотопы водоема

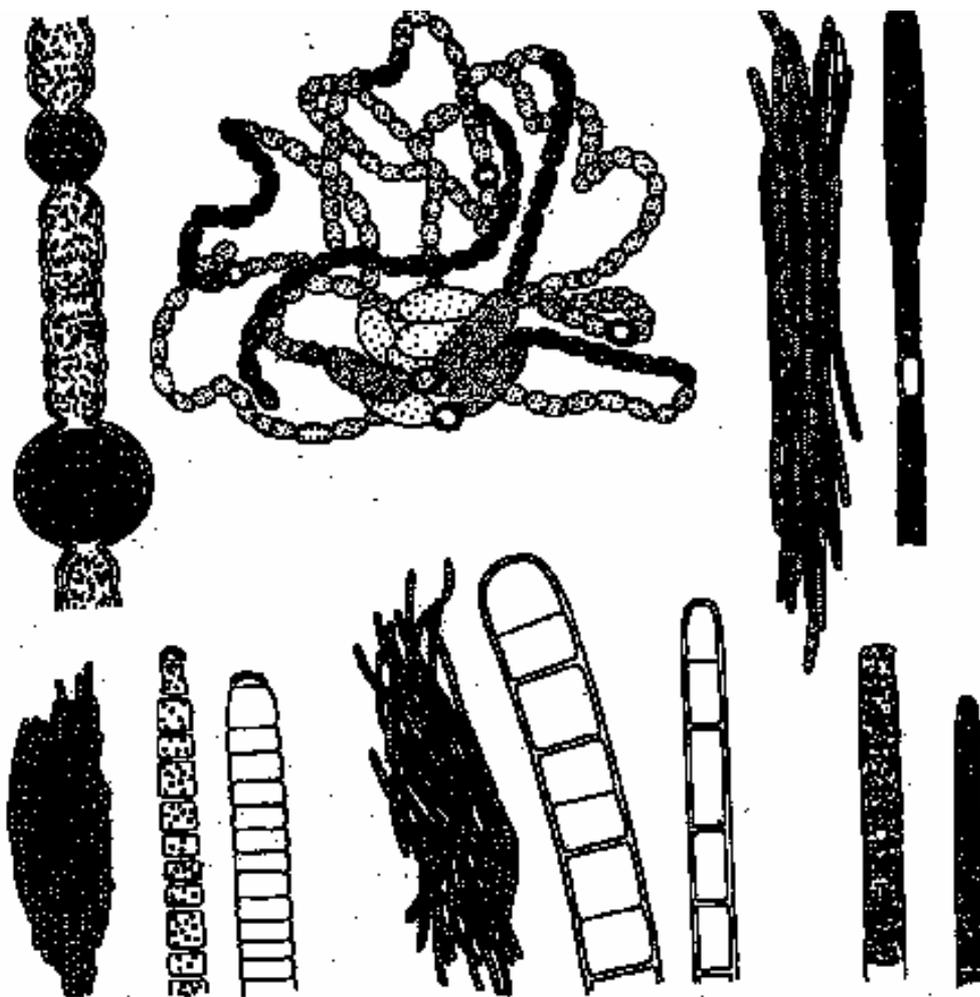


Рис. 6. Фитопланктон – синезеленые водоросли

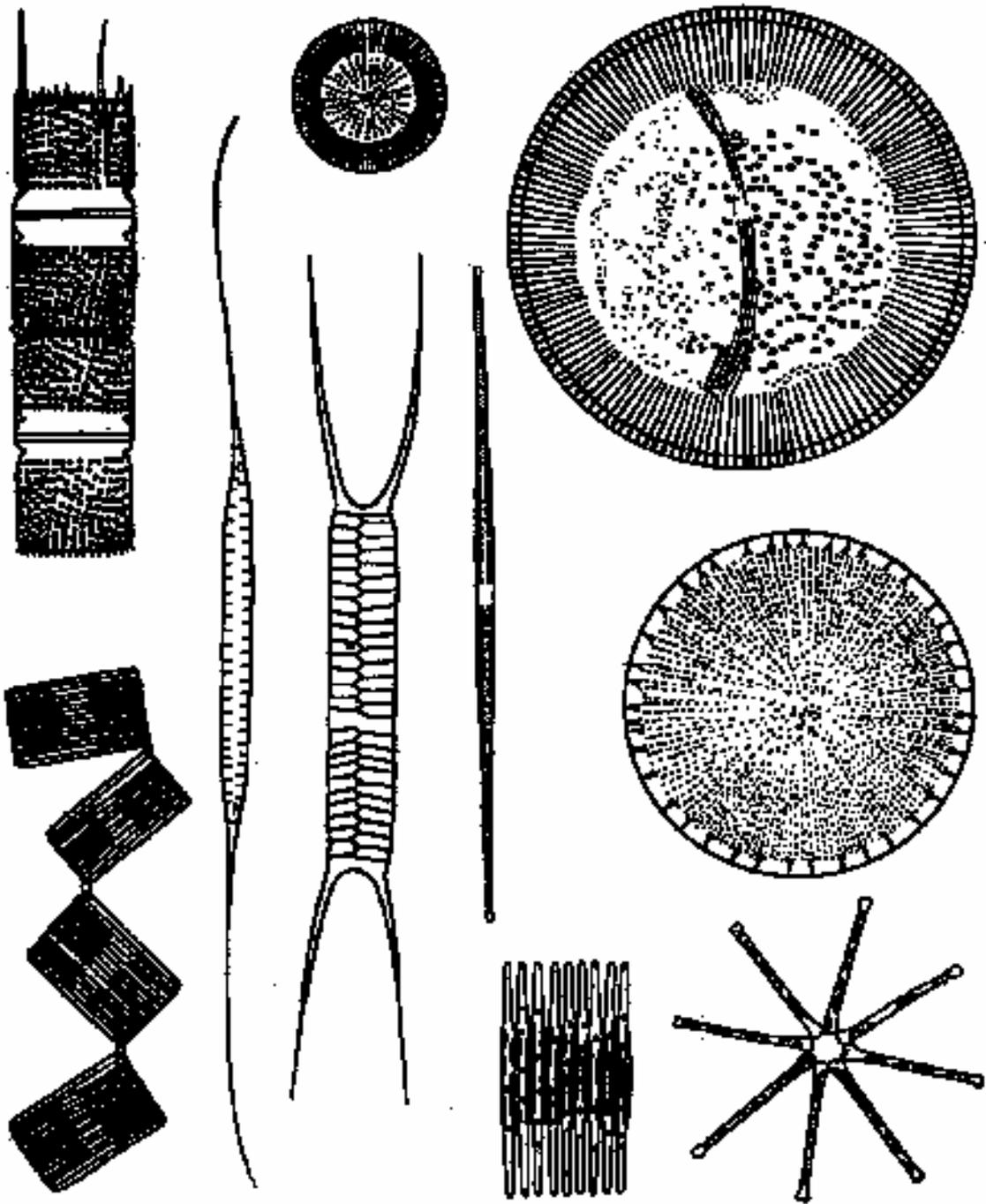


Рис. 7. Фитопланктон – диатомовые водоросли

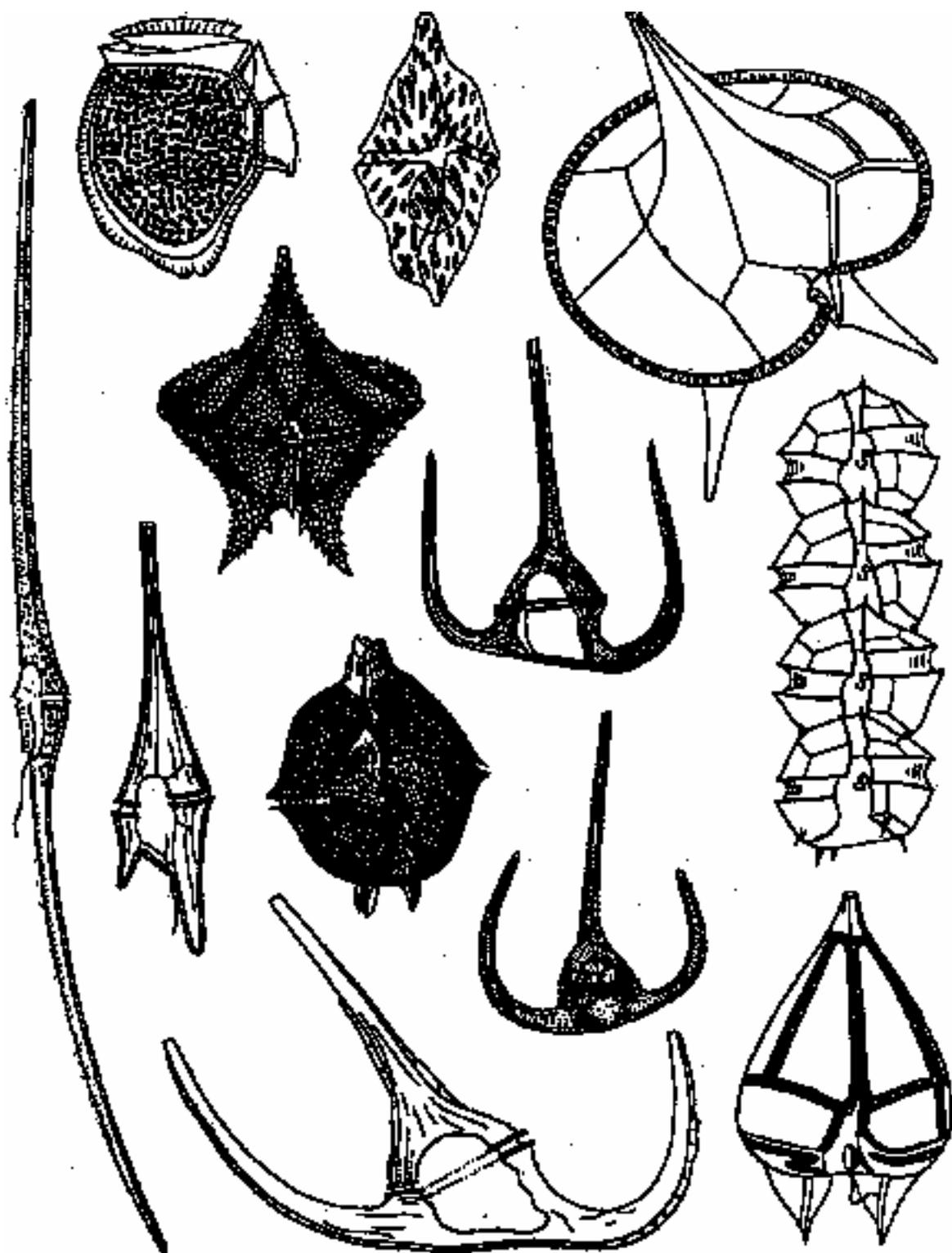


Рис. 8. Фитопланктон – панцирные жгутиконосцы, перидиней или динофитовые водоросли

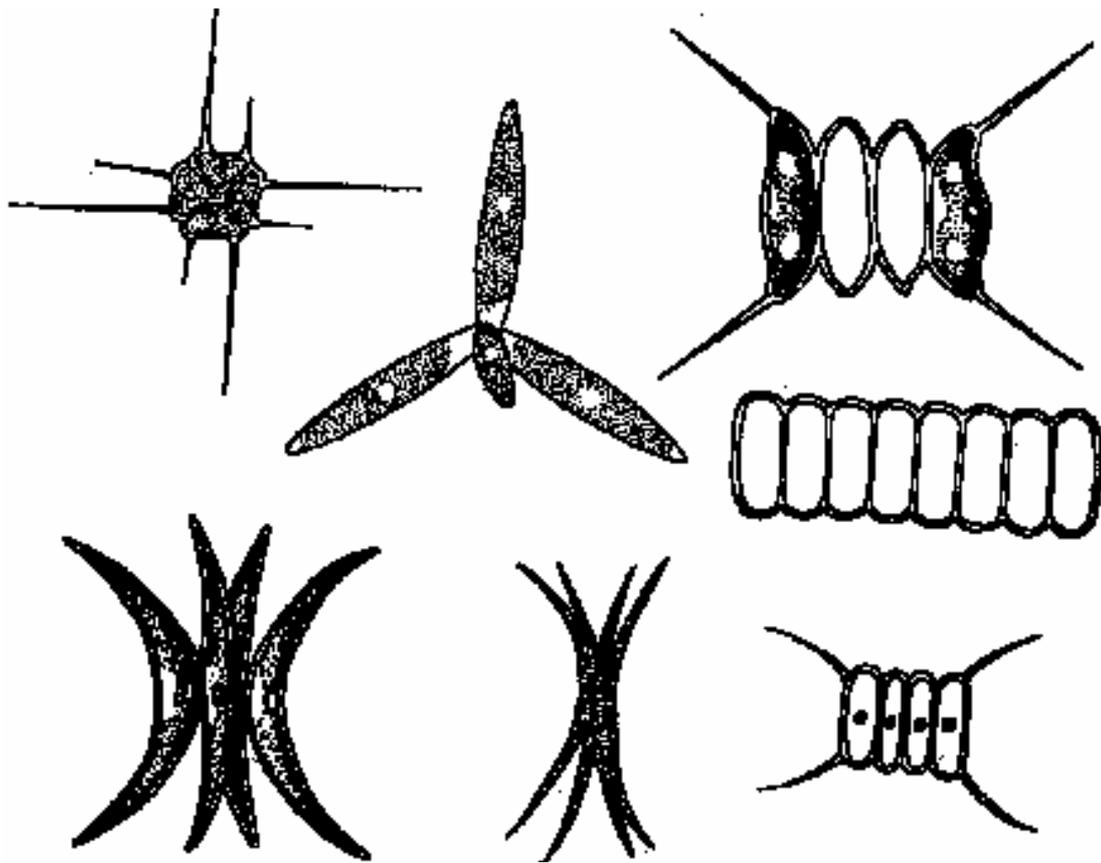


Рис. 9. Фитопланктон – зеленые водоросли

Животные, представленные в планктоне, – *зоопланктон*. В эту группу входит множество простейших, коловраток, мелких рачков (например, всем известные дафнии и циклопы) (рис. 10–14). Кроме того, в зоопланктон включаются личинки насекомых, рыб, многих организмов бентоса, слишком мелкие и слабые для самостоятельного передвижения в толще воды. Организмы, проводящие в планктоне лишь часть своего жизненного цикла, называются *меропланктоном*<sup>1</sup> (рис. 15), в отличие от *голопланктона*<sup>2</sup> – постоянных планктонтов. Кроме того, в планктоне присутствует и множество бактерий, составляющих *бактериопланктон*. Организмы планктона можно классифицировать так, как это приведено в табл. 1. Активные же пловцы, такие как рыбы, амфибии, рептилии, звери, крупные насекомые и их личинки в пресных водах, головоногие моллюски в морских водах составляют *нектон*<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> От греч. *meros* – часть.

<sup>2</sup> От греч. *holos* – целое.

<sup>3</sup> От греч. *nektos* – плавающий.

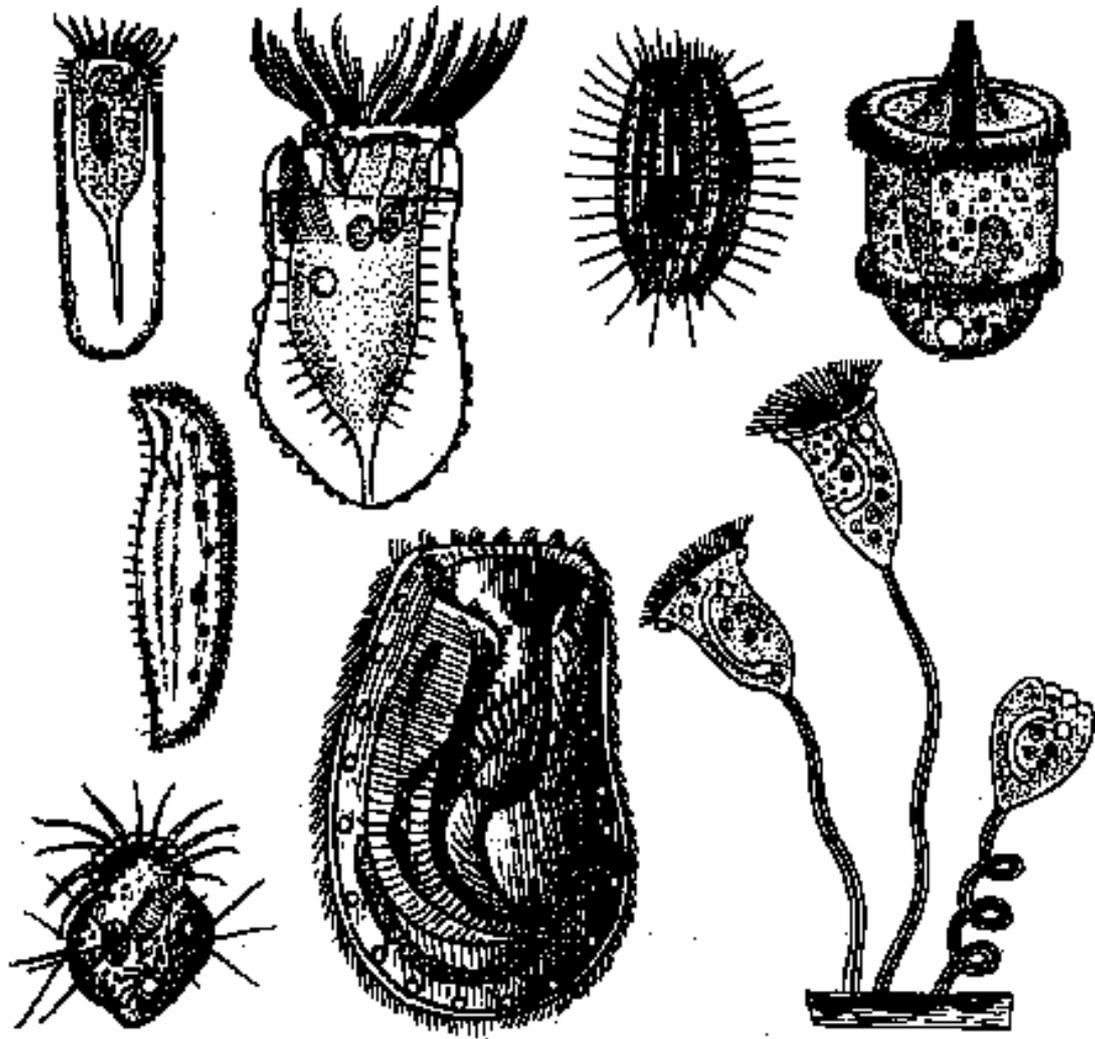


Рис. 10. Микрозоопланктон – инфузории

Обитатели биотопа вода/дно составляют *бентос*<sup>1</sup>. Животные – обитатели дна именуется *зообентосом* и отличаются большим, как правило, разнообразием, чем планктонты. Здесь можно встретить моллюсков, ракообразных, личинок насекомых, самых различных червей и др. Растительное население дна – *фитобентос* представлено высшими водными растениями и водорослями.

---

<sup>1</sup> От греч. *бентос* – глубина.

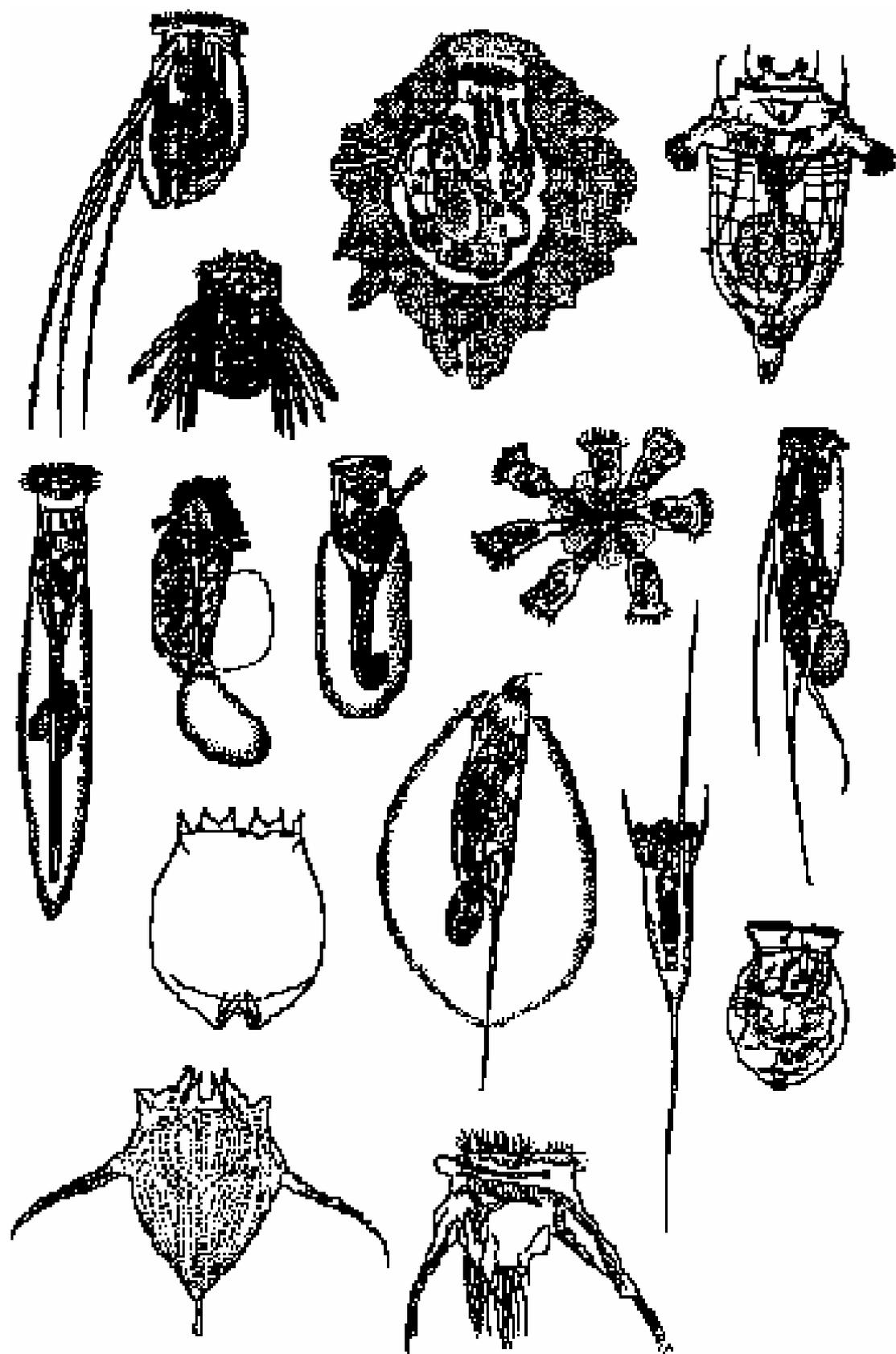


Рис. 11. Микрозоопланктон – колловратки

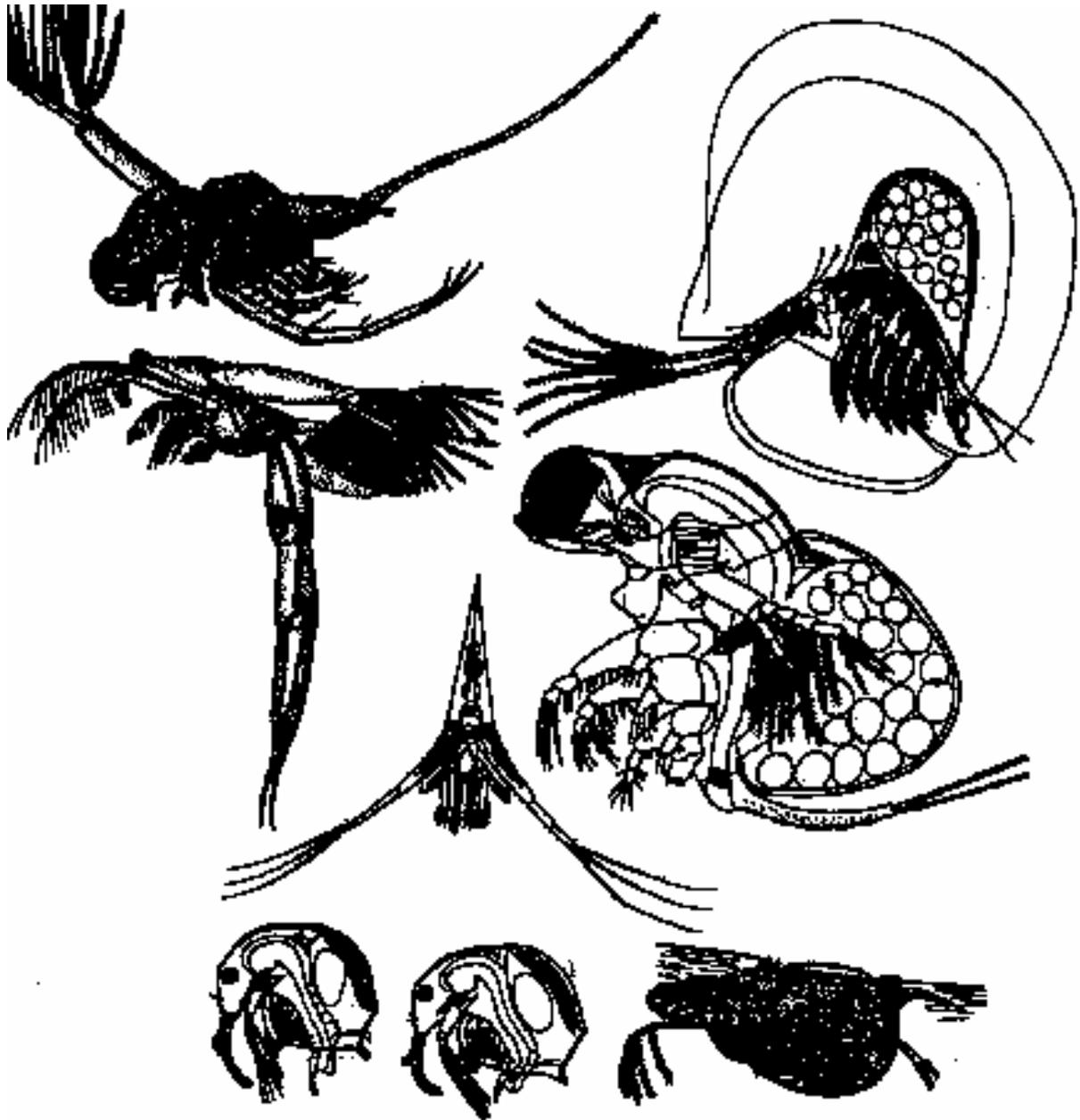


Рис. 12. Мезозоопланктон – ветвистоусые рачки, клadoцеры

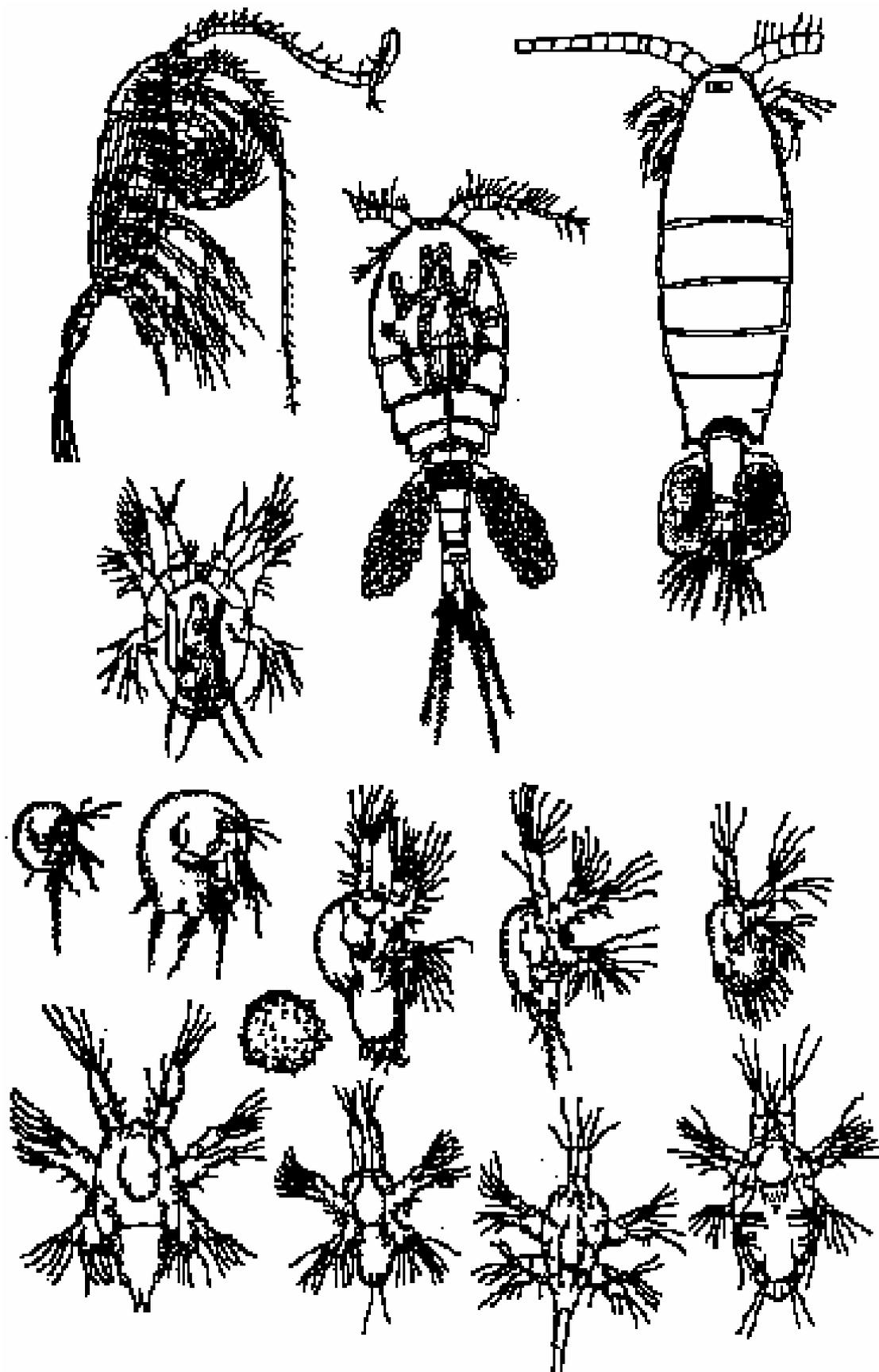


Рис. 13. Мезозопланктон – веслоногие рачки, копеподы

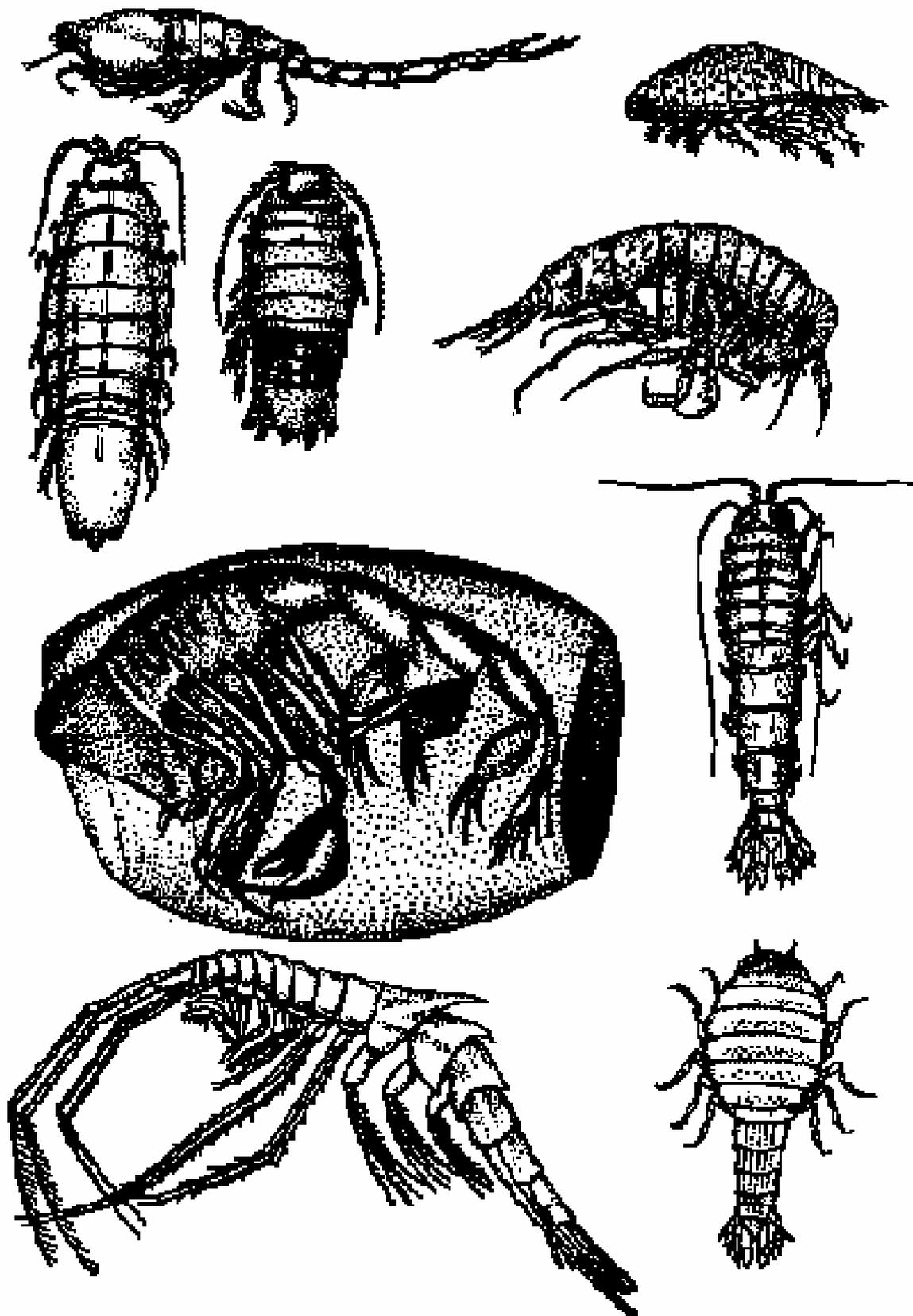


Рис. 14. Макрозоопланктон – высшие ракообразные



Рис. 15. Меропланктон – икра и личинки рыб

Таблица 1

## Классификации организмов планктона

Классификационный признак	Организм	
Размер	до 5 мкм	Пикопланктон (бактерии, синезеленые водоросли)
	от 5 мкм до 50 мкм	Наннопланктон (фитопланктон)
	от 50 мкм до 1 мм	Микропланктон (фитопланктон, зоопланктон: простейшие, коловратки и т. п.)
	от 1 мм до 5 мм	Мезопланктон (зоопланктон: кладоцеры, копеподы)
	От 5 мм до 15 мм	Макропланктон (ракообразные, личинки рыб, насекомых)
Функциональная роль в экосистеме	Продуценты (автотрофные)	Фитопланктон
	Продуценты (хемотрофные)	Бактериопланктон
	Редуценты	Бактериопланктон
	Консументы	Зоопланктон
Местообитание	Литораль	Литоральный планктон
	Пелагиаль	Пелагический планктон
Продолжительность пребывания в планктоне	Весь жизненный цикл	Голопланктон
	Часть жизненного цикла	Меропланктон (личинки рыб, насекомых, бентосных организмов, многих паразитов)
Систематическое положение	Прокариоты	Бактериопланктон (бактерии), фитопланктон (синезеленые водоросли)
	Эукариоты	Водоросли, животные

Прибрежную зону населяют также многочисленные бентонты, кроме того, здесь обилён *перифитон*<sup>1</sup> – различные водоросли, образующие всем известные обрастания на камнях, стеблях высшей водной растительности, кусках древесины и т. п. Вместе с прикрепленными мелкими животными (червями, коловратками, ракообразными, простейшими) он образует сообщество, именуемое *ауфвухс*. К прибрежной же зоне примыкает и своеобразное население прибрежного, пропитанного водой грунта (главным образом песчаного) – *псаммон*<sup>2</sup>. Тут многочисленны различные черви и коловратки.

Биотоп граница воздух/вода населен своеобразными организмами, составляющими целое сообщество, удерживающееся в поверхностной пленке воды, за счет силы поверхностного натяжения. Это – *нейстон*. В нем выделяют *эпинеuston* (организмы, живущие над пленкой) и *гипонейстон* (под пленкой). Кроме того, можно выделить еще и обитателей «плавающих островов», образованных растениями (например, всем известной ряской) – *плейстон*.

Итак, жизненные формы гидробионтов, обитающие в разных биотопах:

- планктон (фито-, бактерио- и зоопланктон);
- нектон;
- бентос (фито- и зообентос);
- перифитон;
- псаммон;
- нейстон.

## 6. РАЗНООБРАЗИЕ И КЛАССИФИКАЦИИ ОЗЕР

### 6.1. Гидросфера

Водная оболочка составляет 0,025 % ( $0,25 \cdot 10^{-3}$ ) массы Земли. Объем гидросферы  $1375 \cdot 10^6$  км<sup>3</sup>. Океаны покрывают 70,8 % земной поверхности и имеют среднюю глубину 3,96 км. В каждом кубическом километре морской воды растворено 36 млн т твердых веществ. Средний химический состав растворенных в мор-

---

<sup>1</sup> От греч. *пери* – вокруг, *фитон* – растение.

<sup>2</sup> От греч. *псаммос* – песок.

ской воде веществ: Cl – 55,07 %, Na – 30,62 %, Mg – 3,68 %, S – 2,73 %, Ca – 1,18 %, K – 1,10 %, Br – 0,19 %, C – 0,08 %, Sr – 0,02 %, B – 0,01 %. Средний ионный состав океанской и пресной воды дан в табл. 2, состав озерных и речных вод – в табл. 3 и 4.

Таблица 2

Средний ионный состав (в %) морской и пресной воды

Растворенные вещества	Океан	Пресные воды
CO <sub>3</sub> <sup>2+</sup>	0,41	<b>35,15</b>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,68	12,14
Cl <sup>-</sup>	<b>55,04</b>	5,68
NO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	–	0,90
Ca <sup>2+</sup>	1,15	<b>20,39</b>
Mg <sup>2+</sup>	3,69	3,41
Na <sup>2+</sup>	<b>30,62</b>	5,79
K <sup>2+</sup>	1,10	2,12
(Fe, Al) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	2,75
SiO <sub>2</sub>	–	11,67
Sr <sup>2+</sup> , H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , Br <sup>-</sup>	0,31	–

Таблица 3

Средний состав (в %) озерных вод

Главные компоненты (концентрации > 1 мг·л <sup>-1</sup> )		Микрокомпоненты (концентрации < 1 мг·л <sup>-1</sup> )		Следовые вещества (мкг·л <sup>-1</sup> )
Ca <sup>2+</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	64	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	73	Cu
Mg <sup>2+</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	17	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	16	Co
Na <sup>+</sup> +Cl <sup>-</sup>	16	HSiO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	Mo
K <sup>+</sup>	3			Mn
H <sup>+</sup> +F <sup>-</sup>	–			Zn
Fe <sup>2+</sup>	–			B
NH <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	–			V

Вода (H<sub>2</sub>O) – одно из самых замечательных веществ. Она – самое привычное для нас химическое соединение. Мы пьем воду, готовим пищу на воде, умываемся водой, стираем в воде, плаваем в воде. На 2/3 мы состоим из воды и не можем без нее жить. Жизнь, как известно, развилась в воде и немыслима без воды. Вода часто причиняет нам неприятности: отсутствие ее – засухи, избыток – наводнения и потопа. Благодаря своей важности вода кажется одним из самых исследованных веществ на Земле, но не-

ожиданно оказалось, что вода полна загадок не только для обывателей, но и для ученых, постоянно ее исследующих.

Таблица 4

Средний состав речных вод (мг·л<sup>-1</sup>)

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Сумма
Северная Америка	21,0	5,0	9,0	1,4	68,0	20,0	8,0	1,0	0,16	9,0	142
Южная Америка	7,2	1,5	4,0	2,0	31,0	4,8	4,9	0,7	<b>1,4</b>	11,9	69
Европа	<b>31,1</b>	<b>5,6</b>	5,4	1,7	<b>95,0</b>	<b>24,0</b>	6,9	<b>3,7</b>	0,8	7,5	<b>182</b>
Азия	18,4	<b>5,6</b>	5,5	<b>3,8</b>	79,0	8,4	8,7	0,7	0,01	11,7	142
Африка	12,5	3,8	<b>11,0</b>	0,0	43,0	13,5	<b>12,1</b>	0,8	1,3	<b>23,2</b>	121
Австралия	3,9	2,7	2,9	1,4	31,6	2,6	10,0	0,05	0,3	3,9	59
Весь мир	15,0	4,1	6,3	2,3	58,4	11,2	7,8	1,0	0,67	13,1	120

С первого взгляда вода кажется очень простым химическим соединением, молекула которого состоит из двух атомов водорода, присоединенных к атому кислорода. В самом деле, мало найдется молекул, меньших, чем молекула воды. Тем не менее, размеры молекул скрывают всю необыкновенную сложность их свойств, а ведь именно эти свойства идеально соответствуют требованиям жизни, или даже наоборот – создают условия самого существования жизни.

На поверхности планеты существует только две неорганические жидкости – вода и металлическая ртуть. Все ближайшие «родственники» воды: аммиак, сероводород, метан – газы. В газообразном состоянии при нормальных условиях должна находиться и вода.

При 0 °С каждая молекула жидкой воды совершает 10<sup>11</sup>–10<sup>12</sup> движений в секунду, каждая молекула льда – 10<sup>5</sup>–10<sup>6</sup>. Вода расширяется при замерзании, так что образовавшийся лед занимает объем, больший, чем исходная жидкая вода. Это объясняется тем, что молекулы жидкой воды двигаются свободнее и поэтому могут располагаться компактнее. Именно поэтому лед плавает на поверхности воды, в отличие от большинства других веществ для

которых характерна большая плотность твердой фазы по сравнению с жидкой. Если бы и вода вела себя таким же образом, то лед погружался бы на дно водоема, а не защищал бы жидкую воду от дальнейшего охлаждения и кристаллизации. В результате наша планета была бы покрыта сплошной ледяной коркой и жизнь была бы невозможна.

Плотность воды возрастает с ростом температуры от 0 °С до 3,98 °С. По превышении температуры 4 °С движения молекул воды становятся интенсивнее и плотность воды начинает снижаться.

Удельная теплоемкость воды также аномально высока. Для того чтобы поднять температуру 1 г воды на 1 °С, мы должны затратить 4,186 кДж тепла. Для сравнения можно указать, что для такого же разогрева льда нам потребуется 2,04 кДж, а воздуха – 1,00 кДж. Лишь немногие вещества характеризуются теплоемкостью, сопоставимой с теплоемкостью воды (жидкий литий, жидкий водород, жидкий аммиак).

Высокая теплоемкость превращает водоемы в аккумуляторы тепловой энергии, влияющие на климат. Так, с поверхности озера, расположенного на 50° широты с мая по октябрь испаряется до 60 см воды, что эквивалентно потере половины приходящей на поверхность водного зеркала солнечной энергии. В условиях тропиков практически вся приходящая на поверхность озера солнечная энергия уходит на процессы испарения. Таяние 1 м<sup>3</sup> льда также предотвращает нагревание 10 м<sup>3</sup> воды.

Скорость изменения плотности воды с температурой при высоких температурах возрастает. Это неизбежно воздействует на процессы перемешивания воды – чем выше температура воды, тем больше энергии требуется на ее перемешивание.

Важными параметрами являются поверхностное натяжение и вязкость. Сила поверхностного натяжения воды достаточно велика и составляет  $7,3 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ . Выше поверхностное натяжение только у жидкой ртути. Поверхностное натяжение уменьшается с ростом температуры, в присутствии поверхностно-активных веществ, включая гуминовые вещества и продукты выделения водорослей.

Вязкость воды также уменьшается с температурой. Чем выше вязкость жидкости, тем легче организмам «парить» в такой жидкости, чем ниже вязкость – тем легче осуществлять активное плавание.

Вода чрезвычайно плохо сжимаема, характеризуется низким коэффициентом теплового расширения.

Чем же можно объяснить аномальные свойства воды? В настоящее время их объясняют молекулярной структурой воды, наличием водородных связей и поведением воды как «жидкокристаллического» тела (Chaplin, 2002).

подавляющая часть воды на Земле сосредоточена в Мировом океане. Если гипотетически распределить всю воду планеты на поверхности шара с площадью равной земной, то мы получим слой воды мощностью 2,6 км. Толщина слоя пресной воды при этом составила бы 50 м. Из них 49,5 м – вода, сосредоточенная в полярных льдах и ледниках, и только 0,5 м – вода, находящаяся в озерах и водохранилищах, т. е. доступная для использования человечеством. Наглядно это представлено на рис. 16. Поскольку именно пресные водоемы особенно важны для человечества как производители и хранилища доступной питьевой воды, в дальнейшем изложении мы сосредоточимся именно на пресных водах.

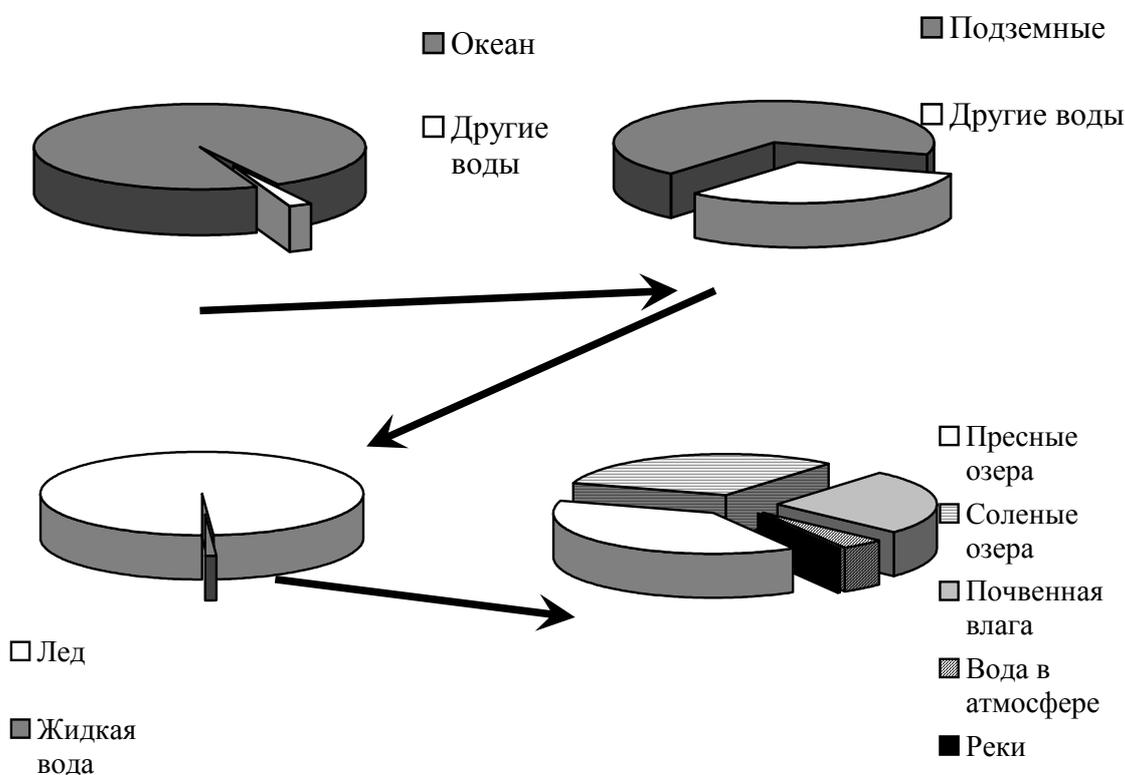


Рис. 16. Состав гидросферы по классам вод

## 6.2. Разнообразие озер

На Земле насчитывают по разным оценкам от 5 до 9 млн озер с площадью поверхности более  $0,01 \text{ км}^2$ .

В лимнологии широко используют следующие морфометрические характеристики озер: максимальную длину, ширину, площадь водного зеркала, объем ( $V$ ), максимальную ( $z_m$ ), среднюю и относительную глубину, длину береговой линии и развитие береговой линии.

*Максимальная длина* ( $l$ ) – расстояние по поверхности озера между наиболее удаленными точками берега.

*Максимальная ширина* ( $b$ ) – наибольшее расстояние по поверхности озера между берегами под прямым углом к линии максимальной длины. *Средняя ширина* ( $\bar{b}$ ) рассчитывается как отношение площади водного зеркала ( $A$ ) к максимальной длине:

$$\bar{b} = A / l .$$

*Средняя глубина* ( $\bar{z}$ ) рассчитывается как отношение объема к площади водного зеркала:

$$\bar{z} = V / A .$$

*Длина береговой линии* ( $L$ ) – длина границы между сушей и водной поверхностью, измеряемая либо непосредственно на объекте, либо по карте, аэрофотоснимкам или космическим фотографиям.

*Развитие береговой линии* ( $D_L$ ) – отношение длины береговой линии к длине окружности, равной с водным зеркалом озера площади:

$$D_L = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}} .$$

Чем ближе форма озера к окружности, тем ближе развитие береговой линии к единице, чем не правильнее форма озера, тем больше развитие береговой линии.

По степени постоянства озера делят на *постоянные* и *временные*. Озера по размерам подразделяют на

- очень большие ( $A > 1000 \text{ км}^2$ );
- большие ( $101 < A < 1000 \text{ км}^2$ );
- средние ( $10 < A < 100 \text{ км}^2$ );
- малые ( $A < 10 \text{ км}^2$ ).

Крупнейшие пресноводные озера планеты приведены в таблицах, где они расположены в порядке убывания площади водного зеркала (табл. 5), объема (табл. 6), глубины (табл. 7). Итоговый «рейтинг» озер по этим характеристикам приведен в таблице 8. В необыкновенном разнообразии даже самых больших и известных озер мира можно убедиться, познакомившись с данными, приведенными в табл. 9. Здесь и очень глубокие озера с небольшой площадью водного зеркала и, наоборот, обширные мелководные озера. Понятно, что для систематизации сведений о жизни в озерах необходима какая-то классификация самих озер.

Таблица 5

Крупнейшие пресноводные озера мира по площади водного зеркала

Название озера (страна/страны)	$A$ , км <sup>2</sup>
Верхнее (Канада, США)	82 367
Виктория (Уганда, Кения, Танзания)	68 800
Гурон (Канада, США)	59 500
Мичиган (США)	58 016
Танганьика (Бурунди, Заир, Танзания, Замбия)	32 000
Байкал (Россия)	31 500
Большое Медвежье (Канада)	31 326
Ньяса* (Танзания, Малави, Мозамбик)	30 800
Большое Невольничье (Канада)	28 568

Таблица 6

Крупнейшие пресноводные озера мира по объему

Название озера (страна/страны)	$V$ , км <sup>3</sup>
Байкал (Россия)	23 000
Танганьика (Бурунди, Заир, Танзания, Замбия)	17 800
Верхнее (Канада, США)	12 221
Ньяса (Танзания, Малави, Мозамбик)	8 400
Мичиган (США)	4 871
Гурон (Канада, США)	3 537
Виктория (Уганда, Кения, Танзания)	2 750
Большое Медвежье (Канада)	2 236
Большое Невольничье (Канада)	2 088

\* Другое название – Малави.

Таблица 7

## Глубочайшие озера мира

Название озера (страна/страны)	$z_m$ , М
Байкал (Россия)	1 750
Танганьика (Бурунди, Заир, Танзания, Замбия)	1 470
Ньяса (Танзания, Малави, Мозамбик)	758
Большое Невольничье (Канада)	614
Кратер (США)	588
Тахо (США)	505
Большое Медвежье (США)	446
Верхнее (Канада, США)	406
Маджоре (Италия)	370
Лембн (Швейцария, Франция)	310

Таблица 8

Сводный «рейтинг»  
крупнейших озер планеты

Название озера (континент)	Занимаемое место по			«Рейтинг»
	объему	площади водного зеркала	максималь- ной глуби- не	
Байкал (Азия)	1	6	1	1
Танганьика (Африка)	2	5	2	2
Верхнее (Северная Америка)	3	1	8	3
Ньяса (Африка)	4	8	3	4
Мичиган (Северная Америка)	5	4	>10	5–7
Гурон (Северная Америка)	6	3	>10	5–7
Виктория (Африка)	7	2	>10	5–7
Большое Невольничье (Северная Америка)	9	9	4	8/9
Большое Медвежье (Северная Америка)	8	7	7	8/9

Таблица 9

Морфометрические характеристики некоторых наиболее известных озер мира

Название озера	$V$ , км <sup>3</sup>	$A$ , км <sup>2</sup>	$Z_m$ , м
Европа			
Лембн (Женевское)	89	584	310
Констанца (Бодензее)	48,5	539	252
Балатон	1,9	593	12,2
Маджоре	37,5	212	370
Лох Несс	7,5	56	230
Ладога	908	18 135	230
Азия			
Бива-ко	104	674	27,5
Тай-ху	4,3	2 427	2,6
Хубсугул	381	2 770	267
Северная Америка			
Эри	458	25 821	64
Онтарио	1 640	19 009	224
Тахо	156	499	505
Кратер	17,5	53,2	589
Виннипег	284	23 750	36
Южная Америка			
Ксолотлан	7,97	1 016	26
Титикака	893	8 372	281
Африка			
Джордж	0,8	250	4,5
Чад	72	1 540	10,5

### 6.3. Генетические классификации озер

Совершенно естественным классификационным признаком представляется происхождение озера, его природа. Именно по этому пути пошли Мюррэй и Пуллар, предложившие в 1910 г. разделить озера на три группы: озера с каменным бассейном (имеется в виду именно котловина, ложе, а не водосборный бассейн), озера барьерного происхождения (возникшие в результате перегораживания речного русла) и органические озера (обязанные своим происхождением организмам). Эта классификация была уточнена и детализирована Хатчинсоном в 1957 г., и дополнена Швёрбелем в 1987 г. (Schwoerbel, 1987). Схематично она приведена на рис. 17.

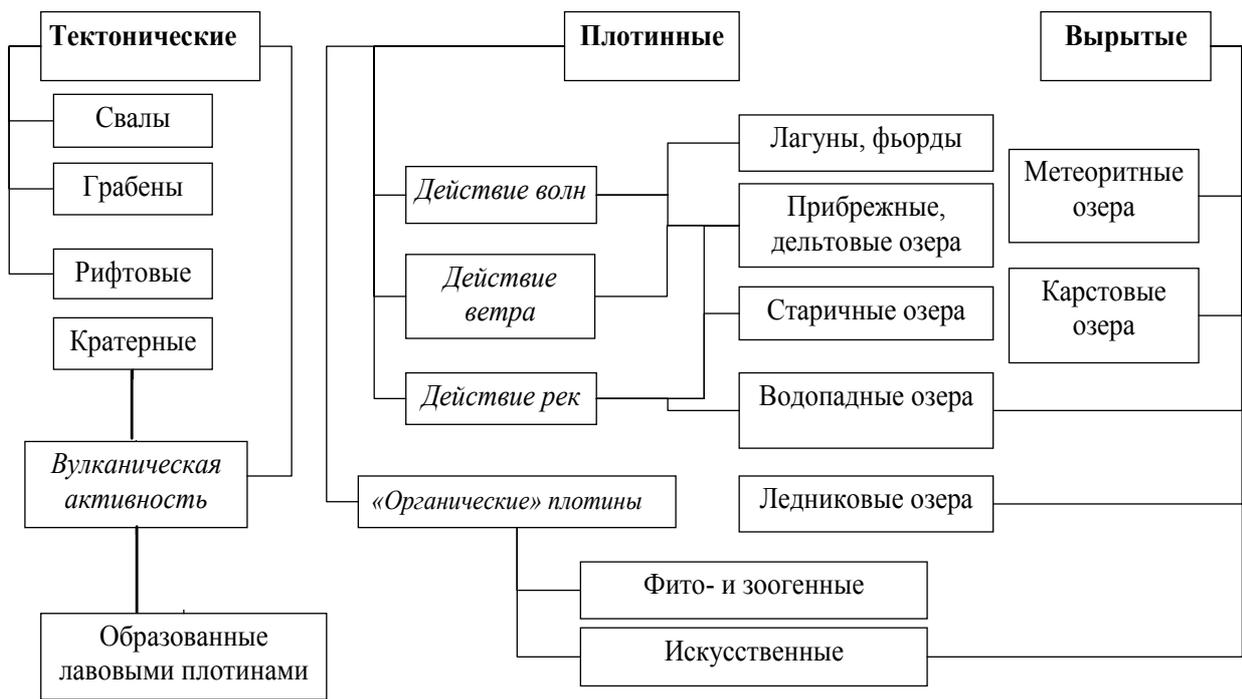
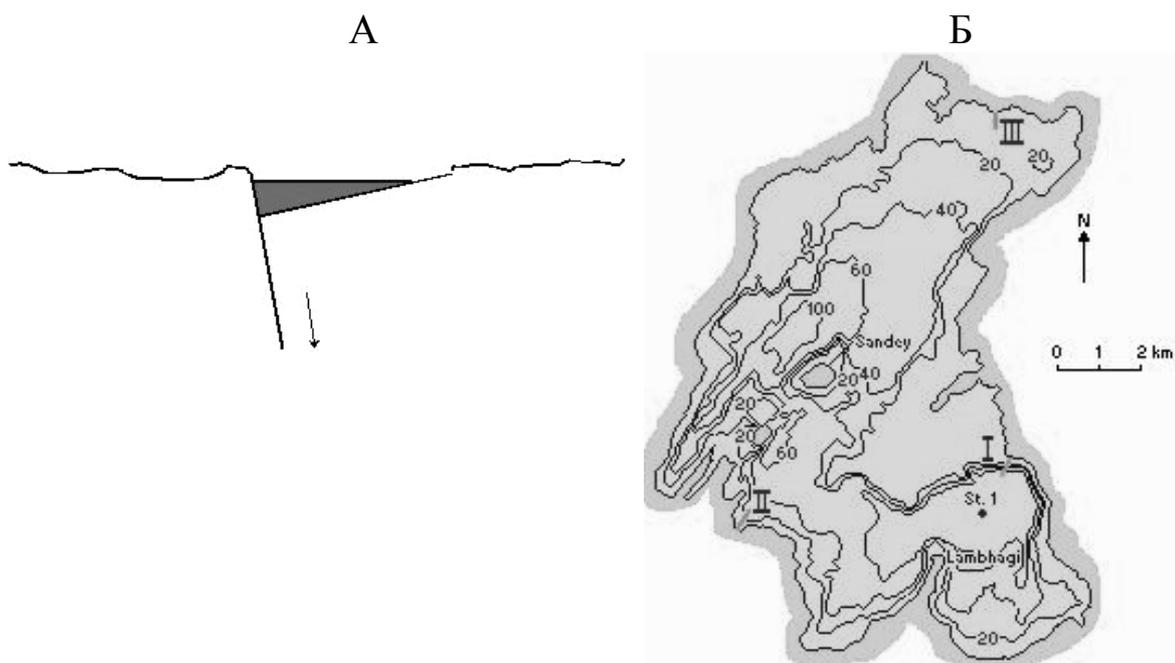


Рис. 17. Схема генетической классификации озер

Рассмотрим эту классификацию. Первая группа озер согласно ей – **тектонические озера**, т. е. озера, возникшие в результате тектонической деятельности. Тектоническая деятельность, в первую очередь, это – движения, разрывы и трещины земной коры. Озера могут образовываться в результате заполнения водой впадин, возникающих в результате **свалов** (рис. 18). Примером может служить Тингвалла – самое большое озеро Исландии.

Множественные свалы называются **грабенами** (рис. 19). Так возникли знаменитые озера Тахо в Калифорнии, Бива в Японии, Пирамида в Неваде. Возраст многих озер, образовавшихся благодаря свалам и грабенам, превышает 100 000 лет.

Следующая группа озер тектонического происхождения – старейшие и крупнейшие на планете **рифтовые озера**. Примеры таких озер: Великие Африканские озера – Танганьика, Ньяса, Туркана, и расположенные в Азии озера Хубсугул и Байкал (рис. 20). Возраст рифтовых озер – от 2 до 20–25 млн лет.

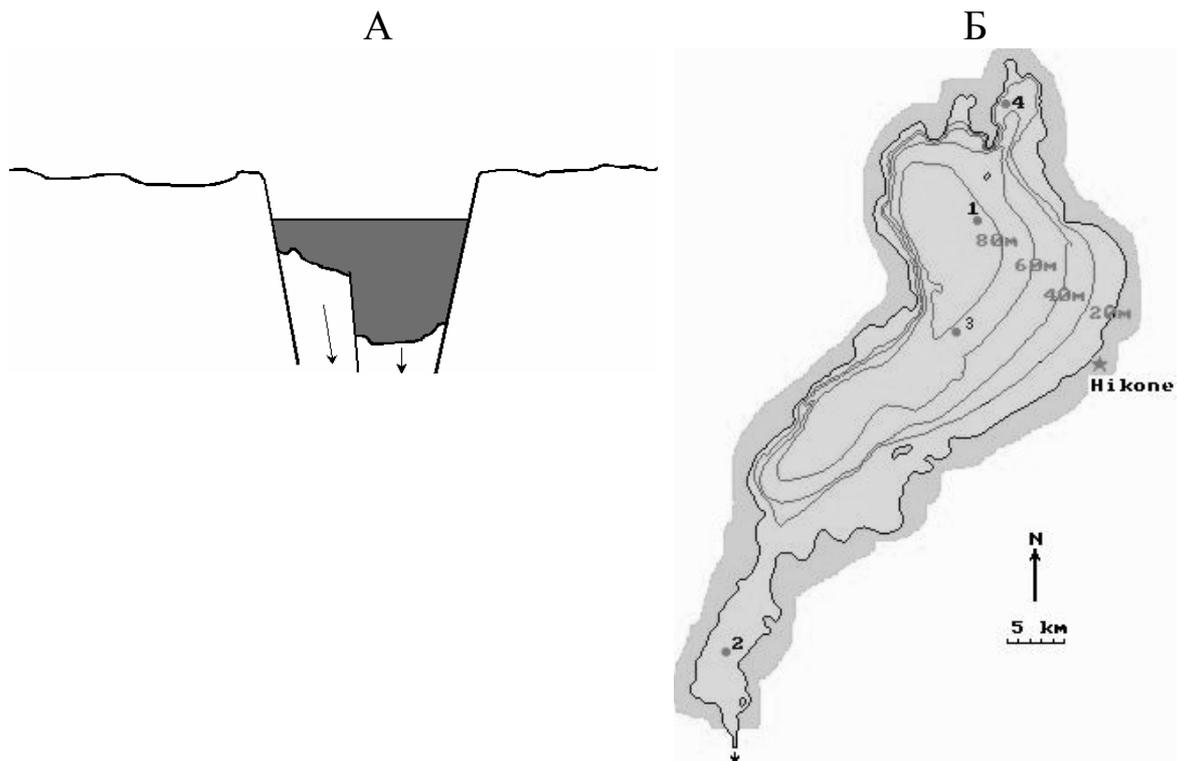


**Рис. 18.** Образование озера в результате свала (А) и батиметрическая карта-схема оз. Тингвалла (Б)

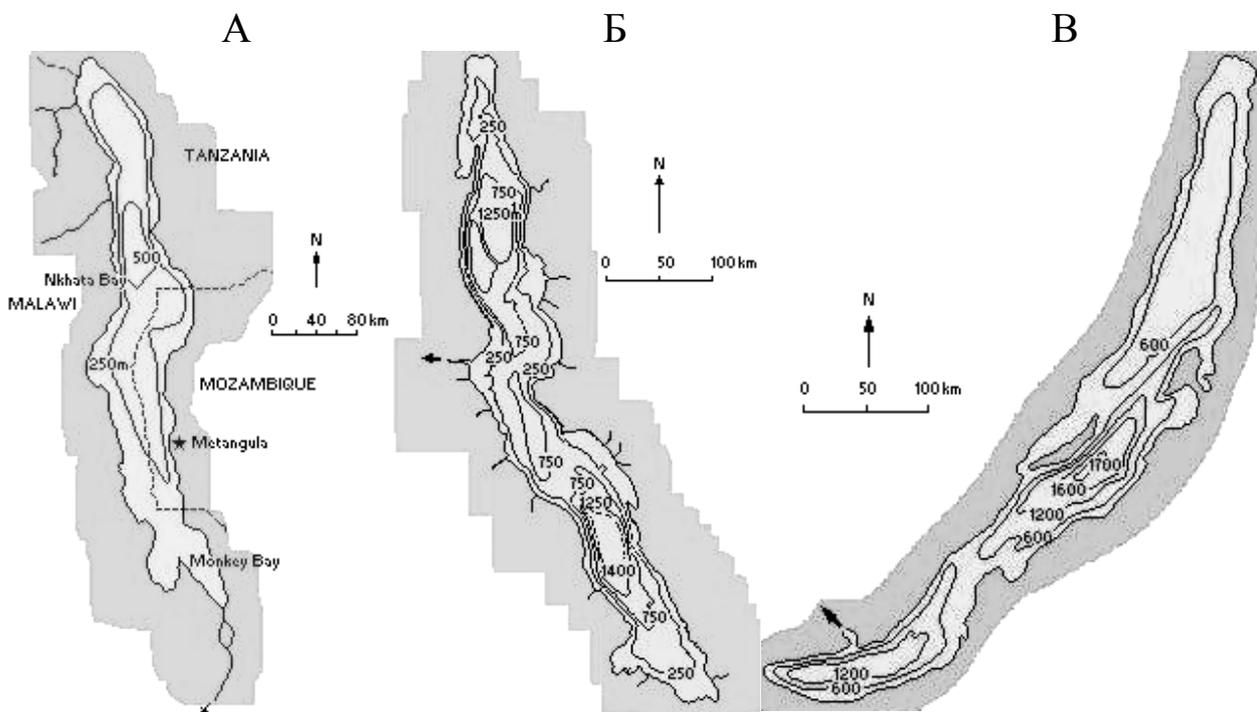
В качестве примера образования рифтового озера рассмотрим историю возникновения Байкала. Сильно упрощая изложение, можно сказать, что формирование байкальской впадины началось приблизительно 20–25 млн лет назад, когда на границе ядра Земли и мантии возник мощный источник глубинной энергии. Следует отметить, что наш регион не уникален в этом отношении, такие источники имеются и под другими подобными зонами, которые называются рифтовыми, – в Калифорнии, Центральной Европе, Восточной Африке. Причины появления этих источников энергии неизвестны и можно предполагать, что они возникают случайно.

Читателю, наверное, доводилось наблюдать, как при закипании воды в кастрюле, образуются «очаги кипения» – некоторые участки дна кастрюли, от которых вверх протягиваются течения более горячей, чем окружающая, воды. Это наиболее наглядное представление об очагах возникновения «аномальной» (горячей и легкой) мантии. Все рифтовые зоны отличаются высокой сейсмичностью, повышенной вулканической активностью и некоторыми аномалиями геофизических полей.

Аномальная мантия накапливается над своим источником и начинает приподнимать земную кору. Скопившаяся под возникшим



**Рис. 19.** Схема образования озера в результате множественных свалов – грабена (А) и батиметрическая карта-схема оз. Бива (Б)



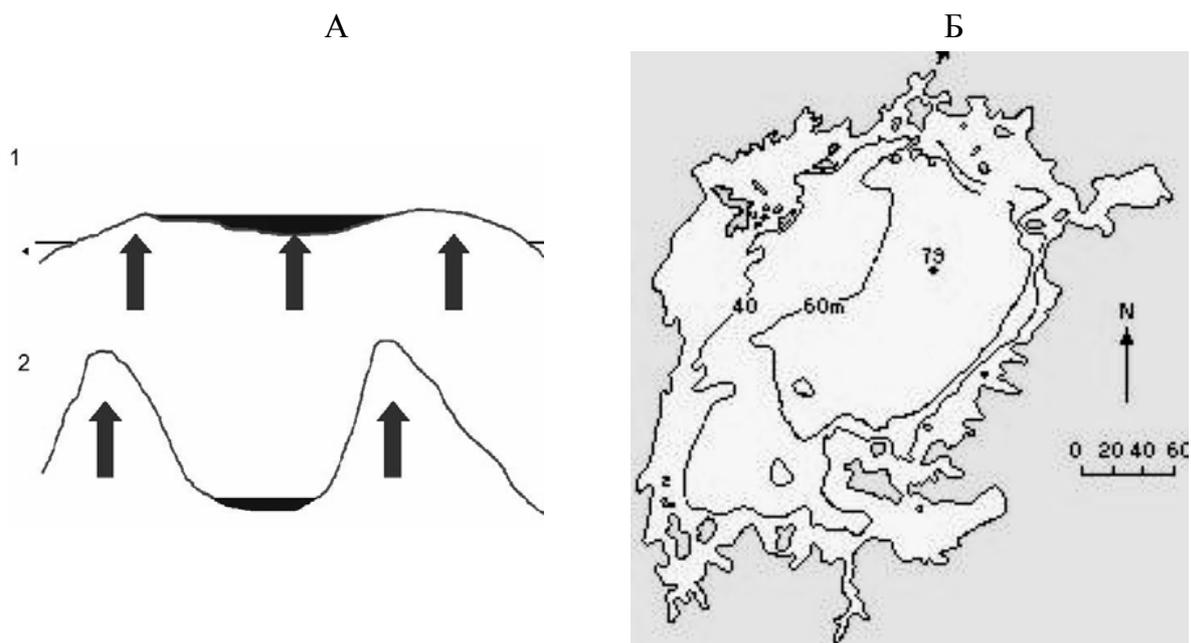
**Рис. 20.** Батиметрические карты-схемы рифтовых озер: А – Ньяса, Б – Танганьика, В – Байкал

вздутием коры аномальная мантия растекается поверх нормальной мантии, создавая силы, растягивающие кору. Последняя, в свою очередь, стремится соскользнуть со склонов образовавшейся выпуклости. Естественно, образуются многочисленные трещины и разломы, происходят землетрясения, мантия изливается наружу в вулканических извержениях.

Упомянутые выше аномалии геофизических полей (гравитационного, теплового, магнитного) наблюдаются в районе Байкала. Так, отвес отклоняется у восточного берега к востоку, у западного – к западу от вертикального положения. Это объясняется значительно большей толщиной земной коры под окружающими озеро горными хребтами (42–46 км), по сравнению с толщиной коры под озером (34–35 км). Тепловой поток из недр Земли на Байкале выше «нормального» значения в 3 раза. Очевидно, это связано и с большей близостью мантии на Байкале, и с ее повышенной температурой. Источники магнитных аномалий в рифтовой зоне также расположены ближе к поверхности, чем под остальной Сибирской платформой (18 км вместо обычных 33). Это свидетельствует о близости к земной поверхности слоя с температурой 450 °С, выше которой титаномагнетит теряет свои магнитные свойства.

Возникшие при растяжении и разломах земной коры впадины стали быстро заполняться водой. Древнейшей из них считается средняя. Позже возникла южная котловина, слившаяся со средней. Около 1 млн лет назад существовало два озера, одно – включавшее современные южную и среднюю котловины и, отделенное от него современным островом Ольхон и ныне подводным Академическим хребтом, северное. Около 500 тыс. лет назад эти озера соединились, образовав почти современный Байкал.

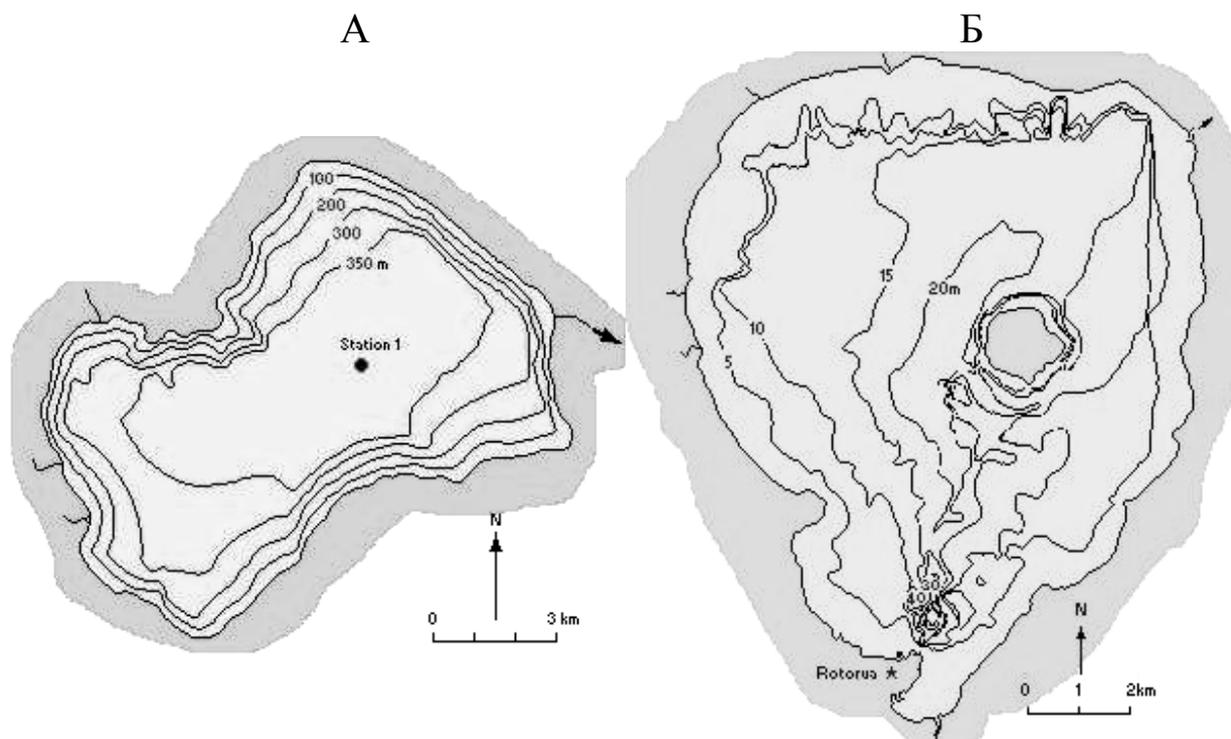
Еще одна большая группа озер тектонического происхождения – озера, возникшие в результате подъемов земной поверхности (рис. 21). Подъемы земной поверхности могут вызывать образование озер двумя путями. Первый – подъем участка дна большого водоема с последующим отступлением или пересыханием материнского водоема. Так возникли озера Окичоби (Флорида, США), оз. Чад (Чад, Камерун, Нигерия). Второй – подъем участков земной поверхности, вызывающий изоляцию части водосборного бассейна и обращение стока. Так образовались, например, озера Виктория (Танзания, Уганда, Кения) и Титикака (Перу, Боливия).



**Рис. 21.** Образование озер в результате подъемов земной поверхности: А – подъем участка дна большого водоема (1), подъем участков земной поверхности, вызывающий инверсию стока и изоляцию части водосборного бассейна (2); Б – батиметрическая карта-схема оз. Виктория

К группе тектонических озер относятся и **озера вулканического происхождения**. Среди них можно выделить *кратерные или кальдерные озера*, расположенные в кратерах вулканов. Примерами таких озер могут служить (рис. 22) оз. Кратер (Западный Орегон, США), оз. Махега (Уганда), Шикоцу-ко (Япония), Тоба Данау (Индонезия), Ротуроа (Новая Зеландия), множество относительно небольших, но глубоких озер в Германии (в округе Айфель) и во Франции (Овернь). Озера вулканического происхождения образуются и *во впадинах на поверхности застывшей лавы*. Таких озер очень много в Исландии (например, Мюфатн). Кроме того, потоки лавы часто перекрывают русла рек, образуя *плотины*, при которых формируются озера. Этот тип озер очень распространен в Японии (например, Ноджири-ко).

Далее в классификации Мюррея – Хатчинсона – Швербеля идет обширная группа **«вырытых» озер**. Первую, не слишком многочисленную группу образуют **метеоритные озера**, образовавшиеся при заполнении водой кратеров, возникших при падении крупных метеоритов.

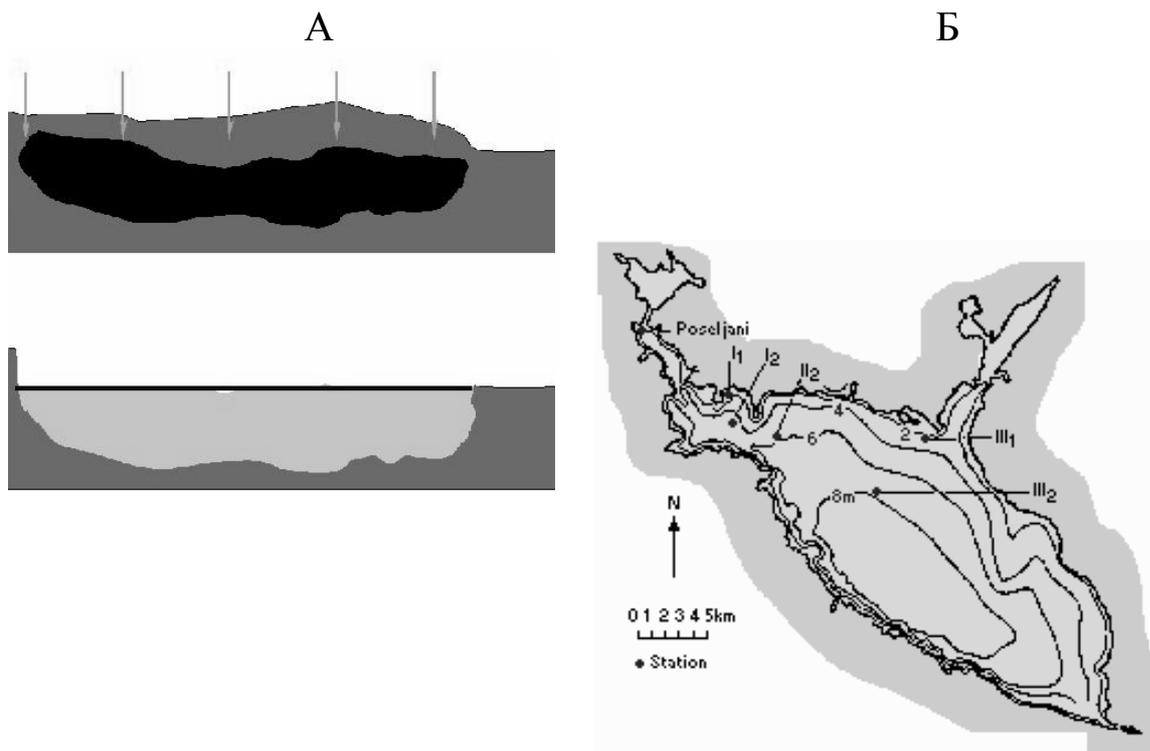


**Рис. 22.** Батиметрические карты-схемы озер Шикоцу (А) и Ротуроа (Б)

Часто озера образуются при растворении горных пород, как правило, известняков. Горные породы (богатые  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Fe\&Al}(\text{OH})_n$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) растворяются под действием подземных вод, насыщенных углекислотой. Возникают подземные пещеры. Когда дожди размывают своды таких пещер, формируются так называемые **карстовые озера** (рис. 23). Они очень распространены на Балканах, в Альпах, на Юкатане, в США (штаты Мичиган, Индиана, Кентукки, Теннесси, особенно во Флориде). В качестве примеров можно привести озера Скадар (Албания), Ба-Бе (Вьетнам).

К этой группе относится и обширное семейство **ледниковых озер**, образовавшихся благодаря передвижениям и таянию ледников. Возраст большинства из них составляет от 6 000 до 15 000 лет.

Ледниковые озера можно разделить на четыре группы: 1) проледниковые озера, образованные ледниковыми барьерами, 2) озера, лежащие в «следах» ледников (троговые и каровые) и морены, образованные ледниковой аккумуляцией, 3) котловые озера и 4) озера, возникшие благодаря совмещению активности ледников и других процессов.



**Рис. 23.** Схема возникновения карстового озера (А) и батиметрические карта-схема оз. Скадар (Б)

*Проледниковые озера*, старейшие в этой группе, относительно небольшие водоемы, которые возникли при перегораживании ледниками речных русел. Например, оз. Агассиц, площадью 350 000 км<sup>2</sup>, с наибольшей глубиной 200 м, существовало с 12 000 лет до 8 000 до н. э. Затем ледниковый барьер стаял и осталось современное оз. Виннипег (Канада), площадью 24 500 км<sup>2</sup>.

Наиболее многочисленны среди ледниковых озер водоемы, образованные благодаря деформации ледниками земной поверхности вдоль пути их перемещения. Часть этих озер лежит в больших выемках, или промоинах, вырытых ледниками при их движении и разворотах. Это *троговые* и *каровые* озера, образованные ледниковой эрозией. Кроме того, ледники перемещали гигантские массы грунта, камней и т. п., которые перегораживали русла рек, оказавшихся на пути ледника (*краевые морены*), либо образовывали барьеры по таянии ледника (*терминальные морены*). Так образовались многочисленные озера Канады, Северной Британии, Северной Европы (Швеция, Финляндия, Карелия). Яркими примерами могут служить Женевское озеро, Констанц, Онежское, Ладожское. *Котловые озера* – относительно небольшие, но глу-

бокие водоемы, образовавшиеся на месте остановки, постепенного захоронения ледника и последующего таяния его. Великие Североамериканские озера (Верхнее, Мичиган, Гурон, Эри и Онтарио) являются примером *совместного действия ледников*, расширивших речные долины, и создавших терминальные морены, и подъема земной поверхности, продолжающегося и ныне.

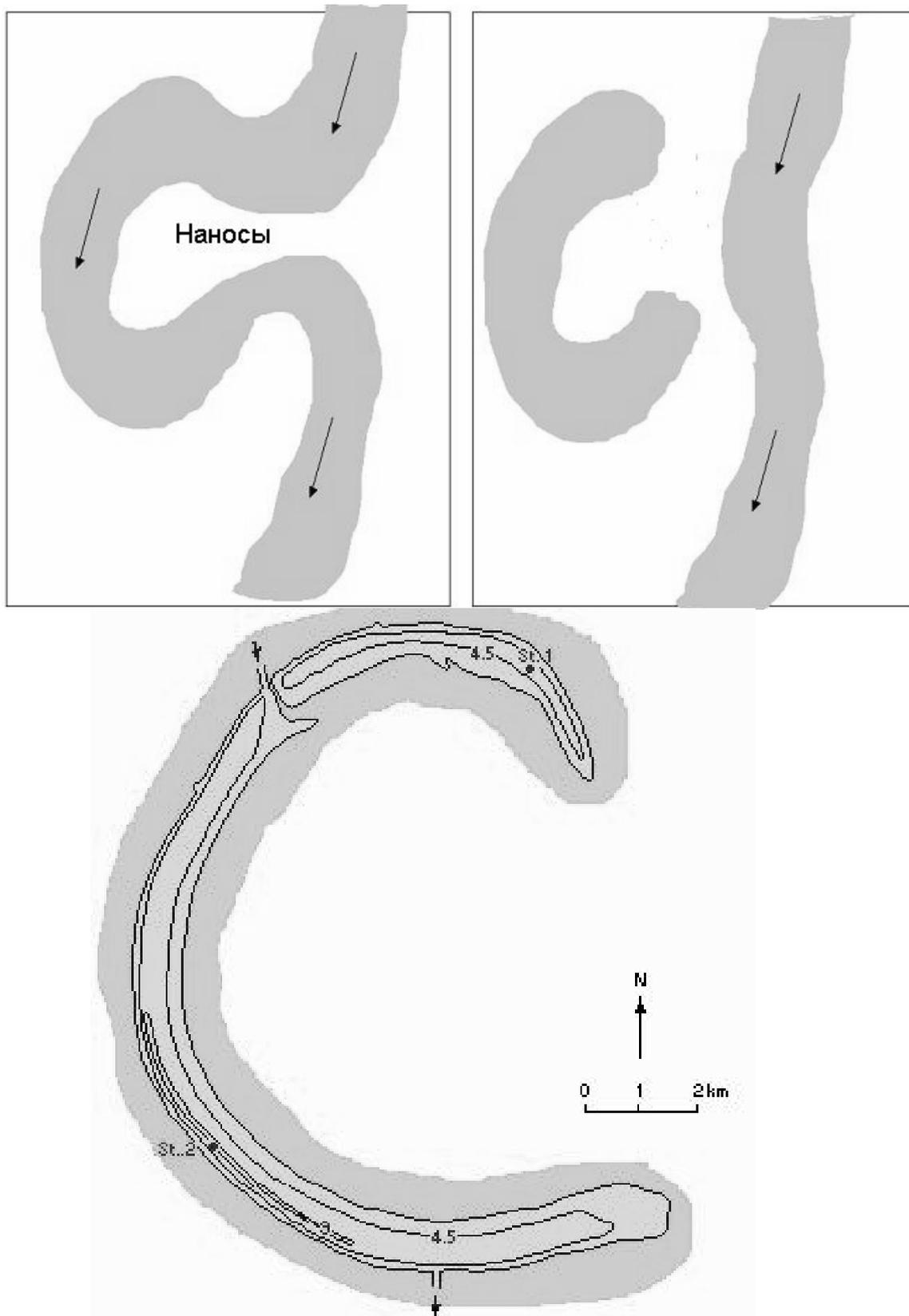
Переходя к рассмотрению *барьерных (плотинных) озер*, должен напомнить читателю, что мы уже упоминали озера, возникшие благодаря перегораживанию русел рек в результате тектонической активности, в том числе, извержениям лавы, и движению ледников. Тем не менее, этим не исчерпываются случаи возникновения барьерных озер. Главными силами, создающими барьеры, образующие озера, являются **действие рек, ветра и волн**.

Реки – главные создатели таких типов озер, как дельтовые озера, старичные и водопадные. *Дельтовые озера* образуются в устьях рек или в так называемых внутренних дельтах, когда река достаточно широко разливается по равнинной поверхности. При этом часть рукавов может изолироваться от главного русла и сформировать озеро. *Старичные озера* (англ. *oxbow* – хомутовые, *billabongs* – в Австралии, *baors* – в Индии и Бангладеш) образуются в излучинах рек (рис. 24). Ярким примером таких озер может служить оз. Чикот (Арканзас, США).

*Водопадные озера (промоины)* образуются в местах падения воды с высоты, приводящего к образованию промоины – ложа нового озера (рис. 25).

Под действием ветра, перемещающего массы эрозийных материалов, могут образовываться *дюнные (эоловые) озера*, когда эти массы формируют котловину озера или перегораживают речные бассейны. Однако чаще образование новых озер ветер занимается вместе с волнами и течениями.

Если береговая линия большого водоема нерегулярна, а так оно, как правило, и есть, то течения, движущиеся вдоль берега, приносят много эрозийного оседающего материала, отгораживающего, в конце концов, залив или бухту большого водоема от материнского водного тела. Так образуются *прибрежные озера*: лиманы, лагуны и фьорды. Котловины последних образовались в свое время в большинстве случаев в результате движения ледников.



**Рис. 24.** Схема образования старичного озера и батиметрическая карта-схема оз. Чикот

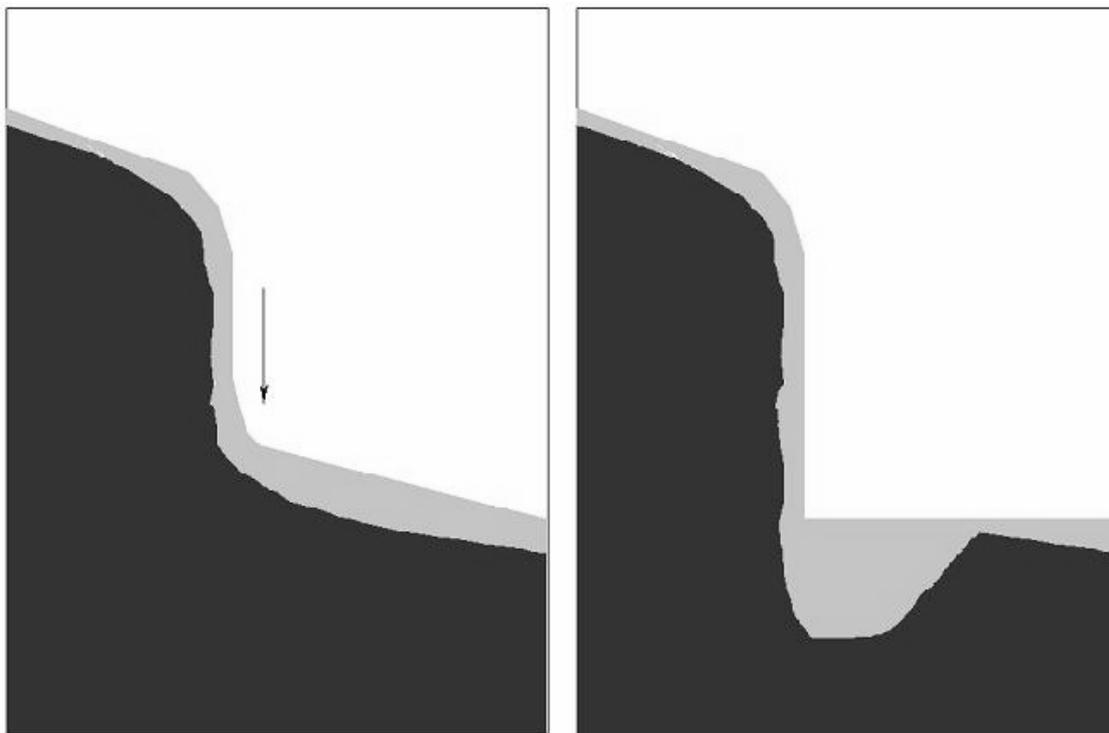


Рис. 25. Схема образования водопадного озера

Последняя группа озер, которую мы рассмотрим в этой главе – **органические**. Название связано не с органическим веществом, как могло бы показаться, а с организмами, деятельность которых и создает эти озера. **Фитогенные озера** возникают при массированном зарастании водотоков. При этом часто фотосинтетическая активность перифитона и высших водных растений вызывает осаждение масс  $\text{CaCO}_3$  из кальцинированных вод. **Зоогенные озера** образуются в результате активности животных. Примерами таких озер служат бобровые запруды и озера на коралловых атоллах.

Наиболее многочисленны среди органических озер **антропогенные, искусственные озера** – от рыбоводных или декоративных прудов до гигантских водохранилищ ГЭС. Интересной особенностью плотинных водохранилищ является сочетание речных (в речной части водохранилища) и озерных (в приплотинной области) свойств. Сравнительные характеристики рек, водохранилищ и озер приведены в табл. 10.

Таблица 10

Сравнительная геоморфологическая характеристика и особенности экосистем рек, водохранилищ и естественных озер

Показатель	Реки	Водоохранилища	Озера
Водосборный бассейн	Множество мелких притоков, прилегающих к стволу русла; площадь водосборного бассейна очень велика по сравнению с площадью зеркала	Обычно узкая, вытянутая котловина на краю водосборного бассейна; площадь бассейна велика по сравнению с площадью зеркала (от 100:1 до 300:1)	Округлый, котловина озера обычно лежит в центре бассейна; площадь бассейна невелика относительно площади зеркала (обычно около 10:1)
Форма	Вытянутая, извилистая, тем длиннее, чем больше водосборный бассейн	Варьирующая, овоидная или треугольная	В большинстве случаев округлая или эллиптическая
Средняя глубина	Мала в истоке, увеличивается к устью	Невелика в речной части, увеличивается в озерной	Средняя или высокая; как правило, в пределах 10 м
Распределение глубин	Растут от истока к устью	Растут от речной части к озерной	Наибольшая глубина обычно на наибольшем удалении от берегов
Эрозия берегов	Экстенсивная, определяется течением	Экстенсивная и определяется течением в речной части; меньшая в озерной части	Локализованная, определяется волнами и течениями, вызываемыми ветрами
Развитие бере-	Очень велико, нестабильное	Очень велико, нестабильное	Относительно низкое, стабиль-

Показатель	Реки	Водохранилища	Озера
Головной линии			дальнее
Характер осадконакопления	Велико при больших размерах водосборного бассейна	Велико при больших размерах водосборного бассейна; поймы большие; дельты большие, узкие; выполаживание быстрое	От низкого до очень низкого; дельты небольшие, широкие; выполаживание медленное
Взвеси в воде	Высокое содержание, состав варьирующий	Высокое содержание, варьирует; высокое содержание частиц глины и ила	Низкое содержание
Колебания уровня воды	Большие, быстрые, нерегулярные; часты наводнения	Большие, быстрые	Небольшие, стабильные
Приток	Поверхностное и подземное питание; очень неравномерен, изменяется по сезонам	Большая часть – речной сток; часто направлен в гипolimнион	Речной сток, ручьи и диффузные источники; в гипolimнион попадает случайно
Сток	Очень нерегулярен, зависит от осадков	Нерегулярен; зависит от водопользования; поверхностный или придонный	Стабильный; как правило, поверхностный, но может быть и подземным
Характер и скорость течений	Быстрое, однонаправленное, горизонтальное	Варьирует; скорость увеличивается с ростом стока; нарушения стратификации; трехмерные	Относительно постоянный, трехмерный

Таким образом, мы ознакомились с одной из генетических классификаций озер. Старейшими озерами на Земле являются тектонические, а именно – рифтовые, сформировавшиеся 25–2 млн лет назад. Таких озер немного и это чрезвычайно глубокие озера, лежащие в континентальных рифтовых зонах. Остальные тектонические озера также в большинстве своем относительно старые – около 100 000 лет, за исключением вулканических озер, многие из которых сформировались в историческое время на памяти человечества. Великие тектонические озера (Великие Африканские озера, Байкал) и тектонически измененные ледниковые озера (Великие Американские озера) хранят большую часть запасов пресной жидкой воды на Земле.

3/4 современных озер – ледникового происхождения и возникли 15–6 тыс. лет назад. Они сконцентрированы в высоких широтах Северного полушария (>40–60° с. ш.). Большая часть равнинных озер низких широт обязаны своим происхождением рекам. Это различные старичные, дельтовые, прибрежные и т. п. озера.

Строительство водохранилищ людьми началось 5–6 тыс. лет назад, но за последние 50–60 лет человечество соорудило более 60 тыс. крупных водохранилищ, в которых сосредоточена 1/6 глобального годового пресноводного стока Земли.

Рассмотренная нами генетическая классификация озер, естественно, не единственная. Так, В. Н. Михайлов и А. Д. Добровольский в 1991 г., отталкиваясь от модифицированной Хатчинсоном классификации Мюррэя, выделяют:

тектонические;	термокарстовые;
вулканические;	суффозионные;
метеоритные;	речные;
ледниковые;	морские;
карстовые;	эоловые;
	органогенные.

Б. В. Тиммс в 1992 г. выделил 6 главных типов озер:

ледниковые;	риверинные или флювиальные
тектонические;	(речного происхождения);
прибрежные;	вулканические;
	прочие.

Многие современные гидробиологи и лимнологи (например, Дж. Калфф) придерживаются этой классификации. В заключение главы приведем распределение озер планеты по данным классам в таблице 11.

Таблица 11

Распределение количества озер планеты и их площади по генетическим классам  
(по Kalff, 2002)

Происхождение	Число озер <sup>1</sup>	% от общего количества	Суммарная площадь водного зеркала	% от общей площади водного зеркала
Ледниковое	3 875 000	74	1 247 000	50
Тектоническое	249 000	5	893 000 <sup>2</sup>	35
Прибрежное	41 000	<1	60 000	2
Речное	531 000	10	218 000	9
Вулканическое	1 000	<<1	3 000	<<1
Прочие	567 000	10	88 000	4
Итого	5 264 000	100	2 509 000	100

## 7. ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ОЗЕР

### 7.1. Сезонные изменения стратификации и роль в годовой динамике гидробиоценозов

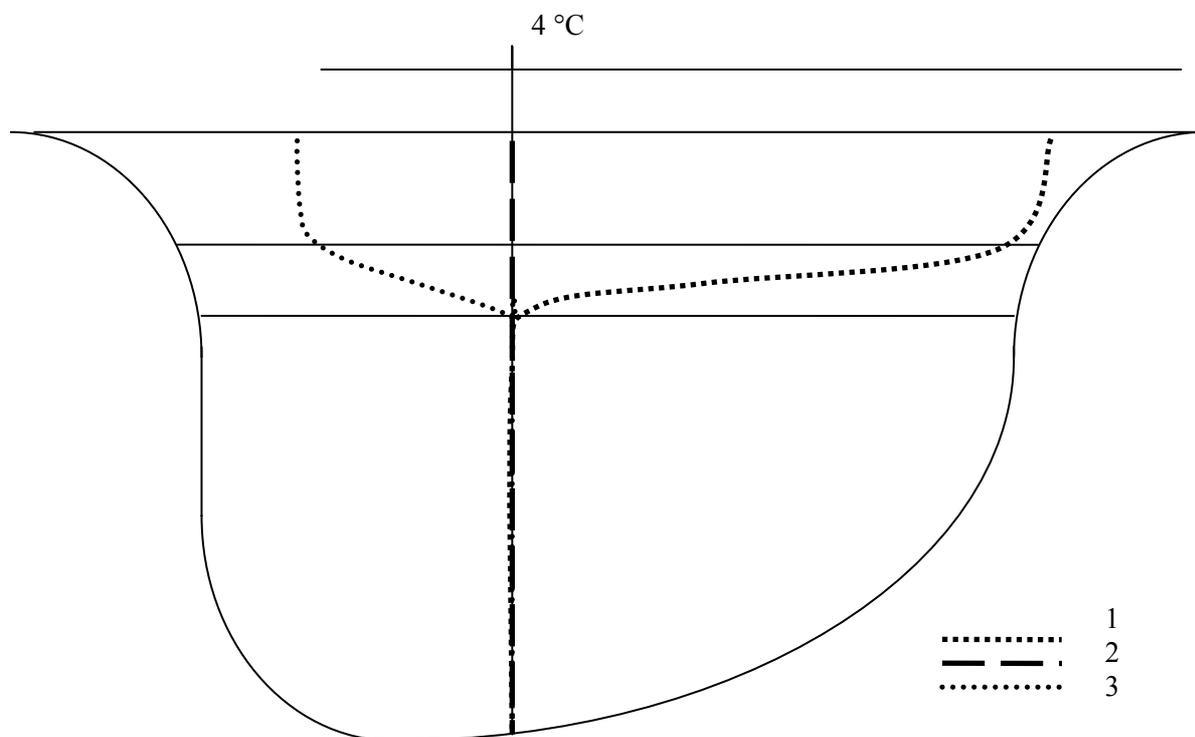
Динамика поведения водных экосистем во многом определяется таким важным свойством водоемов, как *температурная стратификация*<sup>3</sup>. Температурная стратификация может быть *прямой* – температура воды от дна водоема к поверхности увеличивается, или *обратной* – температура воды от дна к поверхности уменьшается. Эти особенности стратификации основаны на одном из аномальных свойств воды – наличии максимума плотности при 4 °С. Именно поэтому и вода, имеющая температуру выше этой, и

<sup>1</sup> Очень приблизительно. Не приняты в расчет большие пруды площадью 0,01–0,1 км<sup>2</sup>, с которыми общая численность водоемов суши составила бы около 8,4·10<sup>6</sup>, из которых бы примерно 85 % пришлось бы на пруды. Общая площадь водного зеркала тогда бы составила примерно 2,8·10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Площадь Каспийского моря (374 000 км<sup>2</sup>) составляет 42 % от величины площади всех тектонических озер.

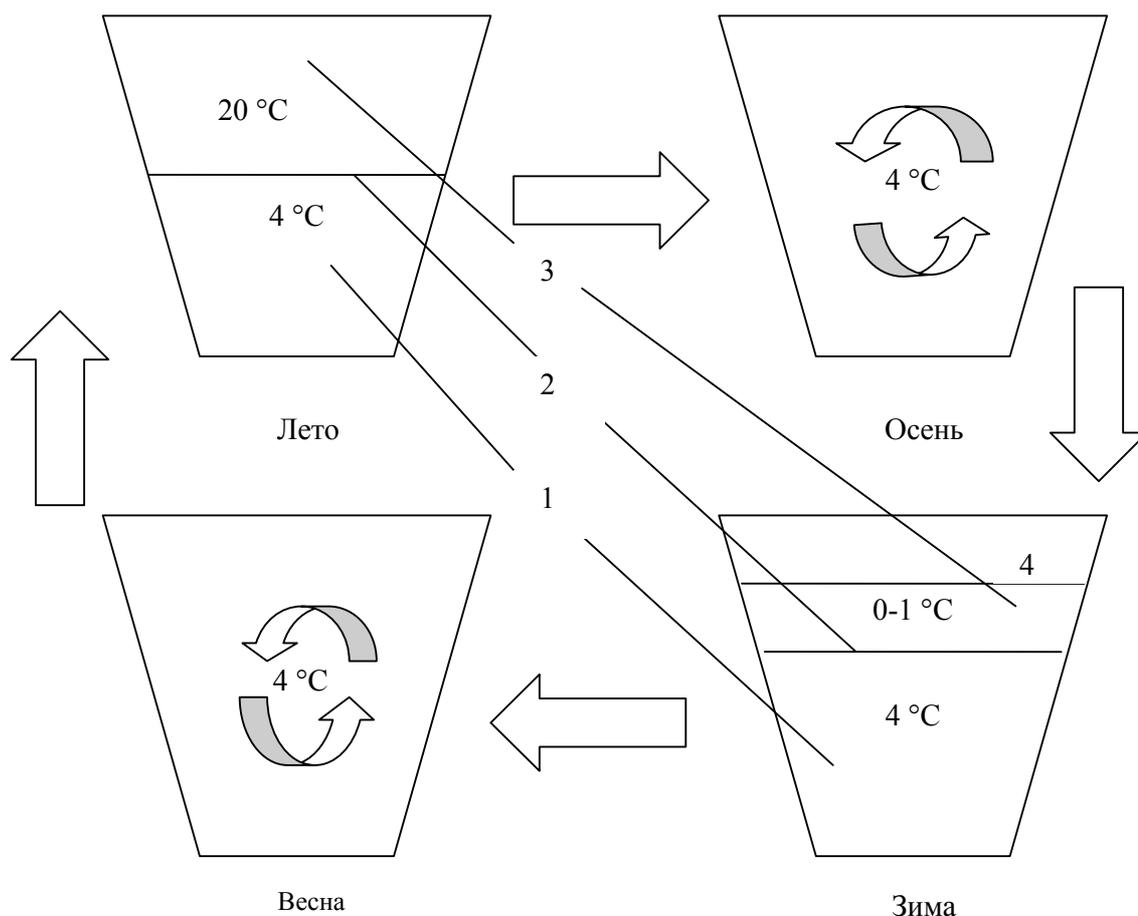
<sup>3</sup> От лат. *strata* – слой.

имеющая температуру ниже, занимает вышележащие слои водного тела, тогда как вода с температурой максимальной плотности – нижние. Когда температура верхних и нижних слоев уравнивается, наступает *гомотермия*, во время которой возможно перемешивание всей массы воды (рис. 26).



**Рис. 26.** Температура на разных глубинах в озере при прямой (1), обратной (2) стратификации и гомотермии (3)

В годовой динамике типичного водоема умеренных широт можно выделить 4 основные фазы (рис. 27): летом – верхние слои воды прогреты, нижние сохраняют температуру около 4 °С. Этот и есть период прямой стратификации, когда верхние слои воды теплее нижних. Осенью – верхний слой воды охлаждается и становится возможным перемешивание всей водной толщи (гомотермия). С наступлением зимы поверхность водоема замерзает, подо льдом находится вода с температурой 0–1 °С, но с плотностью ниже, чем при 4 °С. Наступает явление обратной стратификации. С таянием льда по весне температура в водной толще уравнивается и вновь наступает перемешивание – гомотермия.



**Рис. 27.** Годовой ход стратификации типичного димиктического водоема умеренных широт:

1 – гипolimнион, 2 – металимнион, 3 – эпилимнион, 4 – лед

Необходимо упомянуть несколько терминов, уже знакомых студентам из курса гидрологии. Верхний слой воды озера в период стратификации именуется *эпилимнионом*, нижний – *гиполимнионом*. Разделяющий их слой температурного скачка или *термоклин* – *металимнионом*.

Эпилимнион, как правило, составляет *трофогенный*<sup>1</sup>, или «питающий», слой водоема. Именно в нем происходит продукция органического вещества первичными продуцентами – водорослями или высшими водными растениями, снабжающими всех обитателей водоема пищей. В гиполимнионе (*трофолитическом* слое), напротив, главенствуют процессы разложения органики в ходе метаболизма консументов (животных) и редуцентов (микро-

<sup>1</sup> От греч. *трофос* – пища, питание, *генос* – рождающий.

организмов). В их ходе высвобождаются неорганические элементы питания, необходимые для продукции нового органического вещества.

Металимнион, в силу разницы плотностей меж слоями, предоставляет широкое поле деятельности для бактерий и простейших, так как взвешенное органическое вещество (живые и отмершие организмы планктона), образовавшееся в ходе процессов продуцирования в эпилимнионе, при осаждении задерживается в этом слое и служит пищей многочисленным консументам и редуцентам.

## 7.2. Классификации озер, основанные на стратификации

Хотя генетическая классификация озер и опирается на их происхождение, т. е. в основу ее положен естественный признак, она далеко не всегда удачна. Конечно, многие озера схожие по происхождению, сходны и по своим другим показателям. Так, рифтовые озера очень близки по морфометрическим параметрам, хотя и отличаются по биологическим. То же можно сказать и о многих озерах, образовавшихся в грабенах и других. С другой стороны, многие озера одного происхождения могут сильно отличаться и по морфометрии. Например, многие кратерные и фьордовые озера, будучи близки по форме, различаются по абсолютным размерам (площадь зеркала, объем, глубина) в десятки и сотни раз. Ледниковые озера, даже если взять только троговые – отличаются и по форме и по размерам. То же можно сказать о плотинных и других типах озер.

Выше мы видели, что процессы перемешивания вод в течение года, следовательно, и биологические процессы определяются годовым ходом стратификации. Поскольку сама стратификация основана на том, что температуры у дна и поверхности различны, то кажется естественным использовать этот признак для классификации озер.

Первую классификацию такого рода предложил Дж. Уиппл в 1898 г. По температуре поверхностного слоя ( $t_s$ ) и температуре максимальной плотности воды ( $t_d$ ) он разделил все озера на:

- полярные, у которых температура поверхности ниже температуры максимальной плотности в течение всего года;
- озера умеренного пояса, у которых температура поверхностного слоя в течение года бывает и ниже и выше температуры максимальной плотности;
- тропические озера, температура поверхностного слоя которых всегда выше температуры максимальной плотности.

Порадовавшись полученному результату, Дж. Уиппл решил пойти дальше и подразделил полученные классы озер на подклассы по температуре придонного слоя ( $t_b$ ). Он выделил:

- озера с постоянной температурой придонного слоя, равной температуре максимальной плотности;
- озера, у которых температура придонного слоя изменяется в течение года;
- озера, с температурой придонного слоя равной температуре поверхностного слоя.

Получилась классификация, схематично представленная ниже.

Классификация озер по температуре поверхностного слоя Дж. Уиппла  
 ( $t_d$  – температура максимальной плотности,  
 $t_s$  – температура поверхностного слоя,  
 $t_b$  – температура придонного слоя воды)

	$t_s < t_d$	$t_d > t_s > t_d$	$t_s > t_d$
$t_b = t_d$ $t_b$ варьирует $t_b = t_s$			

Такая теоретическая работа не могла пройти мимо внимания Ф. Фореля, который, как основатель лимнологии и гидробиологии, полагал, что теории должны выходить, все же, из под его пера. В 1904 г. Ф. Форель предлагает свою, основанную на температуре придонного слоя, а не поверхностного, как у Дж. Уиппла, классификацию. Он делит озера на:

- полярные, у которых температура придонного слоя никогда не превышает температуру максимальной плотности;
- умеренных широт, температура придонного слоя которых может быть выше, ниже или равна температуре максимальной плотности;

- тропические, температура придонного слоя равна или больше температуры максимальной плотности.

Сочтя такое деление недостаточным, Ф. Форель добавляет подразделение озер на:

- мелководные, температура придонного слоя которых может варьировать, и
- глубоководные, температура придонного слоя в которых постоянна круглый год.

Получилась следующая схема.

Классификация озер по температуре придонного слоя Ф. Фореля

( $t_d$  – температура максимальной плотности,  
 $t_s$  – температура поверхностного слоя,  
 $t_b$  – температура придонного слоя воды)

	$t_b \leq t_d$	$t_d \geq t_b \geq t_d$	$t_b \geq t_d$
$t_b$ варьирует $t_b$ постоянна			

После того, как свое слово сказал живой классик, попытки создания новых классификаций долгое время не возобновлялись. Было лишь уточнение этой классификации Иосимурой в 1936 г. Он выделил следующие группы озер:

- тропические – температура поверхностного слоя от 20 °С до 30 °С, в течение года температура почти не меняется, вертикальный температурный градиент мал, циркуляция нерегулярна;
- субтропические – температура поверхностного слоя не бывает ниже 4 °С, температура в течение года меняется в широких пределах, вертикальный температурный градиент хорошо выражен, в зимнее время отмечается циркуляция;
- умеренные – температура поверхностного слоя летом выше, зимой ниже 4 °С, годовой ход температуры выражен хорошо, весной и осенью отмечается циркуляция;
- субполярные – температура поверхностного слоя выше 4 °С отмечается летом, термоклин слабо выражен, циркуляция дважды в год, но может происходить и чаще во время похолоданий летом;

- полярные – температура поверхностного слоя всегда ниже 4 °С, циркуляция раз в год – летом.

Но появился новый классик – Дж. Хатчинсон. Он во главу угла поставил не температуру того или иного слоя, а гомотермию, т. е. перемешивание водных масс, принципиально важное для перераспределения питательных веществ в толще воды и, следовательно, для всего функционирования водной экосистемы. Среди озер Дж. Хатчинсон в 1957 г. выделил следующие классы:

- Амимиктические озера. Полярные арктические и антарктические озера. Круглый год покрыты льдом, постоянная обратная стратификация. Перемешивание отсутствует.
- Холодные мономиктические озера. Приполярные озера. Большую часть года покрыты льдом. Летом лед сходит и наступает гомотермия.
- Димиктические. Типичные водоемы умеренной полосы. Весенняя гомотермия с перемешиванием водной массы, летняя прямая стратификация, осенняя гомотермия, второе перемешивание вод за год, зимняя обратная стратификация.
- Теплые мономиктические. Субтропические озера. Весной, летом и осенью – прямая стратификация. Зимой наступает гомотермия и перемешивание водных масс.
- Олигомиктические. Тропические, экваториальные и субэкваториальные озера. Круглый год – прямая стратификация. При редких охлаждениях поверхностного слоя происходит перемешивание.

Ф. Раттнер добавил к этой классификации в 1963 г. еще два класса:

- Холодные полимиктические. Субарктические, субантарктические, а также высокогорные озера. Температура воды круглый год близка к 4 °С и происходит почти постоянное перемешивание.
- Теплые полимиктические. Относительно мелководные тропические озера, часто перемешиваемые при температурах выше 4 °С за счет ветров.

Надо отметить, что классификация усложнялась и дальше (например, новые классы озер ввел В. Льюис в 1983 г.), но для нашего курса вполне достаточно ставшей классической классификации, представленной в таблице 12.

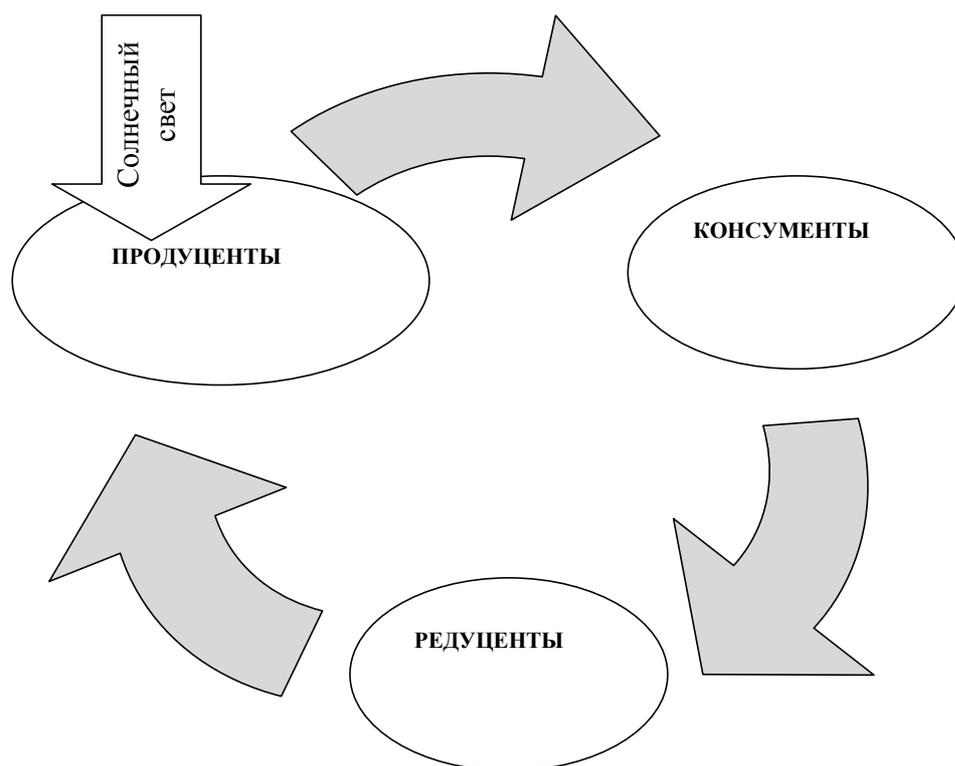
Схема классификации водоемов по Дж. Хатчинсону

Тип водоема	Широта (при расположении озера на уровне моря)	Весна	Лето	Осень	Зима
Амиктический	80–90°	Обратная стратификация	Обратная стратификация	Обратная стратификация	Обратная стратификация
Холодный мономиктический	70–80°	Обратная стратификация	Гомотермия, перемешивание	Обратная стратификация	Обратная стратификация
Димиктический	40–60°	Гомотермия, перемешивание	Прямая стратификация	Гомотермия, перемешивание	Обратная стратификация
Теплый мономиктический	20–40°	Прямая стратификация	Прямая стратификация	Прямая стратификация	Гомотермия, перемешивание
Олигомиктический	0–20°	Прямая стратификация, возможны гомотермия, перемешивание			

## 8 ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

### 8.1. Компоненты водных экосистем

Компоненты водных экосистем функционально не отличаются от главных компонентов наземных экосистем. В биологическом сообществе естественно присутствуют три главные группы организмов – продуценты, консументы и редуценты (рис. 28). Первые – продуценты (фитопланктон и фитобентос) ассимилируют энергию Солнца и создают органическое вещество, служащее источником жизни для них и остальных компонентов экосистемы. Консументы (зоопланктон, зообентос, нектон) это вещество преобразуют в свои тела. Редуценты (бактериопланктон и бактериальное население дна водоема) выполняют важнейшую часть работы – минерализацию экскретов и трупов консументов и продуцентов и переводение их в неорганическую форму с тем, чтобы сделать их доступными продуцентам для повторения цикла.



**Рис. 28.** Упрощенная схема экосистемы

## **8.2. Особенности водных сообществ по сравнению с наземными**

Сообщества водных организмов по своим условиям обитания и структурно-функциональным характеристикам имеют ряд ключевых особенностей по сравнению с наземными биогеоценозами, которые в основном заключаются в следующем:

Гидробионты, окруженные водой, подвергаются значительно меньшим колебаниям температуры (обычно в пределах от 2 до 40°), чем обитатели наземных биогеоценозов. Однако для них имеет большое значение содержание кислорода, который часто бывает в дефиците, а временами может вовсе исчезать. В связи с этим, существующие классификации экосистем учитывают, в первую очередь, содержание кислорода в водоеме.

Водные организмы находятся в условиях более слабой освещенности, чем наземные, а расположенные на глубинах водоемов (и в подземных водах) совершенно лишены света, и их живые компоненты могут существовать только за счет поступления органических веществ извне. Поэтому в системе гидробиоценозов гораздо сильнее выражена вертикальная дифференциация (стратификация). В связи с вертикальной расчлененностью водной

среды типы водных сообществ выделяются по совершенно иному принципу, чем типы биогеоценозов. Последние в большинстве случаев, как указывает В. Н. Сукачев, совпадают с границами растительных ассоциаций на поверхности земли, в то время как типы гидробиоценозов различаются главным образом по их положению в пространстве. Это уже описанные нами планктон, нектон, бентос, перифитон.

Организмы в водоемах биохимически и осмотически более тесно связаны с окружающей их средой и зависят от содержания в ней растворимых веществ. Благодаря значительно большей, чем у воздуха, плотности воды, многие водные организмы пребывают в свободно плавающем или парящем состоянии, поскольку вода содержит пространственно-распределенный источник пищи в виде взвешенной массы органических веществ и микробов. Вода одновременно создает возможность биохимических связей между сообществами гидробионтов за счет выделения многими организмами в воду кислорода, углекислоты и различных продуктов метаболизма. Эти вещества, токсичные, либо, наоборот, стимулирующие другие организмы, образуют как бы сеть, по которой организмы общаются косвенно, не вступая друг с другом в прямой контакт.

Население гидросферы значительно разнообразнее, чем наземное, хотя во внутренних водоемах состав флоры и фауны сильно обеднен по сравнению с морями из-за выпадения многих групп. Основную массу первичных продуцентов составляют взвешенные в воде микроскопические водоросли, в то время как на суше – это почти исключительно крупные растения, с корнями в почве. Несмотря на чрезвычайно мелкие размеры планктонных водорослей, они обладают весьма высоким темпом размножения и могут давать очень высокую первичную продукцию, за счет которой развивается местами богатейшее животное население.

В горизонтальном направлении водные сообщества, как и биогеоценозы, также неоднородны. Биотопы определяются преимущественно физическими свойствами среды и группируются по экологическим зонам, на которые делятся водоемы: например, в озерах бенталь подразделяется на литораль (прибрежная зона), сублитораль (до нижней границы распространения высших растений), профундаль. Внутри каждой зоны может быть выделено по

несколько биотопов и соответствующих им биоценозов (например, на разных грунтах).

Гидробиоценозы, как и наземные экосистемы (в первую очередь, фитоценозы), обладают хорошо выраженной изменчивостью во времени. Сезонная (годовая, суточная или иная циклическая) динамика, вызванная изменениями температуры, наблюдается как в ценозах высшей водной растительности, отмирающей с наступлением осени, так и в планктонных сообществах, состоящих из видов с кратким жизненным циклом. В меньшей мере выражены сезонные изменения в бентосе, остающемся в крупных водоемах на зиму в почти полном составе и количестве, хотя в некоторые периоды его гетеротопные группы (насекомые) покидают водоем.

Межгодовые (или многолетние) изменения в водоемах выражены не менее, если не более ярко, чем в биогеоценозах, и, в основном, происходят в результате тех же причин: изменения климатических условий и деятельности человека. В гидробиоценозах постоянно происходят также изменения в соотношении видов и их обилии, причины которых часто не удается установить. Эти ненаправленные изменения колебательного типа называют флуктуациями, противопоставляя их сукцессиям – изменениям в течение ряда лет, направленным в одну сторону. Сукцессии часто наблюдаются в гидробиоценозах и представляют собой обычно продолжающийся в течение ряда лет процесс постепенного приспособления сообществ гидробионтов к сильно изменившимся абиотическим условиям. Мы наблюдаем их при различных естественных изменениях режима водоемов, а в еще большем масштабе – при возникновении новых водоемов или водохранилищ (на затопляемой, например вследствие сооружения плотины, долине реки).

Основные процессы жизнедеятельности гидробионтов те же, что и у любых других организмов. Это – питание, которое может быть автотрофным или гетеротрофным, а при совмещении этих типов – миксотрофным. Эти вопросы достаточно полно освещены в общих курсах биологии, а понятия рациона, ассимиляции пищи, трат на основной обмен и размножение прекрасно описаны в сводке Ю. Одума (1986).

### III. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

#### 9. ПРОДУКЦИЯ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Вообще, продукционные процессы достаточно глубоко изучаются в курсе экологии, поэтому здесь мы вкратце напомним некоторые понятия.

*Первичная продукция* – новообразование органического вещества из неорганического. Она создается в процессе фотосинтеза и, в значительно меньшей степени, хемосинтеза. В ходе фотосинтеза энергия Солнца улавливается фотосинтетическими пигментами (главным образом хлорофиллом) и связывается в энергию химических связей органических веществ. Говоря о первичной продукции, нужно выделять валовую первичную продукцию и чистую первичную продукцию.

*Валовая первичная продукция* – общая скорость фотосинтеза, все создание органического вещества, в том числе и того, которое используется самими растениями на поддержание их существования (на обмен, на дыхание).

*Чистая первичная продукция* – или эффективная первичная продукция представляет собой скорость создания органического вещества за вычетом доли, используемой самими же организмами на процессы жизнедеятельности. Эту часть первичной продукции называют еще *ассимиляцией*.

Чистая продукция сообщества или *продуктивность сообщества* – скорость накопления органического вещества сообществом после выедания этого вещества консументами. Прирост массы консументов называют *вторичной продукцией*, но ее источник – первичная продукция.

Вопросы определения первичной и вторичной продукции, продуктивности гидробиоценозов достаточно полно описаны в отечественной и переводной литературе, поэтому можно порекомендовать студентам обратиться к таким источникам, как Ю. Одум (1986), А. Ф. Алимов (1989), Мониторинг фитопланктона (1992), Оценка продуктивности фитопланктона (1993) и мн. др.

## 10. СПЕЦИФИКА ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЦИКЛИЧЕСКОГО, ТРАНЗИТНОГО И КАСКАДНОГО ТИПОВ

Лотические и лентические водные экосистемы принципиально отличаются по характеру происходящих в них экологических процессов. Водоемы замедленного водообмена (лентические: озера, пруды и т. п.) являются, как правило, водоемами автотонными. Это значит, в переводе с греческого, – экосистемами, способными «прокормить» себя самостоятельно. Большая часть первичной продукции в этих водоемах производится их собственным растительным населением – фитопланктоном и фитобентосом (продуцентами). Затем эта первичная продукция используется зоопланктоном, зообентосом, nekтоном (консументами) и, минерализуясь редуцентами, возвращается в виде исходного материала продуцентам. В общем виде это можно представить в следующем виде (рис. 29).

В типичном большом озере основной поток энергии и круговорот вещества совершается в планктонном сообществе экосистемы пелагиали (рис. 30).

В водотоке, или системе транзитного типа (лотической системе: реке, ручье), планктон не может играть решающую роль просто в силу физических причин – его сносит течением. В глубоких, медленно текущих реках в роли главного продуцента выступает фитобентос – высшая водная растительность. Основными потребителями их продукции выступают зообентос и nekтон (рис. 31).

Если мы обратимся к мелким быстротекущим водотокам (ручьям и мелководным рекам), то обнаружим, что основное питание их обитатели получают снаружи (аллохтонные экосистемы). Органическое вещество поступает с берегов, в виде опада листьев, трупов животных и т. п. (рис. 32).

В водных экосистемах каскадного типа (системы водохранилищ, группы сообщающихся меж собой проточного типа озер, глубокие водотоки), совмещающих лотические и лентические участки, системы круговорота вещества чередуются. На быстротекущих участках они осуществляются по лотическому типу (с преобладанием транзитного типа аллохтонного питания системы),

в заводях и участках с медленным течением – по лентическому типу (автохтонные участки).

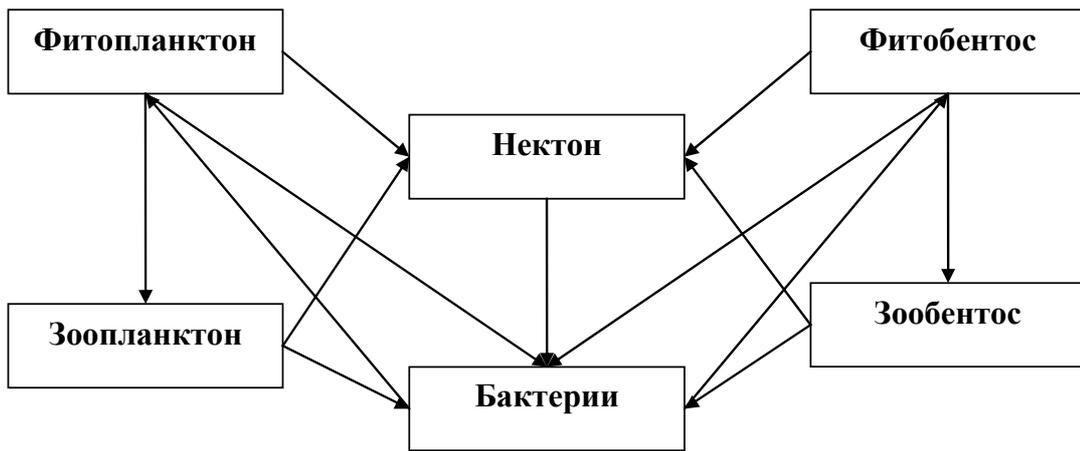


Рис. 29. Кругооборот веществ в идеализированной экосистеме водоема

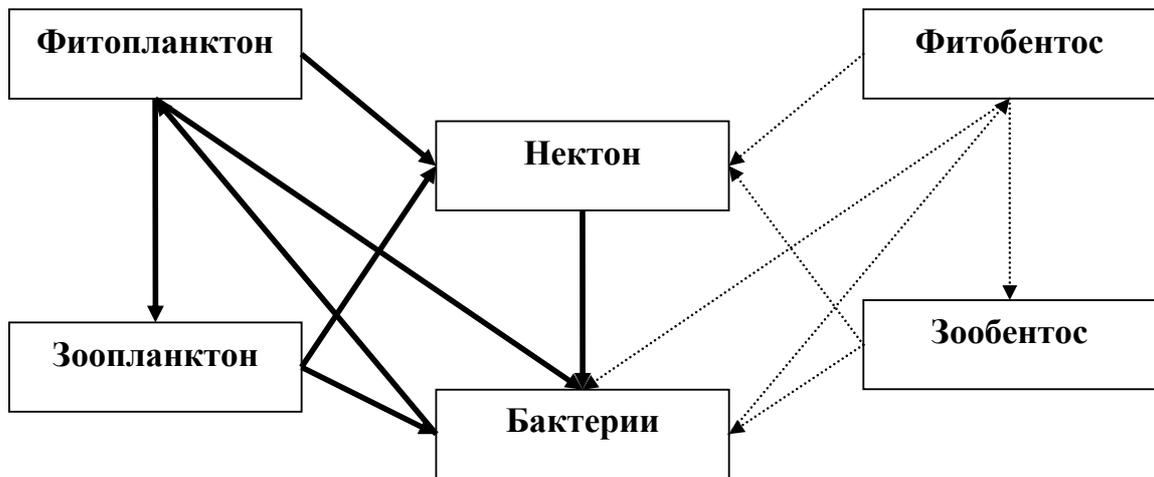


Рис. 30. Кругооборот веществ в идеализированной экосистеме гидробиоценоза циклического типа (лентического). Жирные стрелки – основные потоки вещества, тонкие – второстепенные

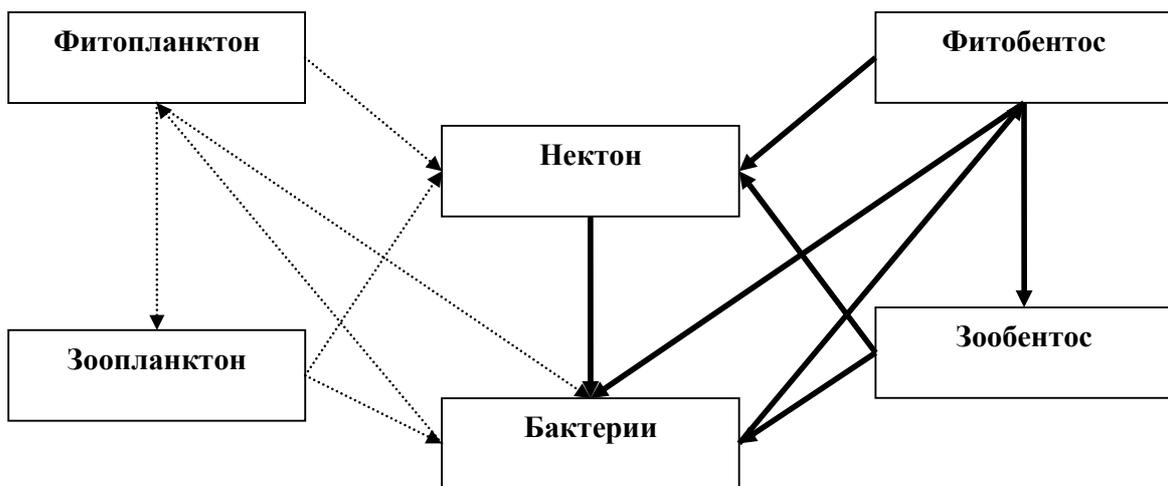
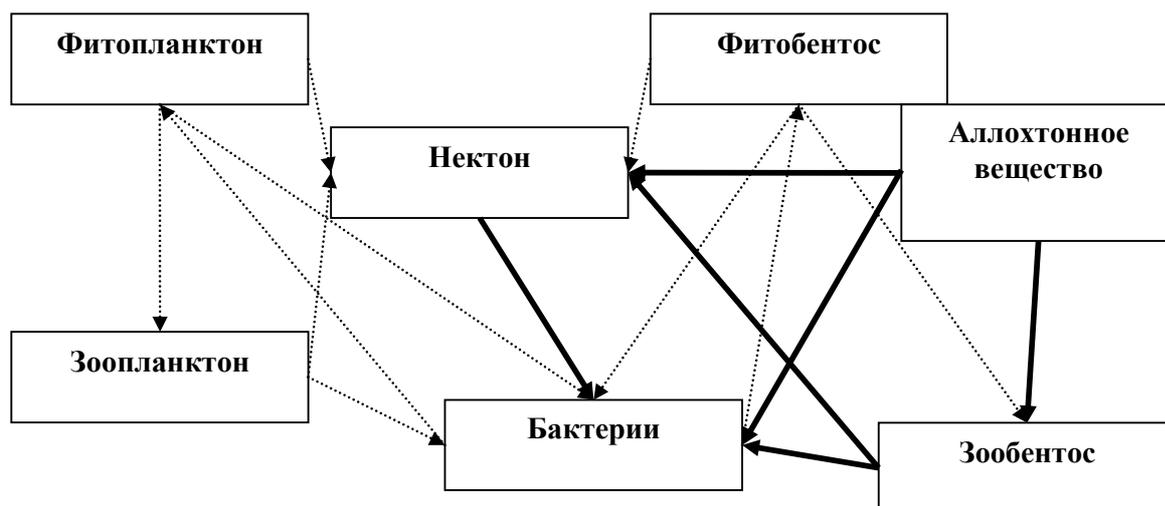


Рис. 31. Кругооборот вещества в идеализированной экосистеме гидробиоценоза транзитного типа (лотического)



**Рис. 32.** Кругооборот вещества в идеализированной аллохтонной экосистеме гидробиоценоза транзитного типа (лотического)

## 11. ПРИМЕР СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ВОДНОГО СООБЩЕСТВА\*

Рассмотрим сезонную динамику планктонного сообщества на примере димиктического оз. Байкал. Рассматривать будем события, происходящие в верхнем трофогенном слое 0–50 м, где в течение большей части года создается основная часть первичной продукции за счет фотосинтеза и концентрируется основная масса зоопланктона (Кожов, 1972). В качестве примера возьмем 1999 г., подробно описанный А. В. Мокрым (2006).

Схема биологических сезонов на оз. Байкал принята по М. М. Кожову (1962). Это не общепринятые зима, весна, лето, осень, а 6 сезонов, отличающиеся по средней температуре верхнего слоя воды (табл. 13). Ход температуры воды приведен на рис. 33.

На рис. 34 представлен ход общих биомасс фитопланктона и зоопланктона. Отчетливо прослеживается, что пики биомассы зоопланктона следуют за пиками биомассы фитопланктона, что вполне естественно, поскольку первый питается последним. К пикам биомассы зоопланктона, соответственно, приурочены минимумы фитопланктона и наоборот.

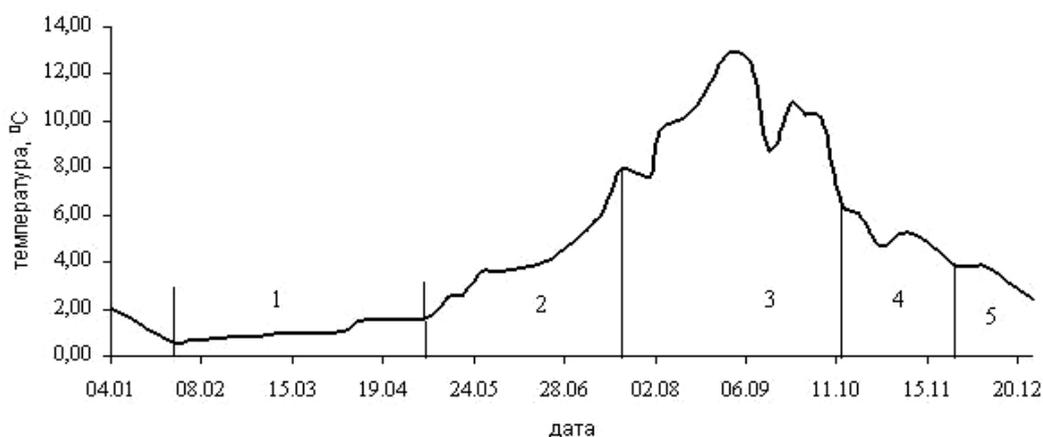
---

\* Глава написана в соавторстве с А. В. Мокрым.

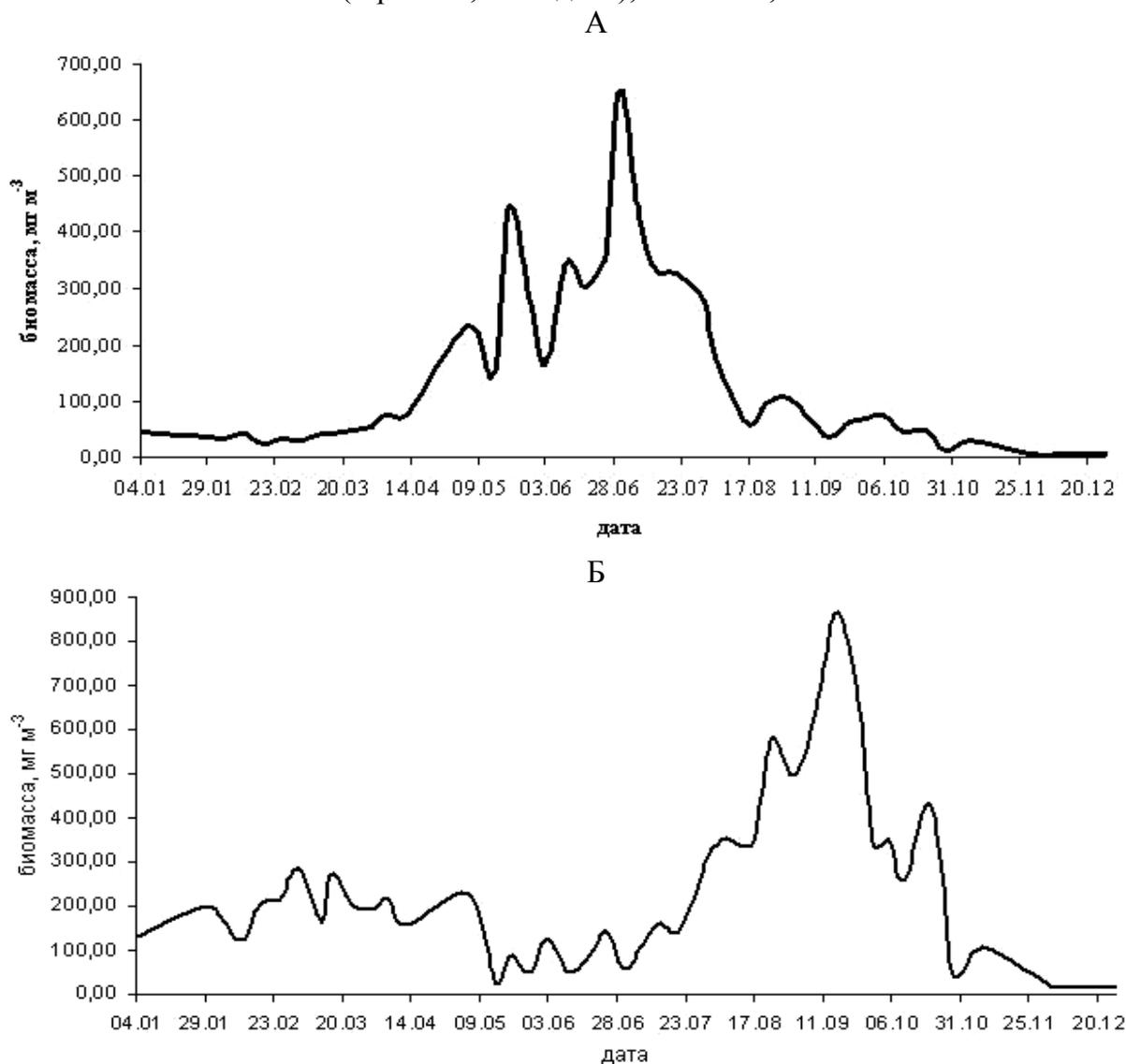
Таблица 13

## Биологические сезоны в открытых водах оз. Байкал

Показатель	Весна		Лето		Осень	Зима
	Ранневесенний (подледный) период	Поздневесенний (переходный) период	Раннее, июль – 1-я декада августа	Позднее, август– сентябрь	Октябрь–ноябрь	Декабрь–январь
	Февраль, март, апрель	Май, июнь				
Температура воды (в °С)						
средняя 0 м	0,7	2,5	10,0	12,5	6,3	2,0
за сезон 20 м	0,8	2,8	7,0	9,0	5,8	2,2
макси- 0 м	1,5	4,0	15,0	15,0	9,0	3,6
мальная 20 м	1,0	3,6	10,0	10,0	8,0	3,6
Фитопланктон	Массовая вегетация диатомей и перидиней; годовой максимум биомассы в глубоководных районах	Начало отмирания весенних форм и их погружение. Биомасса высокая; к концу периода уменьшение	Массовое отмирание весенних форм. Появление летних форм	Массовое развитие летних форм на мелководьях	В некоторые годы осенняя вспышка размножения диатомей, но общая биомасса резко уменьшается	Бедный; годовой минимум биомассы
Зоопланктон	Массовое появление молодежи эпишуры зимне-весенней генерации. Размножение макрогектопуса	Период роста зимне-весенней генерации эпишуры. К концу периода – начало новой вспышки размножения. Биомасса увеличивается	Массовое появление молодежи летней генерации эпишуры. Появление летних форм. Годовой максимум биомассы	Период роста летней генерации эпишуры. В начале периода – годовой максимум биомассы. К концу периода – понижение биомассы	Понижение биомассы. Погружение вглубь половозрелых эпишур	Бедный; годовой минимум биомассы
Вертикальное распределение зоопланктона	Наибольшая концентрация в верхних слоях (0–50 м)	Рассеивание в толще вод до глубины 200–300 м, с преобладанием в верхних слоях	Наибольшая концентрация в верхних слоях (0–50 м, особенно 0–25 м)	Наибольшая концентрация в верхних слоях (0–50 м, особенно 0–25 м)	Рассеивание в толще вод, опускание в глубокие слои	Большая часть в глубоких слоях. К концу периода – подъем



**Рис. 33.** Годовой ход температуры воды в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1999 г. Биологические сезоны: 1 – ранняя весна (подледный период), 2 – поздняя весна (переходный период), 3 – лето (и раннее, и позднее), 4 – осень, 5 – зима



**Рис. 34.** Динамика биомассы фитопланктона (А) и зоопланктона (Б) в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1999 г.

Рассмотрим теперь эти процессы подробнее.

Максимум биомассы фитопланктона, созданный за счет вегетации представителей диатомовых водорослей рода *Cyclotella* – *C. minuta*, *C. baicalensis* и *C. baicalensis* f. *ornata*, пришелся на конец июня и составил  $650,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Вегетация динофитовых водорослей происходила в середине июня – второй декаде июля с максимумом биомассы, равным  $30,9 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , золотистых – в конце августа – начале сентября с максимумом биомассы в  $33,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . В осенне-зимний период произошло резкое снижение биомассы. Годовой минимум биомассы фитопланктона был отмечен в начале декабря и составил  $4,3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  (табл. 14, рис. 35).

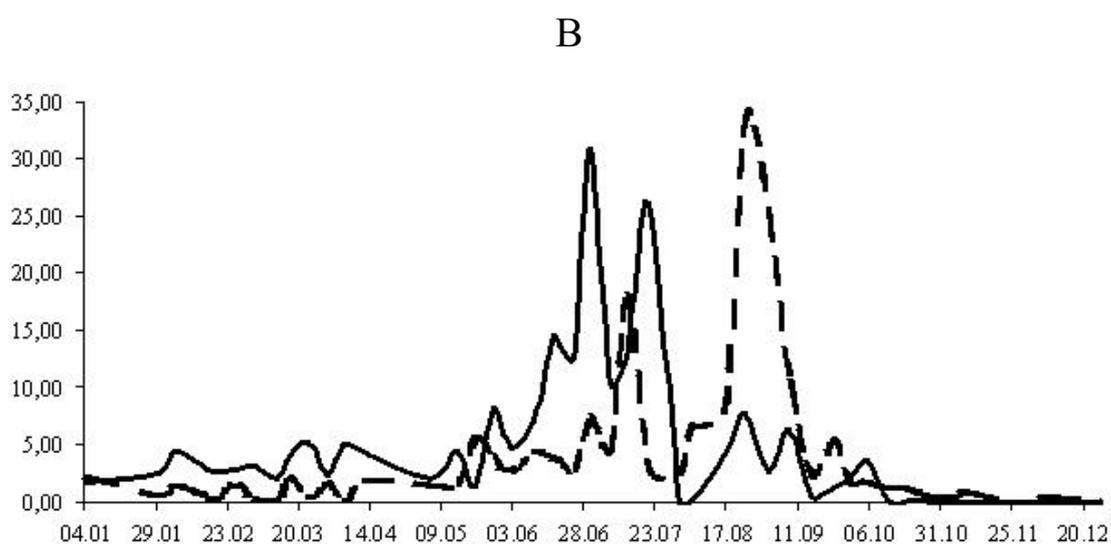
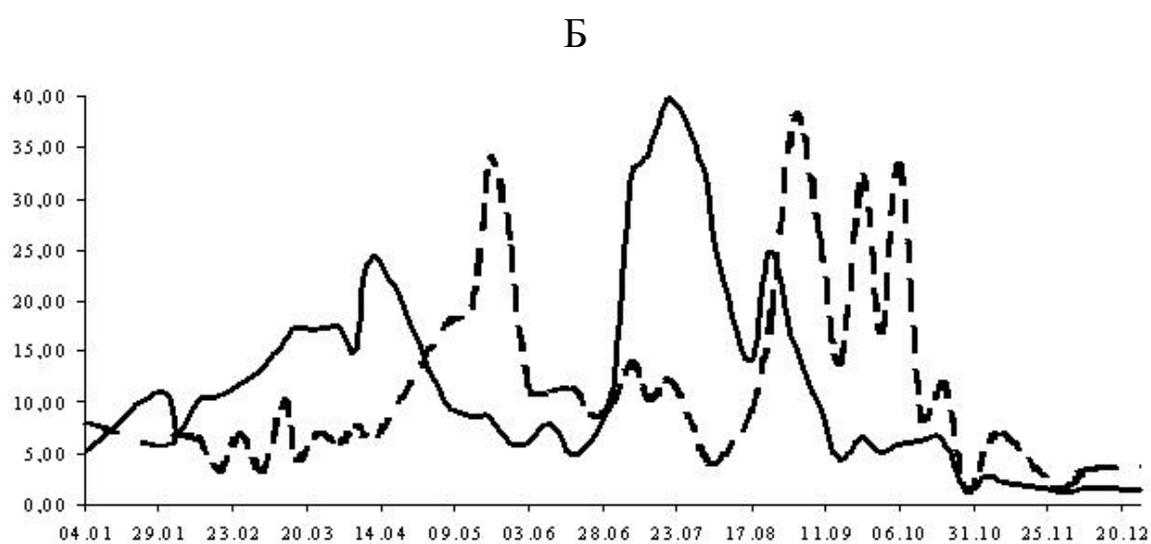
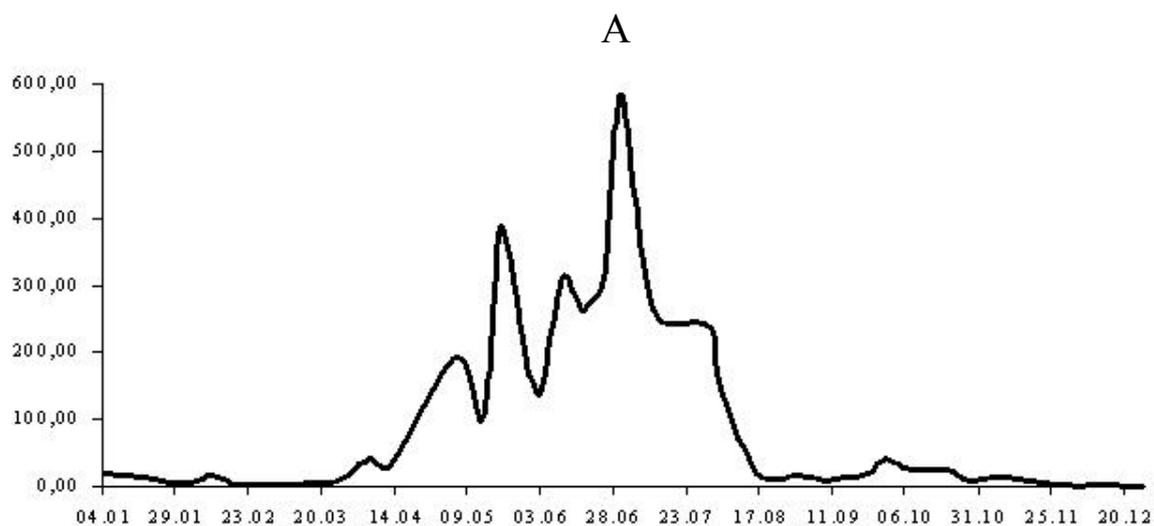
Таблица 14

Сезонная динамика биомассы фитопланктона в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1999 г.

СЕЗОН	СРЕДНЕВЗВЕШЕННАЯ БИОМАССА (средняя за сезон), $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$						
	весь фитопланктон	диатомовые	золотистые	динофитовые	криптофитовые	пикопланктон	доминирующий комплекс
Ранняя весна	44,7	12,7	1,0	3,5	10,2	16,6	33,1
Поздняя весна	334,0	284,8	5,1	9,9	19,1	14,5	312,0
Лето	123,9	72,2	9,0	4,9	19,7	17,7	106,9
Осень	31,2	17,8	0,9	–	8,6	3,9	28,5
Зима	7,1	1,9	–	–	3,6	1,4	6,0

Рассмотрим теперь динамику зоопланктона. В 1999 г. присутствовало 15 видов зоопланктона. Это представители отрядов *Copepoda* (2 вида: *Epischura baicalensis* и *Cyclops kolensis*) и *Cladocera* (2 вида: *Bosmina longirostris* и *Daphnia longispina*), класса *Rotatoria* – 11 видов.

Биологической весной эпишура составляла практически всю биомассу зоопланктона – более 99 % (табл. 17). Первый (весенний) максимум биомассы зоопланктона, равный  $283,7 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , пришелся на начало марта и был обусловлен исключительно развитием эпишуры зимне-весенней генерации.



**Рис. 35.** Динамика биомасс групп фитопланктона в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1999 г.

По оси абсцисс – даты, по оси ординат – биомасса,  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . А: Диатомовые; Б: — — синезеленые, ---- криптофитовые; В: — — динофитовые, ---- золотистые

Биологическим летом в связи с прогревом водной толщи совместно с ростом летней генерации эпишуры произошло бурное развитие летних форм: циклопов, кладоцер, некоторых видов коловраток. Годовой максимум биомассы, отмеченный в середине сентября, составил  $866,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  (рис. 36). Доля же эпишуры в биомассе значительно снизилась и составляла в среднем за сезон около 50 % (табл. 15).

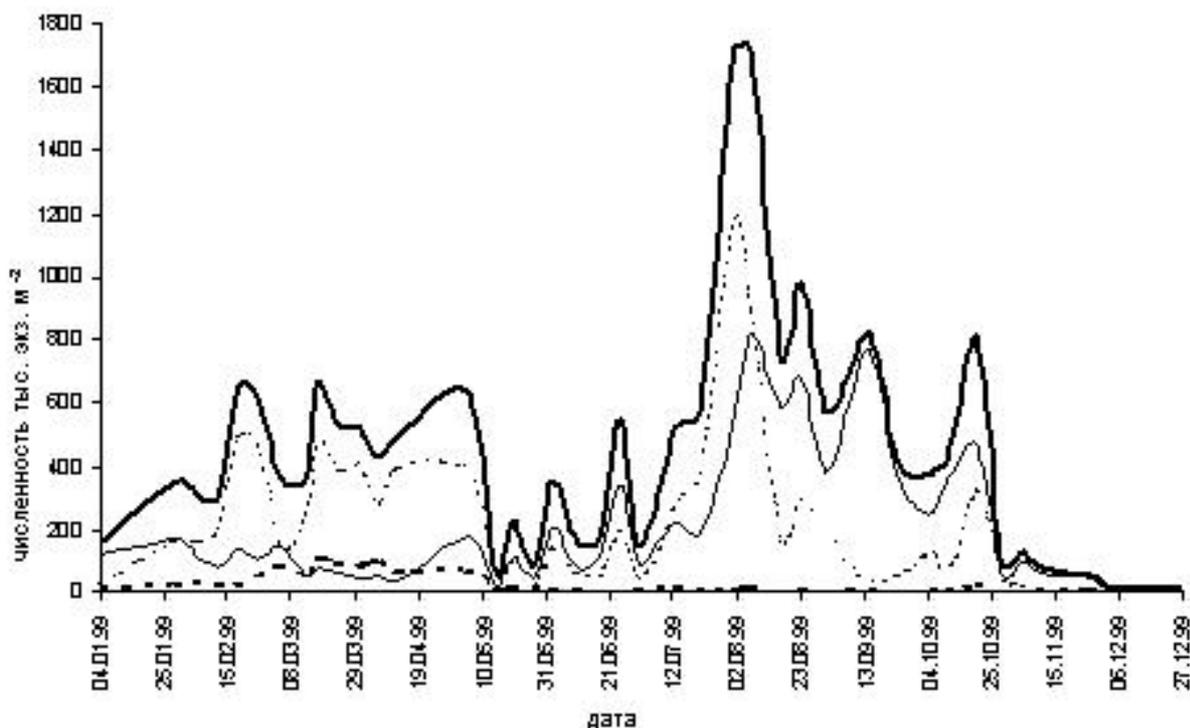
Таблица 15

Сезонная динамика биомассы зоопланктона в слое 0–50 м  
на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1999 г.

Сезон	Биомасса (средняя за сезон), $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$				
	Весь зоопл.	<i>Copepoda</i>	<i>Cladocera</i>	<i>Rotatoria</i>	<i>Epischura</i>
Ранняя весна	199,8	199,8	–	–	199,7
Поздняя весна	101,8	101,7	–	–	101,7
Лето	466,3	306,5	142,0	17,8	227,1
Осень	185,3	154,0	28,2	3,1	144,2
Зима	20,9	20,6	–	–	17,9

Осенью и зимой произошло снижение биомассы за счет отмирания летних форм и опускания в глубинные слои (ниже рассматриваемого трофогенного) эпишуры. В первой декаде декабря наблюдался годовой минимум биомассы, составивший  $12,8 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  (см. рис. 36). Доля эпишуры в биомассе в эти сезоны повышалась, колеблясь зимой в пределах 70–96 %.

Рассматривая динамику внутри систематических групп, можно отметить следующее. Из *Copepoda* эпишура развивается в Байкале круглый год. В 1999 г. ранней весной (конец января – начало мая) науплиусы зимне-весенней генерации составили в среднем за сезон 65,5 % от суммарной численности *E. baicalensis* в верхнем 50-метровом слое воды. Во второй половине февраля и середине марта наблюдались два практически равновеликих максимума численности науплиусов зимне-весенней генерации (493 тыс. и 480 тыс. экз. $\cdot\text{м}^{-2}$  соответственно). С начала мая по конец июня, по мере роста науплиусов, количество копеподитов увеличивается, половозрелые же особи опускаются в более глубокие слои (ниже



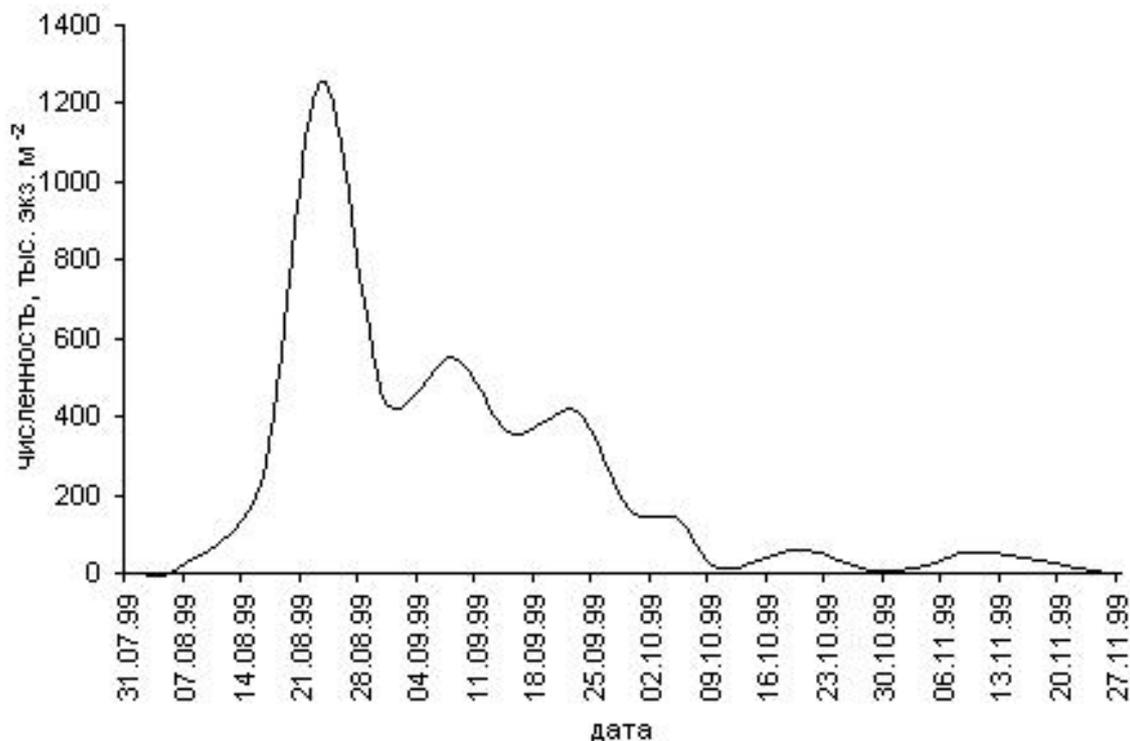
**Рис. 36.** Динамика численности *Epischura baicalensis* в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1999 г.

— — — — — общая численность *Epischura baicalensis*, - - - - - численность половозрелых особей, — — — — — численность копеподитов (стадии 1–5), - - - - - численность науплиусов

рассматриваемого трофогенного), где они рожают молодь новой летней генерации.

Годовой максимум численности эпишуры и максимум численности науплиусов летней генерации пришлись на конец июля – начало августа и составили соответственно 1721 тыс. и 1180 тыс. экз.·м<sup>-2</sup>. Осенью и зимой (конец октября – начало января) в связи с наступлением осенней гомотермии происходит рассеивание эпишуры в толще вод и опускание рачков старших копеподитных стадий вглубь (ниже трофогенного слоя), где половозрелые особи дадут начало молоди зимне-весенней генерации.

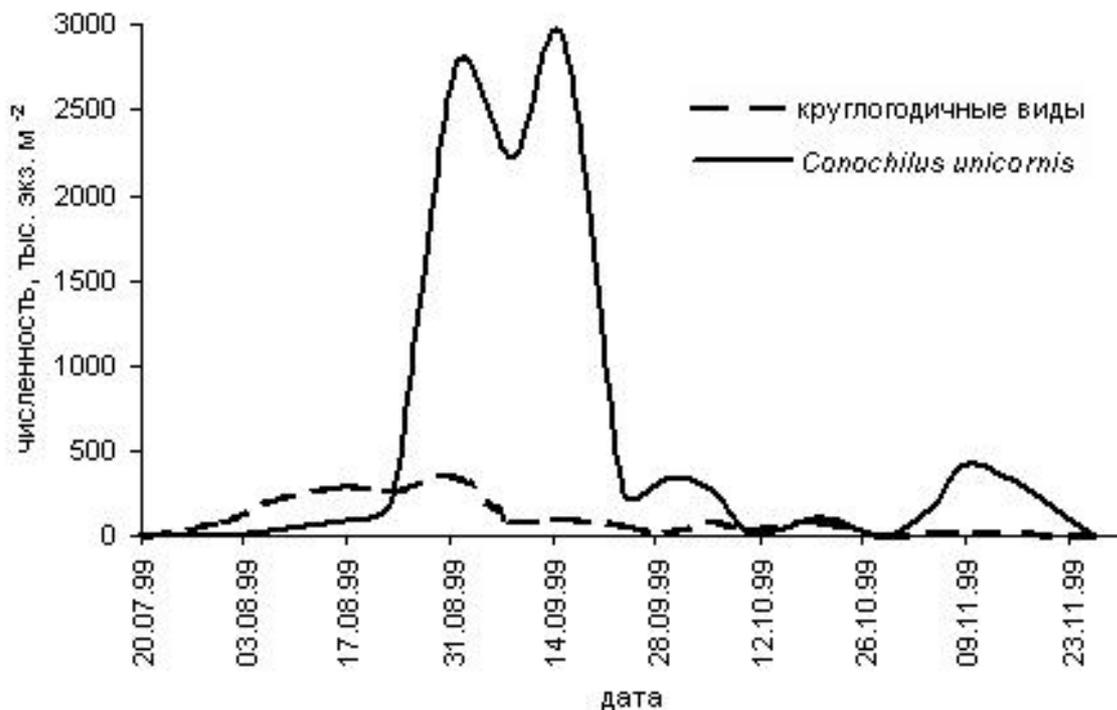
Зимой и весной 1999 г. численность *Cyclops kolensis* в верхнем 50-метровом слое была незначительна, развитие вида происходило летом. Максимум численности и биомассы наблюдался в начале второй декады августа и составил соответственно 1256 тыс. экз.·м<sup>-2</sup> и 15,0 г·м<sup>-2</sup> (рис. 37).



**Рис. 37.** Динамика численности *Cyclops kolensis* в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), лето-осень 1999 г.

Кладоцеры развивались летом. Максимум их численности и биомассы наблюдался в начале второй декады сентября и составил соответственно 1053 тыс. экз.·м<sup>-2</sup> и 21,1 г·м<sup>-2</sup>. В пробах среди кладоцер всегда преобладали босмины, составляя 80–100 % численности и 53–100 % биомассы.

Коловратки в Байкале представлены тремя экологическими группами: круглогодичные, зимне-весенние, летне-осенние. В 1999 г. зимне-весенние коловратки были представлены тремя видами, но встречались они в чрезвычайно низких количествах (в пределах 1000 экз.·м<sup>-2</sup>). Круглогодичная группа была представлена также тремя видами – *Keratella quadrata*, *Kellicottia longispina*, *Filinia terminalis*, и наибольшее их развитие пришлось на август с максимумом численности в конце месяца. Летне-осенние коловратки были представлены 5 видами, четыре из которых встречались в незначительных количествах, а один вид – *Conochilus unicornis* Rousselet – со второй декады августа по середину ноября доминировал, составляя 41–97 % численности и 60–99 % биомассы коловраток (рис. 38). Максимум численности *Conochilus unicornis* пришелся на середину сентября и составил 2910 тыс. экз.·м<sup>-2</sup>.



**Рис. 38.** Динамика численности некоторых видов *Rotatoria* в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), лето–осень 1999 г.

Следовательно, 1999 г. характеризуется летним максимумом численности коловраток, вызванным, главным образом, развитием вида *Conochilus unicornis*, а также видов круглогодичной группы, при незначительном количестве зимне-весенних видов.

## 12. БИОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОЗЕР

Еще в 1915 г. А. Тинеманн предложил различать по трофности (от греч. *трофе* – питание) эвтрофные («хорошо питающиеся», «тучные») и олиготрофные («недостаточно питающиеся», «тощие») водоемы.

Первоначально классификация основывалась на соотношении объемов эпилимниона (верхнего, трофогенного – «питающего» слоя озера) и гиполимниона (нижнего, трофолитического – «питающегося» слоя). То есть по объему:

$$[\text{Эпилимнион}]/[\text{Гиполиннион}] \geq 1 = \text{эвтрофный};$$

$$[\text{Эпилимнион}]/[\text{Гиполиннион}] \leq 1 = \text{олиготрофный}.$$

Классификация оказалась очень удачной, естественной и применяется, в несколько модифицированном виде (добавлены

гиперэвтрофные, мезотрофные, ультраолиготрофные, дистрофные водные объекты), по настоящее время.

Отличительным признаком *олиготрофных водоемов* является высокая прозрачность воды благодаря низкой численности планктонных водорослей, обусловленной низким содержанием биогенов. Содержание кислорода в воде в течение всего года близко к насыщению. Из-за малости биомассы первичных продуцентов биомассы на высших трофических уровнях также невысоки. Дно водоемов песчаное или каменистое. Это, как правило, относительно глубокие и узкие озера. При малости биомасс компонентов, отличаются высоким разнообразием состава. Фауна и флора представлены характерными для олиготрофных водоемов видами.

*Эвтрофные водоемы.* Простейшим индикатором эвтрофности является низкая прозрачность воды, вызванная массовым развитием планктонных водорослей. Желто-зеленый цвет типичен для эвтрофных вод. Высокое содержание биогенов и варьирующее содержание кислорода. Концентрация кислорода в гипolimнионе значительно снижается как во время летней стратификации, так и подо льдом зимой. Во всех эвтрофных озерах вода в эвфотическом слое перенасыщена кислородом в дневное время суток благодаря фотосинтезу, а в ночное время уровень содержания кислорода падает из-за дыхания. Донные осадки эвтрофных озер чрезвычайно богаты биогенами, благодаря накоплению органического вещества, поступающего из фотической зоны. Поначалу это ведет к росту биомассы укорененных макрофитов. Затем рост фитопланктона затеняет погруженные растения. Плотные заросли полупогруженных макрофитов от этого не страдают и часто присутствуют вдоль берегов эвтрофных озер. Важной чертой эвтрофных озер является значительный урожай на корню, на всех уровнях пищевой цепи, включая рыб. Эвтрофные озера, как правило, очень рыбопродуктивны. Из-за пониженного содержания кислорода и расположения в теплых низинах в эвтрофных озерах редко встречается форель. Летние и зимние заморы рыбы типичны для эвтрофных вод. В настоящее время эта классификация имеет следующий вид (см. таблицы 16, 17).

Таблица 16

Уровень биогенов, биомассы и продуктивности озер  
разных трофических категорий

Трофность	Ультра-олиготрофное	Олиготрофное	Мезотрофное	Эвтрофное	Гипертрофное
Общий фосфор (мг·м <sup>-3</sup> )	4	10	10–35	35–100	100
Среднегодовое содержание хлорофилла (мг·м <sup>-3</sup> )	1	2,5	2,5–8	8–25	25
Максимум хлорофилла (мг·м <sup>-3</sup> )	2,5	8,0	8–25	25–75	75
Среднегодовая прозрачность по диску Секки (м)	12	6	6–3	3–1,5	1,5
Минимальная прозрачность по диску Секки (м)	6	3	3–1,5	1,5–0,7	0,7
Насыщенность кислородом (%)	<90	<80	40–89	40–0	10–0
Доминирующие рыбы	Форель, сиг	Форель, сиг	Сиг, окунь	Окунь, плотва	Плотва, лещ

Таблица 17

## Некоторые лимнологические характеристики озер

Признак	Эвтрофные	Олиготрофные	Дистрофные
<b>Морфометрия</b>			
Форма озера	Широкое, мелкое	Узкое и глубокое	Маленькое и мелкое
Дно озера покрыто	Мелкий органический ил	Камни и неорганический ил	Торфяной ил
Берег озера	Заросший	Каменистый	Каменистый или торфяной
<b>Оптические свойства</b>			
Прозрачность воды	Низкая	Высокая	Низкая
Цвет воды	Желтый, зеленый	Зеленый, голубой	Коричневый
<b>Гидрохимия</b>			
Растворенные вещества	Высокое содержание, много азота, кальция	Низкая минерализация, мало азота	Низкая минерализация, мало кальция
Взвешенные вещества	Много	Мало	Мало
Кислород	Высокое содержание у поверхности, низкое под термоклином и льдом	Высокое	Высокое
<b>Растения</b>			
Фитопланктон	Мало видов, высокая численность, <i>Cyanophyta</i>	Много видов, низкая численность, <i>Chlorophyta</i>	Мало видов, мало особей
Макрофиты	Много видов, обильны на мелководье	Много видов, встречается обилие в глубоких водах	Мало видов, некоторые обильны на мелководье
<b>Животные</b>			
Зоопланктон	Мало видов, многочисленны	Много видов, малая концентрация	Мало видов, мало особей
Зообентос	Мало видов, обильны	Много видов, низкая концентрация	Мало видов, малочисленны
Рыбы	Много видов, <i>Cyprinidae</i>	Мало видов, <i>Salmonidae</i>	Часто отсутствуют

### 13. КОМПЛЕКСНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОЗЕР

Существуют и комплексные классификации озер, основанные и на морфометрических данных, и на связях озер с другими озерами, и с бассейнами, что, несомненно, сказывается и на биологии озер. Таковой явилась классификация М. М. Кожова (1950) озер Восточной Сибири. Выглядит она таким образом.

- Группа 1. Озера-пруды с глубиной 1–2 м.
  - Подгруппа 1. Озера-пруды со слабым и непостоянным или лишь слегка фильтрующим стоком. Характерны недостаток кислорода зимой, сплошное зарастание водными растениями летом. Летом очень обилен зообентос. Наиболее часто из рыб обильны караси.
  - Подгруппа 2. Озера-пруды проточные. Хорошо выражен круглогодичный поверхностный сток. Также сильно зарастают водными растениями, бентос и планктон обильны. Это привлекает рыб (плотву, окуней и других) из соседних озер. Зимой они откочевывают в реки, так как эти озера промерзают, и газовый режим ухудшается. Постоянными жителями таких озер остаются караси.
- Группа 2. Мелководные озера с выраженной пелагической зоной (средняя глубина до 5 м).
  - Подгруппа 1. Слобопроточные озера. Слабый поверхностный или подземный сток. Дефицит кислорода. Фитобентос довольно обилен. Много бокоплавов, из рыб обычны карась, плотва, окунь.
  - Подгруппа 2. Проточные озера. Хорошо выражен круглогодичный поверхностный сток, замороз не бывает. Зообентос обилен, представляя хорошую кормовую базу для рыб (сорога, окунь, щука).
- Группа 3. Озера средней глубины (10–15 м).
  - Подгруппа 1. Слабопроточные озера. Глубокие, но имеющие только подземный или слабый поверхностный сток. Фитобентос беден. В придонных слоях наблюдается дефицит кислорода. Литоральный зообентос богат численно, но беден видами. Из рыб встречаются сорога, окунь, щука, карась.

- Подгруппа 2. Озера проточные. Сток хорошо выражен. Бентос беден, поставляет пищу таким рыбам как сорога, окунь, язь, сорога, ряпушка, сиг.
- Группа 4. Глубокие озера (средняя глубина более 15 м). Как правило, сильнопроточные озера. Фитобентос, зообентос, планктон бедны. Преобладающие рыбы – ленок, таймень, налим, сиг, хариус.

## **14. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СУКЦЕССИЯ В ВОДОЕМАХ**

Одна из концепций сукцессии (термины «сукцессия», как и «климакс», хорошо известны студентам из общего курса экологии) озерных экосистем предполагает, что озера проходят последовательно разные трофности, начиная с олиготрофности. Последней стадией является эвтрофия, затем озеро замещается болотом и, наконец, сушей. Эта концепция получила название старения озер. Теории сукцессии озер основывались на ярких примерах сукцессии маленьких горных водоемов и под влиянием развития идей сукцессии для наземных биоценозов. Тем не менее, сукцессия и климакс обоснованы теоретически для озер не так хорошо, как для экосистем суши. Фактически, рассмотрение озер мира приводит к выводу, что идея изменения от олиготрофности к эвтрофности через мезотрофность является только одним возможным путем развития озера. В действительности, два главных фактора контролируют эвтрофирование озера:

- средняя глубина озера;
- размеры и плодородие его бассейна.

Скорость, с которой озеро движется к эвтрофности, определяется колебаниями местных климатических условий, особенно температурой и осадками. Существуют палеолимнологические свидетельства того, что озеро может становиться эвтрофным и возвращаться к олиготрофии. Этот цикл может повторяться несколько раз.

Теперь мы можем определить *эвтрофирование как нарушение баланса питательных веществ водной экосистемы, ведущее к изменению ее трофического статуса.*

## 15. ВЛИЯНИЕ БИОГЕНОВ НА ЛИМИТАЦИЮ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ В ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

Для протоплазмы нормальным соотношением весов главных структурных химических элементов является 1P:7N:40C, т. е. на два грамма фосфора приходится 14 г азота и 80 г углерода на один килограмм живого веса (сырой биомассы) организмов. То есть, если учитывать азот и фосфор в уравнении фотосинтеза/дыхания, мы получим:



Считая, что источником углерода для водорослей является повсеместно имеющаяся углекислота, можно заключить, что ограничивать (лимитировать) интенсивность новообразования органического вещества (первичной продукции) могут азот и фосфор. Если в системе присутствуют только 1 г фосфора и 7 г азота, масса органического вещества не может превысить 500 г. Идентичный результат будет, если фосфора будет 10 г, а азота 7 г. Или азота – 50 г, а фосфора – 1 г. Таким образом, лимитирующим фактором неизбежно выступает тот элемент, пропорция которого в среде меньше, чем стехиометрическое соотношение для протоплазмы. Если в водоеме соотношение числа атомов растворенных форм азота к числу атомов растворенного фосфора превышает 16:1 (7:1 по весовой концентрации), мы наблюдаем лимитирование по фосфору. Привнесение минеральных или органических соединений фосфора в такой водоем должно вызвать развитие водорослей. Если соотношение азота и фосфора меньше 16:7 (7:1, соответственно), то водоем лимитирован по азоту, и вспышку развития водных растений вызовет добавка азота.

## IV. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

### 16. АНТРОПОГЕННОЕ ЭВТРОФИРОВАНИЕ: ПРИЧИНЫ И КОНТРОЛЬ

Важное последствие бытового загрязнения вытекает из того, что коммунальные сточные воды, кроме большого количества органических веществ, несут и много биогенных элементов. Результатом этого становится антропогенное эвтрофирование водоемов и водотоков. Ряд авторов разделяет эвтрофирование – естественный процесс старения экосистем водоемов и эвтрофикацию, антропогенную или экспериментальную. Было даже предложено этот процесс именовать дистрификацией. В отечественной литературе, в отличие от англоязычной, где термин один (eutrophication) существуют варианты термина: *эвтрофирование, эвтрофикация, эвтрофизация, эвтрификация, эвтрофия, евтрофирование, евтрификация, евтрофия*. Особо нужно выделить английский термин – в англоязычной литературе «антропогенное» эвтрофирование называется «культурным» (cultural eutrophication).

#### 16.1. Агенты эвтрофирования

Главными агентами эвтрофирования могут выступать соединения азота и фосфора, главным образом в виде нитратов и фосфатов.

В конце 1960-х гг. было широко распространено убеждение о загрязнении рек, озер и подземных вод нитратами бытовых сточных вод, сточных вод животноводческих комплексов и, особенно, возделываемых полей. Наибольшие опасения вызывал тот факт, что высокое содержание нитратов в воде может вызвать заболевания. Например, метгемоглобинемию, или синдром «blue-baby» – у детей младше 6 мес. Заболевание это чрезвычайно редкое, но между 1945 и 1960 гг. в мире было зарегистрировано 2000 случаев. В США погиб 41 младенец, в Европе – 80. Нитраты подозревались и в том, что они могут реагировать с аминами и амидами с образованием канцерогенов: нитрозаминов и нитрозамидов. Экспериментальные исследования сняли эти подозрения. Главной

угрозой, которую представляют нитраты для окружающей среды, является эвтрофирование водоемов.

Источники поступления агентов эвтрофирования:

- Естественное вымывание питательных веществ из почвы и выветривание пород.
- Сбросы частично очищенных или неочищенных бытовых сточных вод, содержащих органические соединения азота и фосфора, нитраты и фосфаты.
- Смыв неорганических удобрений, содержащих нитраты и фосфаты.
- Смыв с ферм навоза, содержащего органические соединения азота и фосфора, нитраты, фосфаты и аммиак.
- Смывы с нарушенных территорий (шахты, отвалы, стройки, неправильное использование земель).
- Сбросы детергентов, содержащих фосфаты.
- Поступление нитратов из атмосферы.

## 16.2. Стадии эвтрофирования

При эвтрофировании водная экосистема последовательно проходит несколько стадий. Сначала происходит накопление минеральных солей азота и/или фосфора в воде. Эта стадия, как правило, непродолжительна, так как поступающий лимитирующий элемент немедленно вовлекается в кругооборот и наступает стадия интенсивного развития водорослей в эпилимнионе. Нарастает биомасса фитопланктона, увеличивается мутность воды, повышается концентрация кислорода в верхних слоях воды.

Затем наступает стадия отмирания водорослей, происходят аэробная деградация детрита, образование хемоклина. Интенсивно отлагаются донные илы с повышенным содержанием органики. Отмечаются изменения зооценоза (замещение лососевых рыб карповыми).

Наконец, наступает полное исчезновение кислорода в глубинных слоях и начинается анаэробное брожение. Характерно образование сероводорода, сероорганических соединений и аммиака.

Опасности эвтрофирования подвергаются даже моря. Так, в настоящее время Северное море получает азота в 4 раза больше фонового уровня, фосфатов – в 7 раз больше фонового. От этого прироста 37 % азота и 68 % фосфата – из бытовых сточных вод, 60 % азота и 25 % фосфатов – из сельскохозяйственных смывов.

### 16.3. Хозяйственные последствия эвтрофирования

Обильная растительность может препятствовать движению воды и водного транспорта, вода может стать непригодной для питья даже после обработки, рекреационная ценность водоема может снизиться, могут исчезнуть коммерчески важные виды рыб (такие как форель). Наконец, эвтрофирование приводит к вспышкам «цветения» (массового развития) водорослей.

*Цветение водорослей* наносит двойной ущерб водной системе. Во-первых, оно снижает освещенность, вызывая гибель водных растений. Тем самым нарушаются естественные местообитания многих гидробионтов. Во-вторых, при отмирании водорослей потребляется много кислорода, что может привести к тем же последствиям, что и прямое внесение органики в воду. В 1988, 1989 гг. в восточном Северном море наблюдалась вспышка развития *Chrysochromulina* sp. в богатых биогенами водах, выносимых Рейном. При этом были отмечены массовые заморы рыбы в шведских и норвежских водах.

Для обозначения цветения вод в английском языке используется термин *discoloured waters*. Кроме того, есть специальные термины для массового развития конкретных видов водорослей. Так, *brown tide* (бурый прилив) – массовое развитие *Phaeocystis* sp., *red tide* (красный прилив) – обычно вызывается массовым развитием *Gymnodinium* sp., *Mesodinium* sp.

Кроме обогащения воды легкоокисляемой органикой, приводящей к заморам, водоросли способны продуцировать и токсические вещества (так называемые алготоксины). Так, *Alexandrium tamarense* вырабатывает сакситоксин нервно-паралитического действия, аккумулируемый съедобными моллюсками. *Prymnesium parvum* выделяет вещества, высокотоксичные для рыб. Токсины, образуемые *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, действуют на печень и могут быть нейротоксичны. Например, в 1989 г. при массовом развитии сине-зеленых водорослей в английских озерах погибло несколько собак.

### 16.4. Борьба с эвтрофированием

Как и любые меры по охране окружающей среды борьба с эвтрофированием складывается из двух групп методов: восстановительных и профилактических.

Восстановительные методы включают в себя:

- отвод стока для снятия нагрузки по биогенам;
- разбавление вод для снижения концентрации биогенных элементов;
- углубление дна для увеличения объема гипolimниона;
- драгирование для изъятия биогенных элементов, депонированных в донных осадках;
- изъятие вод из гипolimниона;
- спуск водохранилищ;
- химическую обработку для связывания и осаждения биогенных элементов или уничтожения водорослей;
- нарушение стратификации и реаэрацию;
- сбор фитомассы и биоманипуляцию.

Профилактические методы, используемые для предотвращения эвтрофирования:

- контроль сброса биогенных веществ;
- удаление биогенных веществ из сточных вод;
- использование предварительных отстойников;
- стратегическая перестройка управления водопользованием в бассейне.

## **17. ЗАГРЯЗНЕНИЕ БЫТОВЫМИ СТОЧНЫМИ ВОДАМИ**

Старейшим видом загрязнения вод являются прямые отходы человеческой жизнедеятельности. В пересчете на сухое вещество каждый взрослый человек за год «производит» около 20 кг органического вещества, 5 кг азота и 1 кг фосфора. Первоначально эти отходы напрямую использовались в качестве удобрений, затем появились первые земляные уборные. Часть отходов при этом неизбежно попадала в источники питьевой воды. Именно поэтому большие города уже в древности стали строить водопроводы из достаточно удаленных от мест скопления людей источников.

С появлением ватерклозетов вторично возникла идея простого решения проблемы – разведения отходов и удаления их от места сброса. Объемы, а затем и состав подлежащих очистке сточных вод существенно изменились. Коммунально-бытовые стоки поступают в настоящее время не только из жилых зданий, но и из больниц, столовых, прачечных, небольших промышленных предприятий и т. п. Современные бытовые стоки, кроме собственно легкоокисляе-

мых органических веществ и биогенных элементов, содержат множество веществ, используемых в повседневном обиходе: детергенты и СПАВ, химикалии, лекарственные препараты и т. д.

Поступающие в водотоки и водоемы легкоокисляемые органические вещества подвергаются там химическому и микробиологическому окислению. Для измерения содержания органических веществ в воде принято пользоваться величиной биохимического потребления кислорода за 5 сут. (БПК<sub>5</sub>, BOD<sub>5</sub> – Biochemical Oxygen Demand). Ее определяют по разнице содержания в воде кислорода при отборе пробы и после пяти суток инкубации без доступа кислорода. БПК<sub>5</sub>, отражая содержание легкоокисляемой органики в воде, является универсальным показателем, используя который можно сопоставить степень загрязнения от разных источников. Так, в таблице 18 загрязнение от предприятий различного профиля выражено в эквивалентах загрязнения от людей.

Таблица 18

Загрязненность органикой промышленных сточных вод в эквивалентах бытовых стоков

Производство	Суточная продукция или переработка 1 т	Эквивалент стоков от человек
Деревообрабатывающий завод	Древесной стружки	50–80
Молокозавод	Молока	30–80
Бойня	1 головы крупного рогатого скота или 2,5 свиньи	70–200
Сырозавод	Молока	100–250
Крахмальный завод	Кукурузы или пшеницы	800–1000
Бумажный комбинат	Бумаги	100–300
Завод по производству искусственного волокна	Материала	500–700
Сахарный завод	Сахарной свеклы	120–400
Льномочильная фабрика	Льна	750–1150
Спиртовой завод	Пшеницы	1500–2000
Шерстомойня	Шерсти	2000–3000
Предприятие по отбеливанию тканей	Изделий	2000–3500
Фабрика-прачечная	Грязного белья	700–2300
Пивоваренный завод	Пива	300–2000
Целлюлозная фабрика	Целлюлозы	4000–6000
Кожевенный завод	Кожи	1000–4000

### *Последствия загрязнения бытовыми сточными водами*

Легкоокисляемое органическое вещество, в избытке содержащееся в коммунально-бытовых стоках, становится питательной средой для развития множества микроорганизмов, в том числе и патогенных. В нормальной почве содержится большое количество микроорганизмов, способных вызывать тяжелые инфекционные заболевания. Обычно питьевая вода защищена от вторжения этих микроорганизмов тем, что содержание в ней доступной пищи для бактерий (легкоокисляемых органических веществ) невелико и практически все они используются нормальной водной микрофлорой. Однако со значительным ростом концентрации органики в воде почвенные патогенные микроорганизмы находят достаточно источников пищи для себя и могут стать источником вспышки инфекции. Кроме того, повышение количества органики в воде стимулирует рост и непатогенной микрофлоры, служащей, в свою очередь, пищей для более крупных возбудителей заболеваний – ряда амёб (как это было, например, с амёбами, вызвавшими вспышку менингоэнцефалита с летальным исходом среди флоридских подростков), других паразитов, проводящих в воде значительную часть своего жизненного цикла. В условиях избытка питания могут развиваться и почвенные грибки, продуцирующие канцерогенные вещества, например афлотоксины. Кроме того, множество патогенных бактерий попадает в воду непосредственно с коммунально-бытовыми сточными водами. Найдя там условия благоприятные для размножения, они развиваются в массовых количествах. Водоемы замедленного водообмена (озера и водохранилища) при неконтролируемом бытовом загрязнении легко превращаются в очаги инфекций.

Кроме непосредственной опасности развития патогенных организмов в воде, загрязненной бытовыми стоками, существует другое не прямое неприятное для человека последствие этого вида загрязнений. При разложении органического вещества (и химическом, и микробиологическом), как мы уже упоминали выше, потребляется кислород. В случае тяжелого загрязнения содержание растворенного в воде кислорода падает настолько, что это сопровождается не только заморами рыбы, но и невозможностью нормального функционирования микробиологических сообществ. Происходит деградация водной экосистемы. В проточных водах и

в водоемах картина последствий загрязнения бытовыми стоками выглядят по-разному.

В проточных водах образуются четыре, следующие друг за другом по течению, зоны. В них совершенно четко выражены градиенты содержания кислорода (увеличение от места сброса вниз по течению), биогенных веществ и БПК<sub>5</sub> (соответствующее снижение), видового состава биологических сообществ.

Первая зона – зона полной деградации, где происходит смешивание сточных и речных вод. Далее располагается зона активного разложения, в которой микроорганизмы разрушают большую часть попавших органических веществ. Затем следуют зоны восстановления качества воды и, наконец, чистой воды.

Еще в начале XX в. Р. Кольквитц и М. Марссон привели списки индикаторных организмов для каждой из этих зон, создав так называемую шкалу сапробности (от греч. *сапрос* – гнилой).

В первой зоне, полисапробной, содержится значительное количество нестойких органических веществ и продуктов их анаэробного распада, много белковых веществ. Фотосинтез отсутствует, и кислород поступает в воду только из атмосферы, полностью расходуясь на окисление. Анаэробные бактерии вырабатывают метан, *Desulfovibrio desulphuricans* восстанавливает сульфаты до сероводорода, что способствует образованию черного сернистого железа. Благодаря этому ил черный, с запахом сероводорода. Очень много сапрофитной микрофлоры, нитчатых бактерий, серных бактерий, простейших – инфузорий, бесцветных жгутиковых, олигохет-тубифицид.

В следующей за ней  $\alpha$ -мезосапробной зоне идет аэробный распад органических веществ. Аммонийные бактерии метаболизируют азотные соединения с образованием аммиака. Высокое содержание углекислоты, кислорода все еще мало, но сероводорода и метана уже нет, БПК<sub>5</sub> составляет десятки миллиграммов в литре. Сапрофитные бактерии исчисляются десятками и сотнями тысяч в 1 мл. Железо присутствует в окисной и закисной формах. Протекают окислительно-восстановительные процессы. Ил серого цвета. Преобладают организмы, приспособившиеся к недостатку кислорода и высокому содержанию углекислоты. Много растительных организмов с миксотрофным питанием. В массе развиваются нитчатые бактерии, грибы, осциллятории, хламидомона-

ды, эвглены. Встречаются сидячие инфузории, коловратки, много жгутиковых. Много тубифицид и личинок хирономид.

В  $\beta$ -мезосапробной зоне практически нет нестойких органических веществ, они почти полностью минерализовались. Сапрофитов – тысячи клеток в 1 мл. Содержание кислорода и углекислоты колеблется в зависимости от времени суток. Ил желтый, идут окислительные процессы, много детрита. Много организмов с автотрофным питанием, наблюдается цветение воды. Встречаются диатомеи, зеленые, много протококковых водорослей. Появляется роголистник. Много корненожек, солнечников, инфузорий, червей, моллюсков, личинок хирономид. Встречаются ракообразные и рыбы.

Олигосапробная зона соответствует зоне чистой воды. Цветения не бывает, содержание кислорода и углекислоты постоянно. На дне мало детрита, автотрофных организмов и червей, моллюсков, хирономид. Много личинок поденок, веснянок, можно встретить стерлядь, голяна, форель.

В водоемах замедленного водообмена картина зависит от размеров водоема и режима сброса сточных вод. В больших водоемах (морях, крупных озерах) вокруг постоянно действующего источника образуются, концентрически расположенные, поли-, мезо и олигосапробная зоны. Такая картина может сохраняться неопределенно долгое время, если самоочистительный потенциал водоема позволяет ему справляться с поступающей нагрузкой. Если водоем небольшой, то он трансформируется, по мере поступления загрязнений из олигосапробного в полисапробное состояние, а со снятием нагрузки может вернуться в олигосапробное состояние.

Рассмотренное выше эвтрофирование также, как правило, является следствием загрязнения бытовыми сточными водами, хотя мы видели и много других его источников.

## 18. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНОЙ СРЕДЫ УГЛЕВОДОРОДАМИ

### 18.1. Нефтепродукты

В настоящее время поверхность Мирового океана на огромных площадях оказалась покрытой углеводородной пленкой. Причинами этого считают:

- сброс отходов нефтеперегонных заводов (например, только один завод средней мощности дает  $400 \text{ т} \cdot \text{сут.}^{-1}$  отходов);
- сброс балласта и промывка танков нефтевозов после транспортировки (количество нефти, попадающей при этом в воду, в среднем, составляет 1 % от перевозимого груза, т. е.  $1\text{--}2 \text{ Мт} \cdot \text{год}^{-1}$ );
- большое число аварий с нефтеналивными судами (только за период с 1967 по 1974 гг. произошла 161 авария (Эрхард, 1984), с 1960 по 1970 гг. – около 500 (Рамад, 1981)).

Мировая общественность обратила внимание на проблему в конце шестидесятых годов в связи с катастрофой танкера «Гори Каньон», который 18 марта 1967 г. по пути в Милфорд сел на мель к северо-востоку от островов Силли. В Северное море вылилось около 123 тыс. т нефти, было загрязнено 180 км побережий Англии и Франции. В течение последующих полутора десятилетий произошел целый ряд привлекших внимание общественности аварий танкеров, повлекших катастрофическое загрязнение морской поверхности и побережий. Вот далеко неполный их перечень:

- 21.08.1972 г.: столкновение двух либерийских танкеров; к берегам Южной Африки принесено 100 тыс. т нефти;
- 7.06.1975 г.: гибель в Индийском океане японского танкера; выброшено в океан 237 тыс. т нефти;
- 12.05.1976 г.: взрыв танкера «Уркиоло» у берегов Испании; выброшено в море 100 тыс. т нефти;
- март, 1978 г.: авария супертанкера «Амоко Кадис» водоизмещением 233 тыс. т у берегов Франции; выброшено в море 220 тыс. т нефти;
- 6.08.1983 г.: гибель испанского супертанкера у берегов Южной Африки; в океан выброшено 217 тыс. т нефти;
- 19.12.1987 г.: затопление танкера в Оманском заливе; выброшено в море 115 тыс. т горючего.

Примерно половина всей добытой нефти транспортируется морем. Только в 1989 г. из Персидского залива было вывезено

504 Мт нефти, из которых 117 Мт обогнуло мыс Горн. 340 Мт нефти было привезено морем в Европу и 315 Мт – на восточное побережье США (Clark et al., 1997).

В настоящее время по морю ежегодно транспортируется более 1 млрд т нефти. Часть этой нефти (от 0,1 до 0,5 %) выбрасывается в океан более или менее легально: речь идет не о непредвиденном, а в некотором смысле сознательном загрязнении в результате практики сброса промывочных и балластных вод в открытое море. После разгрузки нефтяные танки промываются морской водой, а потом заполняются ею как балластом, что придает судну большую устойчивость. Эта вода, загрязненная нефтью, впоследствии сбрасывается в зонах открытого моря, специально оговоренных международными соглашениями. Например, только за год в Средиземном море легально сбрасывается около 300 000 т груза нефтеналивных судов.

По словам Ф. Рамада (1981), не менее 300 судов, которые проходят Па-де-Кале и огибают побережье Франции, ежедневно сбрасывают балластные воды, в результате чего образуется настоящее «черное море». Обычно это делается ночью или же сброс производится в кильватерную струю судна, что позволяет ввести в заблуждение патрульные самолеты.

Кроме того, внимание общественности привлекли и аварии морских буровых установок. Так, в январе 1969 г. в открытом море у побережья Калифорнии, неподалеку от Коал-Ойл-Пойнт, в результате неправильной эксплуатации буровой установки в Тихий океан ежедневно попадало от 8 до 16 т нефти. В апреле 1977 г. произошла большая авария на буровой платформе «Браво» в центральной части Северного моря. За 8 сут. из скважины было потеряно 13 тыс. т нефти и 19 тыс. т газа.

### ***Источники загрязнения***

На рис. 39 приведены доли разных антропогенных источников в загрязнении океана нефтепродуктами. Но необходимо учитывать и то, что нефть – природное вещество и попадает в морскую воду не только в результате техногенной активности, но и с естественными выходами (по разным оценкам от 20 кт до 2 Мт·год<sup>-1</sup>). Расчеты антропогенного поступления нефти и нефтепродуктов, по разным источникам, существенно различаются (см. табл. 19–21), варьируя в пределах от 3 до 6 Мт·год<sup>-1</sup>. В любом

случае это превосходит естественное поступление нефти в 1,5–30 раз. Необходимо обратить внимание на то, что техногенное поступление нефтепродуктов далеко не всегда связано с прямыми выбросами в воду. Чрезвычайно мощным источником загрязнения открытых районов океана являются дальние атмосферные переносы. Возникновение этого потока связано с неполным сгоранием бензина, керосина и других легких фракций нефти. Время их пребывания в атмосфере составляет 0,5–2,3 года, причем около 90 % этих веществ выпадает из атмосферы в северном полушарии. Следует отметить и более высокую, как правило, токсичность этих легких нефтепродуктов по сравнению с тяжелыми фракциями, которые ближе к естественным нефтям.

Таблица 19

Основные источники поступления нефти в океан (по Сытник, 1987)

Источник поступления	Объем поступления (Мт·год <sup>-1</sup> )
Морской транспорт	1–1,5
Речной транспорт и приморские города	1,9
Береговой сток	0,8
Атмосфера	0,6
Естественные выходы	0,6
Добыча на шельфе	0,1
Всего	5–5,5

Таблица 20

Поступление нефтяных углеводородов в морскую среду (Мт·год<sup>-1</sup>) (Segar, 1998)

Источник	Поступление
Всего из природных источников	0,25
Добыча нефти и газа на шельфе	0,05
Танкерные перевозки	0,7
Сброс из доков	0,03
Загрязнение портовых акваторий	0,02
Топливо и трюмные стоки	0,3
Аварии танкеров	0,4
Аварии других судов	0,02
Атмосфера	0,3
Городские стоки	0,7
Переработка	0,1
Прочие промышленные стоки	0,2
Городской смыв	0,12
Речной сток	0,04
Захоронение в океане	0,02
Итого	3,25

Таблица 21

Поступление нефтяных углеводородов в морскую среду (Мт·год<sup>-1</sup>)  
(Израэль, 1989)

Источник загрязнения	Возможные пределы оценок	Наиболее вероятная оценка
Природные		
Выходы нефти на дне	0,02–2,0	0,2
Эрозия осадков	0,005–0,5	0,05
Всего	(0,025)–(2,5)	(0,25)
Антропогенные		
Добыча нефти на шельфе	0,04–0,06	0,05
Транспортировка нефти	0,4–1,5	0,7
Судоходство (за исключением танкеров)	0,01–0,03	0,02
Аварии судов (за исключением танкеров)	0,02–0,04	0,02
Танкерные операции		
Обслуживание танкеров в доках	0,02–0,05	0,03
Дизельное топливо	0,2–0,6	0,3
Аварии танкеров	0,3–0,4	0,4
Всего	(0,95)–(2,62)	(1,47)
Поступление из атмосферы	0,05–0,5	0,3
Бытовые стоки	0,4–1,5	0,7
Перегонка нефти	0,06–0,6	0,1
Неочищенные промышленные воды	0,1–0,3	0,2
Дождевая вода с городских территорий	0,01–0,2	0,12
Речной сток	0,01–0,5	0,04
Захоронение нефтепродуктов в океане	0,005–0,02	0,02
Всего	(0,585)–(3,12)	(1,18)
Общее поступление	1,7–8,8	3,2



**Рис. 39.** Антропогенное поступление нефтепродуктов в океаны (по Frid, 2002)

### *Состав нефтяных загрязнений*

Нефти из разных месторождений существенно отличаются по химическому составу (табл. 22). Так, нефти Северного моря относительно светлые, содержат много легких фракций, нефти из Венесуэлы – тяжелые и темные. Естественно, что основные химические элементы нефти – углерод (80–87 %) и водород (10–15 %). Кроме того, в гетероциклических соединениях нефти содержатся также обычные для органических соединений сера (0–10 %), кислород (0–5 %) и азот (0–1 %). Помимо этих элементов, сырая нефть включает целый ряд металлов в следовых количествах – V, Ni, Fe, Al, Na, Ca, Cu, U.

Таблица 22

Среднее содержание основных классов углеводородов и их производных (%) в нефти и бензине из различных месторождений (по Израэль, 1989)

Компоненты	Сырая нефть	Бензин
Алифатические или парафиновые (алканы)	15–55	25–68
Циклопарафиновые (циклоалканы, нафтены)	30–50	5–24
Ароматические (бензины и полинуклеарные соединения)	5–20	7–55
Асфальтовые соединения (асфальтены, гетероциклические вещества, содержащие кислород, серу и азот)	2–15	0,1–0,5
Олефины (алканы или этиленовые соединения)	0	0–41

### ***Формы нефтяных загрязнений***

В море нефть встречается в самых разных формах: мономолекулярные пленки, пленки толщиной до нескольких миллиметров, пленки на скалах, нефть в донных осадках, эмульсии «вода в нефти» или «нефть в воде», нефтяные агрегаты.

Сразу же при попадании нефти в морскую среду обычно образуется слик (поверхностная пленка). В первые часы существования нефтяного слика доминируют физико-химические процессы. Затем важнейшее значение приобретает микробная деструкция. В целом судьба нефтяного слика в море характеризуется общей цепью последовательных процессов: испарение, эмульгирование, растворимость, окисление, образование агрегатов, седиментация, биodeградация, включающая микробное разрушение и ассимиляцию.

1 т нефти, растекаясь по поверхности океана пленкой толщиной в 1/16 мкм, занимает площадь 10–12 км<sup>2</sup>, а 5 т, сброшенных при промывке танков, образуют на поверхности воды покрывало длиной 75 км и шириной 800 м, т. е. нефтяная пленка покрывает площадь около 60 км<sup>2</sup>.

### ***Континентальные воды***

От нефтяного загрязнения страдают, естественно, не только морские, но и пресные воды. Сточные воды нефтеперегонных заводов, смена масла в автомобилях, утечки масла из картеров, расплескивание бензина и дизельного топлива в момент заправки автомобилей – все это приводит к загрязнению источников воды и водоносных слоев. При этом загрязняются не только и даже не столько поверхностные, сколько подземные воды. Поскольку бензин проникает в почву в семь раз быстрее, чем вода, и придает неприятный вкус питьевой воде даже при таких низких концентрациях, как 1 млн<sup>-1</sup>, подобное загрязнение способно сделать неприемлемой для питья довольно значительное количество подземных вод.

### ***Воздействие нефтепродуктов на водные экосистемы***

Мазут, дизельное топливо, керосин (сырая нефть значительно легче подвергается биологической и другой деструкции), покрывая пленкой воду, ухудшают газо- и теплообмен океана и атмосферы, поглощают значительную часть биологически активной компоненты солнечного спектра.

Интенсивность света в воде под слоем разлитой нефти составляет, как правило, только 1 % интенсивности света на поверхности, в лучшем случае 5–10 %. В дневное время слой темноокрашенной нефти лучше поглощает солнечную энергию, что приводит к повышению температуры воды. В свою очередь, в нагретой воде снижается количество растворенного кислорода и увеличивается скорость дыхания растений и животных.

При сильном нефтяном загрязнении наиболее очевидным оказывается ее механическое действие на среду. Так, нефтяная пленка, образовавшаяся в Индийском океане в результате закрытия Суэцкого канала (маршруты всех танкеров с аравийской нефтью шли в этот период через Индийский океан), снизила испарение воды в 3 раза. Это привело к уменьшению облачности над океаном и развитию засушливого климата в прилегающих районах.

Немаловажным фактором является биологическое действие нефтепродуктов: их прямая токсичность для гидробионтов и околоводных организмов.

Береговые сообщества можно расположить по возрастанию чувствительности к нефтяному загрязнению в следующем порядке:

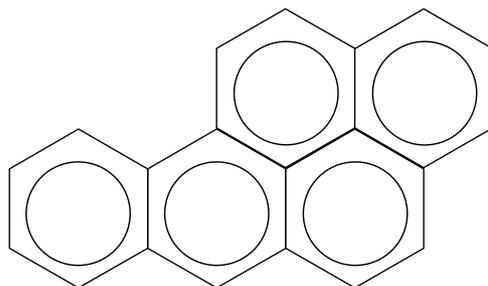
Скалистые берега, каменные платформы, песчаный пляж, галечный пляж, укрытые скалистые берега, укрытые пляжи, марши и мангровые заросли, коралловые рифы.

## **18.2. Полициклические ароматические соединения**

В настоящее время загрязнение полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) носит глобальный характер. Их присутствие обнаружено во всех элементах природной среды (воздух, почва, вода, биота) от Арктики до Антарктиды.

ПАУ, обладающие выраженными токсическими, мутагенными и канцерогенными свойствами, многочисленны. Их количество достигает 200. Вместе с тем, ПАУ, распространенных повсеместно в биосфере не более нескольких десятков. Это антрацен, флуорантрен, пирен, хризен и некоторые другие.

Наиболее характерным и наиболее распространенным в ряду ПАУ является бенз(а)пирен (БП):



БП хорошо растворим в органических растворителях, тогда как в воде он растворим чрезвычайно мало. Минимальная действующая концентрация бенз(а)пирена мала. БП трансформируется под действием оксигеназ. Продукты трансформации БП являются конечными канцерогенами.

Доля БП в общем количестве наблюдаемых ПАУ невелика (1–20 %). Его делают значимым:

- Активная циркуляция в биосфере
- Высокая молекулярная устойчивость
- Значительная проканцерогенная активность.

С 1977 г. БП на международном уровне считается индикаторным соединением, по содержанию которого оценивается степень загрязненности среды канцерогенными ПАУ.

### *Источники бенз(а)пирена*

В формировании природного фона бенз(а)пирена участвуют различные абиотические и биотические источники.

Геологические и астрономические источники. Поскольку ПАУ синтезируются при термических превращениях простых органических структур, БП обнаруживается в:

- материале метеоритов;
- магматических породах;
- гидротермальных образованиях (1–4 мкг·кг<sup>-1</sup>);
- вулканических пеплах (до 6 мкг·кг<sup>-1</sup>). Глобальный поток вулканического БП достигает 1,2 т·год<sup>-1</sup> (Израэль, 1989).

Абиотический синтез БП возможен при сгорании органических материалов во время природных пожаров. При горении леса, травяного покрова, торфа образуется до 5 т·год<sup>-1</sup>. Биотический синтез БП обнаружен для целого ряда анаэробных бактерий, способных синтезировать БП из природных липидов в донных отложениях. Показана возможность синтеза БП и хлореллой.

В современных условиях рост концентрации бенз(а)пирена связан с антропогенным происхождением. Главными источника-

ми БП являются: бытовые, промышленные сбросы, смывы, транспорт, аварии, дальний перенос. Антропогенный поток БП составляет примерно 30 т·год<sup>-1</sup>.

Кроме того, важный источник поступления БП в водную среду – транспортировка нефти. При этом в воду попадает около 10 т·год<sup>-1</sup>.

#### ***Бенз(а)пирен в воде***

Наибольшее загрязнение БП характерно для бухт, заливов, замкнутых и полузамкнутых морских бассейнов, подверженных антропогенному воздействию (табл. 23). Самые высокие уровни загрязнения БП в настоящее время отмечены для Северного, Каспийского, Средиземного и Балтийского морей.

#### ***Бенз(а)пирен в донных отложениях***

Поступление ПАУ в морскую среду в количестве, превышающем возможности их растворения, влечет за собой сорбцию этих соединений на частицах взвесей. Взвеси оседают на дно и, следовательно, БП накапливаются в донных осадках. При этом основной зоной накопления ПАУ является слой 1–5 см.

Зачастую ПАУ осадков имеют природное происхождение. В этих случаях они приурочены к тектоническим зонам, участкам глубинного термического воздействия, ареалам рассеяния газонефтяных скоплений.

Тем не менее, наиболее высокие концентрации БП обнаруживаются в зонах антропогенного влияния (табл. 23).

Таблица 23

Средние уровни загрязнения морской среды  
бенз(а)пиреном мкг·л<sup>-1</sup>

Акватория	Вода	Придонный слой	Донные отложения
Чистая	0,025±0,003	0,125±0,003	–
С интенсивным судоходством	0,052±0,004	–	16,1±1,17
Прибрежные воды у районов с развитой промышленностью	0,15±0,01	2,24±0,1	76,8±3,25
Прибрежные воды в районе сброса стоков сланцепереработки	0,27±0,07	5,0±0,2	7500±125
Прибрежные воды в районе нефтедобычи и нефтепереработки	0,10±0,02	10,6±0,39	8030±146

### ***Бенз(а)пирен в планктонных организмах***

ПАУ не только сорбируются на поверхности организмов, но и концентрируются внутриклеточно. Для планктонных организмов характерен высокий уровень накопления ПАУ (табл. 24).

Содержание БП в планктоне может варьировать от нескольких  $\text{мкг}\cdot\text{кг}^{-1}$  до  $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$  сухой массы. Наиболее обычное содержание  $(2-5)\cdot 10^2 \text{ мкг}\cdot\text{кг}^{-1}$  сухой массы. Для Берингова моря коэффициенты накопления (отношение концентрации в организмах к концентрации в воде) в планктоне ( $C_{п}/C_{в}$ ) колеблются от  $1,6\cdot 10$  до  $1,5\cdot 10^4$ , коэффициенты накопления в нейстоне ( $C_{н}/C_{в}$ ) колеблются от  $3,5\cdot 10^2$  до  $3,6\cdot 10^3$  (Израэль, 1989).

### ***Бенз(а)пирен в бентосных организмах***

Поскольку большинству бентосных организмов основой питания служит взвешенное органическое вещество и детрит грунтов, зачастую содержащие ПАУ в концентрациях выше, чем в воде, бентонты часто накапливают БП в значительных концентрациях (табл. 28). Известно накопление ПАУ полихетами, моллюсками, ракообразными, макрофитами.

Таблица 24

Коэффициенты накопления БП в различных объектах экосистемы Балтийского моря (Израэль, 1989)

Объекты	Коэффициенты
Планктон/вода	$10-10^3$
Грунт/вода	$10^3$
Бентос/вода	$10^2-10^3$
Бентос/грунт	$10^{-1}-10$

### ***Разложение бенз(а)пирена морскими микроорганизмами***

Поскольку ПАУ – вещества, встречающиеся в природе, естественно, что существуют микроорганизмы, способные их разрушать. Так, в экспериментах в Северной Атлантике БП-окисляющие бактерии разрушали от 10–67 % внесенного БП. В опытах в Тихом океане была показана способность микрофлоры разрушать 8–30 % внесенного БП. В Беринговом море микроорганизмы разрушали 17–66 % внесенного БП, в Балтийском море – 35–87 %.

На основании экспериментальных данных была построена модель, позволяющая оценить трансформацию БП в Балтийском море (Израэль, 1989). Было показано, что бактерии верхнего слоя воды (0–30 м) за лето способны разложить до 15 т нефти, за зиму – до 0,5 т. Общая масса БП в Балтийском море оценивается в 100 т. Если предположить, что микробное разрушение БП является единственным механизмом его элиминации, то время, которое будет затрачено на разрушение всего имеющегося запаса БП, составит от 5 до 20 лет.

#### ***Последствия загрязнения бенз(а)пиреном***

Для БП доказаны токсичность, канцерогенность, мутагенность, тератогенность, действие на репродуктивную способность рыб. Кроме того, как и другие трудноразложимые вещества, БП способен к биоаккумуляции в пищевых цепях и, соответственно, представляет опасность для человека.

### **19. КОНСЕРВАТИВНЫЕ ТОКСИКАНТЫ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ**

Мы увидели, что вещества природного происхождения, образовавшиеся в результате естественных процессов в прошлом (компоненты нефти) и образующиеся в настоящее время (бенз(а)пирен), вызывают достаточно тяжелые негативные последствия для окружающей среды и, соответственно, человека, когда благодаря хозяйственной деятельности последнего оказываются не тогда, не там и не в тех количествах, как следовало бы.

Среди веществ, поступающих в природные воды, консервативны, т. е. практически не трансформируются биотой, три класса веществ: тяжелые металлы, пестициды и синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), входящие в состав синтетических моющих средств (СМС), или детергентов. Первые – в силу своей химической природы, вторые (в большей) и третьи (в меньшей степени) – в силу чуждости их строения биосфере. Не перерабатываясь организмами, эти вещества, тем не менее, способны накапливаться в их тканях и аккумулироваться в пищевых цепях (рис. 40).

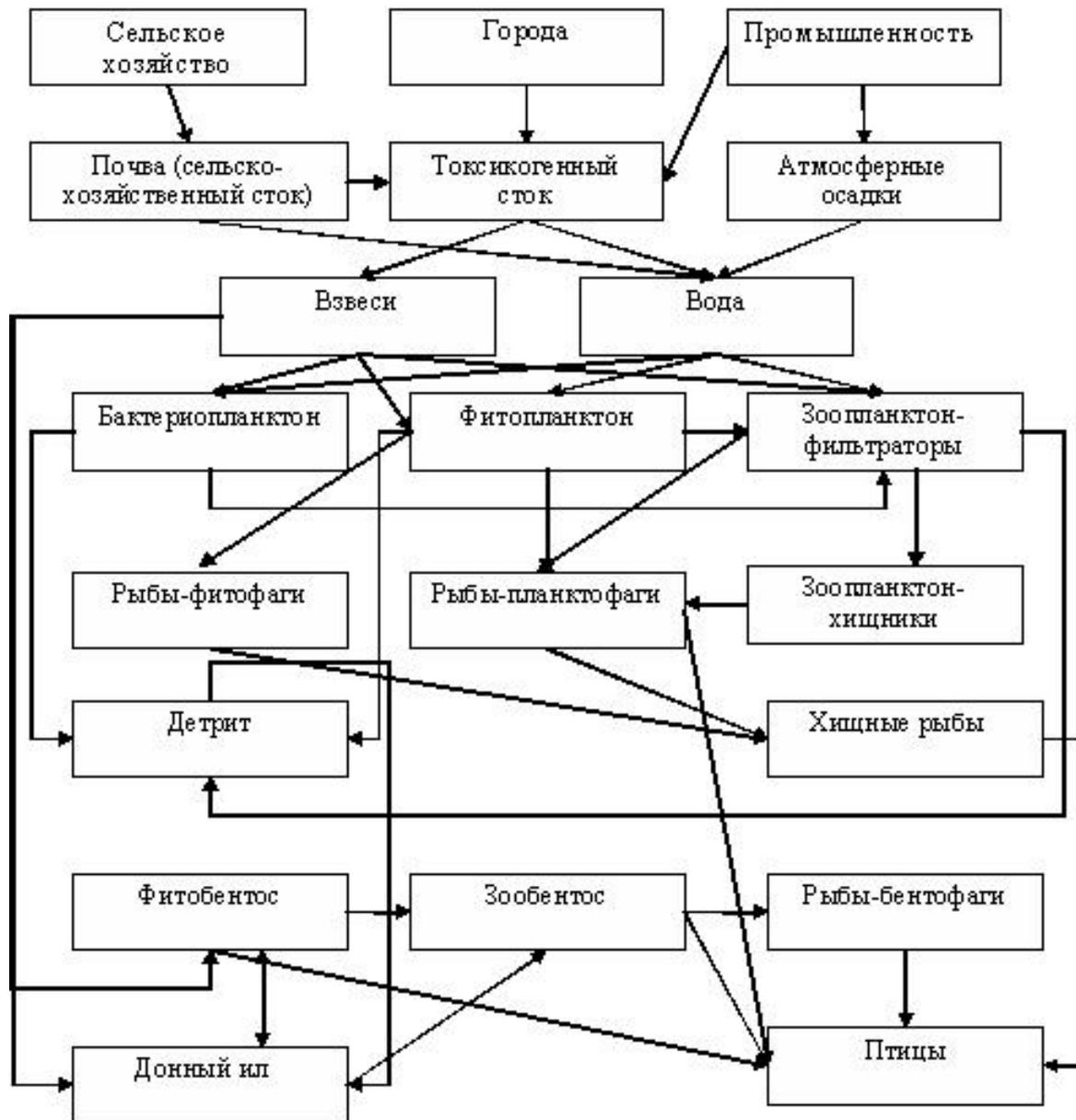


Рис. 40. Миграционные пути консервативных токсикантов в водных экосистемах

### 19.1. Загрязнение вод металлами

Металлы принадлежат к числу главных неорганических загрязнителей пресных и морских вод. Это, в основном, соединения мышьяка, свинца, кадмия, ртути.

Острота проблемы загрязнения водной среды токсичными металлами определяется:

- высокой концентрацией соединений тяжелых металлов в прибрежных районах океана и внутренних морях;

- образованием высокотоксичных металлоорганических комплексов, которые как включаются в абиотический компонент экосистемы, так и поглощаются гидробионтами;
- накоплением металлов гидробионтами в дозах, опасных для человека.

Среди загрязняющих веществ по токсикологическим оценкам «стресс-индексов» тяжелые металлы занимают второе место, уступая только пестицидам.

### *Источники поступления*

Основные источники поступления токсичных металлов в водную среду – прямое загрязнение и сток с суши. Только воды рек ежегодно приносят в океан свыше 320 Мт железа. Кроме того, важная роль в загрязнении гидросферы металлами принадлежит атмосферному переносу. Главные пути поступления металлов в Мировой океан приведены в табл. 25.

Таблица 25

Естественное и антропогенное загрязнение Мирового океана, т·год<sup>-1</sup>

Загрязняющее вещество	Общий сток			Сток с суши	Атмосферный перенос
	естественный	антропогенный	(%)		
Свинец	$1,8 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^6$	92	$(1,0-20,0) \cdot 10^5$	$(2,0-20,0) \cdot 10^5$
Ртуть	$3,0 \cdot 10^3$	$7,0 \cdot 10^3$	70	$(5,0-8,0) \cdot 10^3$	$(2,0-3,0) \cdot 10^3$
Кадмий	$1,7 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	50	$(1,0-20,0) \cdot 10^3$	$(5,0-140) \cdot 10^2$

Вклад атмосферных выпадений свинца в его общий поток в Мировой океан в настоящее время уже превышает геохимический вклад этого элемента с речными стоками. Для кадмия поступления в океан за счет атмосферных выпадений и прямого стока с суши близки, а для ртути атмосферный поток составляет около 25 % общего поступления в океанскую среду. Сейчас уже признано, что главным источником поступления тяжелых металлов в окружающую среду является не металлургическое производство, а сжигание угля. Ежегодное сжигание 2,4 млрд. т каменного и 0,9 млрд. т бурого угля рассеивает в окружающей среде 200 кт мышьяка и 224 кт урана, а мировое производство этих металлов составляет только 40 и 30 кт соответственно.

Как уже сказано выше, важную роль в загрязнении гидросферы металлами играют сточные воды. В табл. 26 приведено содер-

жание металлов в бытовых и некоторых видах промышленных сточных вод.

Таблица 26

Содержание металлов в промышленных сточных водах Нью-Йорка, средние концентрации в мкг·л<sup>-1</sup> (по Jackson, 1991)

Промышленность	Cu	Cr	Ni	Zn	Cd
Мясоперерабатывающая	150	150	70	460	11
Жироперерабатывающая	220	210	280	3 890	6
Рыбообработывающая	240	230	140	1 590	14
Хлебная	150	330	430	280	2
Пищевая	350	150	110	1 100	6
Пивная	410	60	40	470	5
Безалкогольная	2 040	180	220	2 990	3
Производство мороженого	2 700	50	110	780	31
Текстильная	37	820	250	500	30
Меховая	7 040	20 140	740	1 730	115
Парфюмерная	160	280	100	800	27
Прачечные	1 700	1 220	100	1 750	134
Автомойки	180	140	190	920	18

На пути от мест попадания в воду до океана значительная часть металлов оседает на дне рек. Пример приведен в табл. 27.

Таблица 27

Концентрации тяжелых металлов в воде и осадках р. Рур в Эссене (по Imhoff, 1991)

	В воде (мкг·л <sup>-1</sup> )	В осадках (мг·кг <sup>-1</sup> сухого веса)
Cu	25	100
Ni	30	50
Zn	200	300
Cr	10	100
Pb	6	100
Cd	0,6	3

Кроме того, значительная часть металлов на пути к океану задерживается в водоемах – как в их донных осадках (табл. 28), так и в биоте (табл. 29).

Таблица 28

Поступление металлов в оз. Мичиган ( $\text{т}\cdot\text{год}^{-1}$ ) (по Jackson, 1991)

Элемент	Из воздуха	С притоками	Смыв с берега	Осаждение
Cr	52–180	78–250	19–110	330–500
Cu	110–950	73–180	11–66	160–270
Pb	340–1200	56–130	12–40	460–750
Zn	700–1000	250–350	50–440	860–1700

Таблица 29

Содержание тяжелых металлов в оз. Балатон (по Salanki, 1991)

Компонент	Металл					
	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
Вода ( $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ )	<0,1	0,01– 0,2	0,1– 1,0	0,3– 4,6	0,5–5,4	0,5– 3,5
Донные осадки ( $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сухого веса)	0,03– 0,38	0,4– 3,5	10,2– 92,6	7,0– 88,0	18,0– 124,0	13,6– 47,6
Зоопланктон ( $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сухого веса)	0,04– 0,23	0,7– 2,2	9,9– 22,5	11,0– 17,6	70,1– 99,2	–
<i>Esox lucius</i> L.						
Жабры ( $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сухо- го веса)	0,1– 0,8	2,0– 10,0	0,7– 9,9	1,0– 10,1	784,0– 1458,0	8,6– 33,7
Мышцы ( $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ су- хого веса)	0,3– 0,7	1,1– 3,1	1,3– 6,2	0,3– 2,8	17,7– 39,9	2,3– 8,5
Печень ( $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сухо- го веса)	0,4– 0,7	1,0– 4,4	1,7– 5,9	11,8– 37,1	95,7– 187,0	2,7– 8,3

Естественно, что наибольшее загрязнение металлами приходится на моря и те части океана, где антропогенная активность высока. Более других загрязнены воды Персидского и Аденского заливов Индийского океана, экваториальная часть Тихого океана, воды течения Гольфстрим в Атлантике, Северное и Средиземное моря.

### ***Токсичность тяжелых металлов***

Токсичность тяжелых металлов для планктона определяется тем, что планктонные организмы (особенно фильтраторы) концентрируют металлы, которые ввиду своей неразложимости сохраняются в живых тканях неограниченное время, способствуют гибели планктонтов, а с отмершим планктоном оседают в донных отложениях. Кроме того, что они аккумулируются организмами, они концентрируются в пищевых цепях, что во многом, но не во

всем определяет разную токсичность металлов для разных групп гидробионтов (табл. 30).

Таблица 30

Степень токсичности ряда солей тяжелых металлов для некоторых водных животных

Вещество	Планктон	Ракообразные	Моллюски	Рыбы
Медь	+++	+++	+++	+++
Свинец	-	+	+	+++
Цинк	+	++	++	++
Ртуть	++++	+++	+++	+++
Кадмий	-	++	++	++++

### МЫШЬЯК

Мышьяк широко распространен в содержащих фосфаты породах и соответственно встречается в виде примесей в фосфатных удобрениях или детергентах, производимых из этого сырья. Обычные формы мышьяка в природе:  $H_3AsO_3$ ,  $As(OH)_3$ ,  $H_3AsO_4$ .

Некоторое количество мышьяка используется в качестве пестицида в виде арсенатов натрия и меди для опрыскивания плодовых деревьев. Но основными антропогенными источниками мышьяка являются сжигание угля и выплавка металлов. Если средние концентрации мышьяка в воздухе больших городов составляют  $0,01-0,56 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ , то вблизи плавильных предприятий (на расстоянии нескольких километров)  $1,5-7,9 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ , а содержание мышьяка в летучей золе угольных электростанций составляет  $43-312 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$  (Мышьяк, 1985).

### СВИНЕЦ

Ежегодно добывается примерно 3,5 Мт свинца, а с учетом повторного извлечения из отходов производство свинца составляет  $4,1 \text{ Мт}\cdot\text{год}^{-1}$ .

Загрязнение природных вод и воздуха свинцом происходит в результате процесса обжига и плавки свинцовых руд с целью получения металлического свинца, за счет выбросов отходов с производств, использующих свинец, а также при сжигании угля, древесины и других органических материалов, включая городские отходы. Кроме того, значительные количества свинца попадают в окружающую среду благодаря использованию свинцовых труб для водопроводов и свинцово-кислотных аккумуляторов.

До сих пор серьезными источниками загрязнения окружающей среды остаются алкильные соединения свинца. Только за последние 40 лет примерно 10 Мт свинца переработано в тетраэтилсвинец, который используется в качестве антидетонаторной присадки в автомобильном бензине. Из антропогенных источников свинца этот считается важнейшим. Количество свинца, ежегодно попадающего в океан в результате применения алкилсвинца в качестве антидетонатора дизельного топлива, оценивается в 25 кт.

$Pb(CH_2CH_3)_4$  добавляется в бензин, что позволяет двигателям работать при больших давлениях. В бензин добавляют также  $CH_2Cl-CH_2Cl$  и  $CH_2Br-CH_2Br$ . В результате сгорания топлива свинец попадает в атмосферу в виде аэрозольных частиц  $PbBrCl$  размером менее 2 мкм, попадающих в легкие и оседающих там.

Общее содержание свинца в водах Мирового океана составляет 2,8 Мт при средней концентрации  $2 \cdot 10^{-3}$  мкг·л<sup>-1</sup>. В гидробионтах концентрация свинца варьирует в пределах 50–20 000 мкг·кг<sup>-1</sup> сырой массы.

## РТУТЬ

Ртуть относится к числу наиболее токсичных металлов, чаще других встречаемых в окружающей среде. Ртуть – один из самых редких элементов с очень низким содержанием в земной коре. Она встречается в природе в виде красного сульфида, циннабара, черного сульфида и в виде жидкой ртути.

В окружающую среду ртуть поступает как из природных источников, так и из источников техногенного происхождения. Природная ртуть попадает в биосферу из относительно глубоких слоев земной коры благодаря вулканической, гео- и гидротермальной активности.

Главные антропогенные источники ртути:

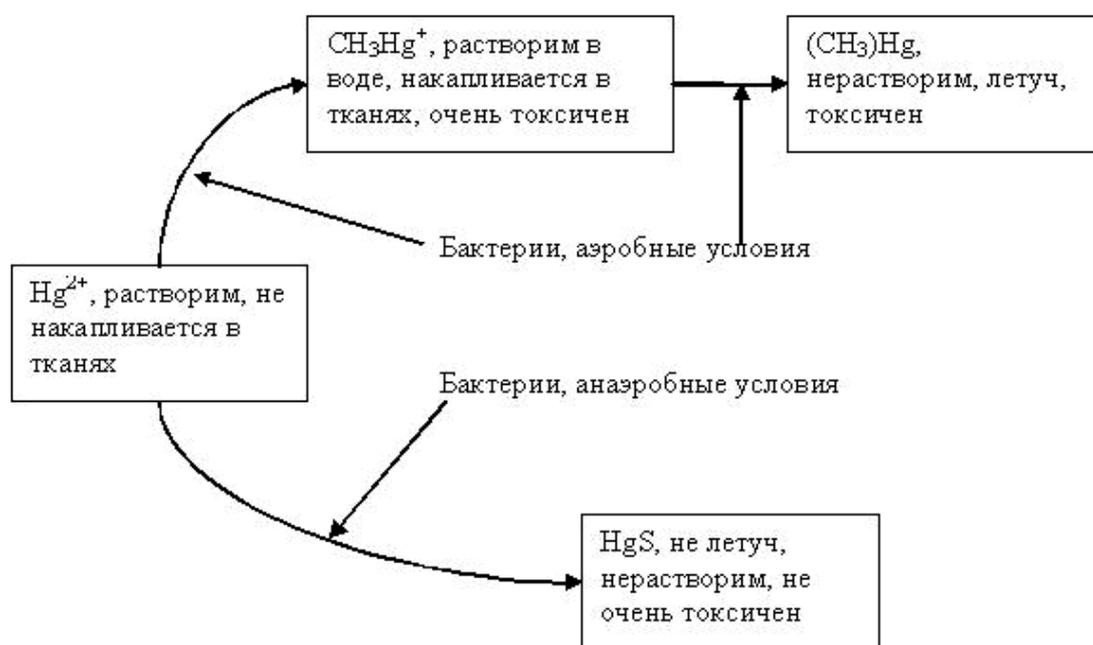
- сжигание ископаемого топлива;
- выбросы промышленных предприятий, из которых наиболее важны сбросы сточных вод с электролизных фабрик по производству хлорщелочей и едкого натра и предприятий, где сульфат ртути используется в качестве катализатора;
- использование в сельском хозяйстве различных биоцидов, содержащих ртутные соединения.

Было подсчитано, что в результате деятельности человека в окружающую среду ежегодно поступает до 10 кт ртути, из кото-

рых 3 кт – за счет сжигания ископаемого топлива. В морскую среду попадает около 5 кт ртути, общее ее количество в водах Мирового океана равно 10 Мт при средней концентрации 0,01–0,03 мкг·л<sup>-1</sup>.

Существуют бактерии, которые переводят минеральную ртуть в метилртуть (или метил) ртуть ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) (см. рис. 41).

Ртуть токсична для фитопланктона, поэтому загрязнение ртутью существенно снижает первичную продукцию морских экосистем. Фито- и зоопланктон аккумулируют ртуть в широком диапазоне концентраций 30–3800 мкг·кг<sup>-1</sup> сухой массы, показатель аккумуляции ртути может превышать 40 000.



**Рис. 41.** Поведение ртути в водной среде (до аккумуляции организмами)

Ее ПДС для водоемов принято не более 0,005 мг·л<sup>-1</sup>. В континентальных и океанических водах концентрация ртути составляет примерно 1 мкг·кг<sup>-1</sup>. Фактическое содержание ртути в водах рек промышленно развитых стран превышает ПДС в 2–4 раза, а содержание ее в тканях рыб нередко в 100–200 раз превышает такое в природных водах. В тканях, например тунца, концентрация может достигать 120 мкг·кг<sup>-1</sup>.

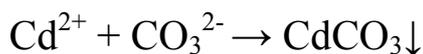
Отходы, содержащие ртуть, обычно скапливаются в донных отложениях заливов или эстуариях рек. Дальнейшая ее миграция сопровождается накоплением метиловой ртути и ее включением в трофические цепи водных организмов (особенно крабов и рыб). Например, в канадских озерах Сент-Клэр концентрация ртути в рыбах составляла 2–4 мг·кг<sup>-1</sup>, в мышцах большой голубой цапли 23 мг·кг<sup>-1</sup>, в печени – 175 мг·кг<sup>-1</sup> (Рамад, 1981).

#### КАДМИЙ

В природе кадмий, как правило, ассоциирован с цинком и их разделение экономически нерентабельно.

Ежегодно во всем мире добывается до 18 кт кадмия (Израэль, 1989). Кадмий широко используется в электронной промышленности, производстве пластмасс, красителей, растворителей. Наиболее известно его использование в никеле-кадмиевых аккумуляторах.

В окружающей среде кадмий присутствует в виде двухвалентного иона, осаждаемого в виде карбоната:



В кислой среде ионы кадмия освобождаются:



К основным антропогенным источникам поступления кадмия в окружающую среду относятся горнорудные и металлургические предприятия, а также сточные воды. Курение поставляет в окружающую среду 6–11 т кадмия ежегодно (Гадаскина, 1988).

Все воды Мирового океана содержат примерно 140 Мт кадмия при средней концентрации 0,1 мкг·л<sup>-1</sup>. Кадмий накапливается водными животными, но не концентрируется в пищевых цепях (Израэль, 1989). Концентрация кадмия в разных гидробионтах изменяется от 50 до 550 тыс. мкг·кг<sup>-1</sup> сухой массы. У некоторых видов устриц, например, коэффициент накопления кадмия равняется 318 тыс. (Эрхард, 1984).

Кадмий – один из самых опасных токсикантов. Токсичность кадмия связана со схожестью его химических свойств с цинком. При этом он связывается с серой более прочно, чем цинк и, следовательно, вытесняет цинк из многих ферментов, в которых тот используется как ко-фактор. Естественно, эти ферменты прекращают функционировать.

## 19.2. Синтетические органические вещества

С середины XX в. во всем мире значительно увеличилось производство синтетических органических соединений. Если в 1950 г. в мире производилось 7 Мт, в 1970 – 63 Мт, то в 1985 – уже 250 Мт (Израэль, 1989).

### ХЛОРИРОВАННЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ

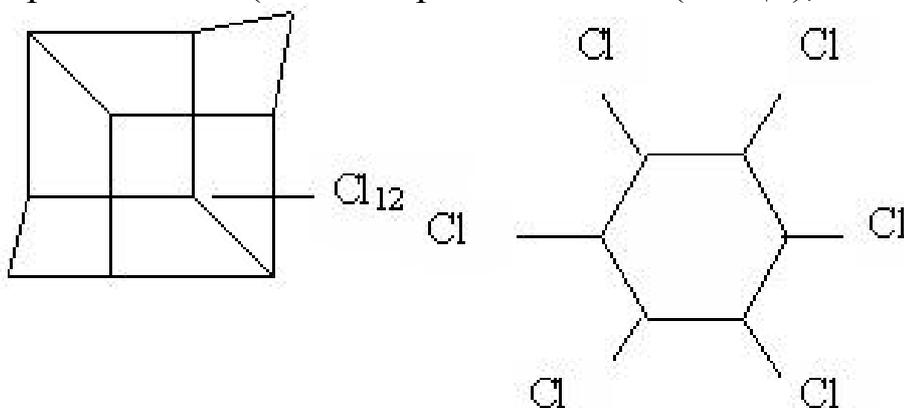
Наибольшую опасность для окружающей среды представляют ксенобиотики – антропогенно синтезированные вещества чуждые биосфере, в том числе высокомолекулярные органические вещества, такие как хлорированные углеводороды.

В состав группы хлорированных углеводородов входит несколько основных классов:

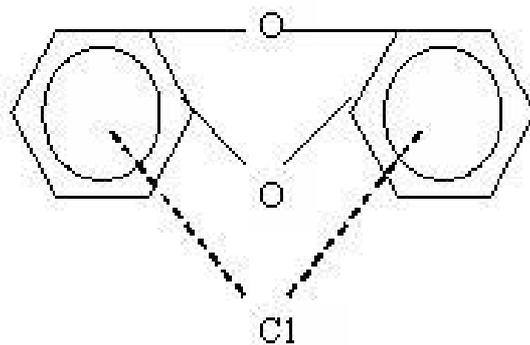
- хлорированные бифенилы – смесь бифенилов, частью или полностью замещенных атомами хлора (ПХБ);
- алифатические хлорированные углеводороды, включающие циклические (например, гексахлорциклогексан (ГХЦГ)) и нециклические (например, дихлорэтан) углеводороды;
- ароматические хлорированные углеводороды (ДДТ, гексахлорбензолы (ГХБ));
- хлорированные продукты диенового синтеза (альдрины, дильдрин).

Большая часть этих соединений до сих пор используется разными странами как пестициды: гексахлорбензолы (ГХБ), гексахлорциклогексаны (ГХЦГ), особенно  $\gamma$ -изомер (линдан), ДДТ.

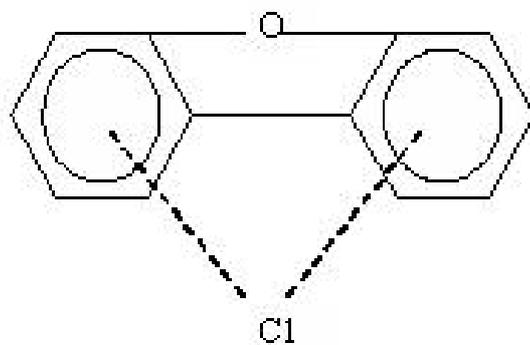
Мирекс и НСН (гексахлороциклогесан (ГХЦГ), линдан)



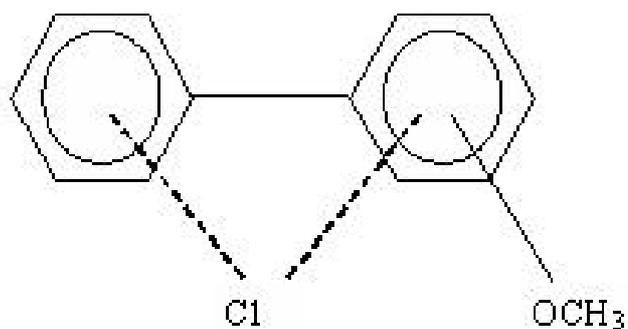
Полихлорированные диоксины (ПХДД)



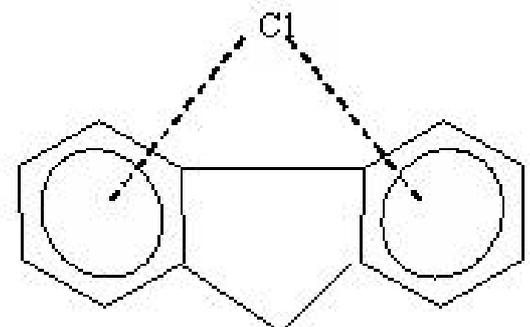
Полихлорированные дибензофураны (ПХДФ)



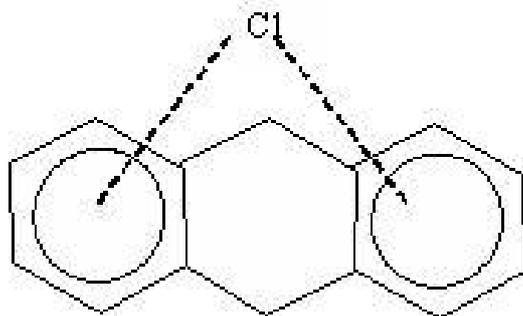
Полихлорбифенилазолы (ПХБА)



Полихлорфлуорены (ПХФ)



## Полихлордигидроантрацены (ПХДГА)



Наиболее изучены среди хлорированных углеводородов ПХБ, поскольку они представляют особый интерес по следующим причинам: большие масштабы производства и широкое применение в промышленных и бытовых материалах; высокая устойчивость к биodeградации и, следовательно, способность к биоаккумуляции; токсичность.

ПХБ применяют в качестве диэлектриков в трансформаторах и крупных конденсаторах, в системах теплопередачи и гидравлических системах, они входят в состав смазочных и охлаждающих масел, пестицидов, а также используют в качестве пластификаторов в красителях, в копировальной бумаге, клеях, замазках и пластических массах.

Поскольку ПХБ столь широко применяются в материалах, используемых современной цивилизацией, в бытовом и промышленном мусоре содержится много ПХБ. Очевидно, что кроме целенаправленного внесения ПХБ в окружающую среду как пестицидов, большое количество их попадает в воздух и, соответственно, в воду и почву в результате сжигания мусора на мусоросжигающих заводах. В Британии, например, сжигание мусора ответственно за 60–85 % общего загрязнения среды ПХБ (Ryder, 1999). «Зеленые» часто с торжеством указывают на тот факт, что при анализе тканей египетских мумий в них не обнаружено диоксинов и других ПХБ. Это совершенно естественно, поскольку ПХБ – продукт современной цивилизации, во многом основанной на материалах, содержащих ПХБ. О масштабах производства и распространения ПХБ в современном мире можно судить по данным табл. 31. Видно, что из всех произведенных ПХБ примерно третья часть находится в окружающей среде, из них, около 2 % аккумулировано биотой. Львиная доля ПХБ в окружающей среде

сосредоточена в пресноводных и прибрежных донных отложениях и в водах открытого океана.

Таблица 31

Оценка распределения ПХБ в окружающей среде в глобальном масштабе (пересчитано на 2000 г. по Израэль, 1989)

Среда	Содержание ПХБ		
	тонн	%	%
Пресноводные и прибрежные морские экосистемы			
Атмосфера	750–850	0,31	
Реки и озера	5 250–5 950	0,94	
Морские воды	3 600–4 080	0,64	
Почва	3 600–4 080	0,64	
Донные осадки	195 000–221 000	35	
Биота	6 450–7 310	1,1	
Итого (А)	214 500–243 100	39	
Экосистемы открытого океана			
Атмосфера	1 185–1 343	0,21	
Морская вода	345 000–391 000	61	
Донные отложения	165–187	0,03	
Биота	405–459	0,07	
Итого (Б)	346 500–392 700	61	
Всего в окружающей среде (А+Б)	561 000–635 800	100	31
Разложено и сожжено	64 500–73 100		4
Применяется в промышленности	1 174 500–1 331 100		65
Мировое производство	1 800 000–2 040 000		100

ПХБ, как было сказано выше, токсичны. Прямых доказательств этого, тем не менее, нет. Данные о токсичности диоксинов противоречивы. На компоненты природных экосистем диоксины далеко не всегда оказывают катастрофическое действие. Например, воздействие диоксинов в течение 14 лет не оказало никакого статистически значимого воздействия на размер популяции и удельную скорость роста обыкновенного баклана (*Phalacrocorax carbo*) пруда Шинобазу (Япония) (Murata, 2003).

### 19.3. Пестициды

Пестициды – необходимый компонент современного сельского хозяйства. Мировые потери урожая от болезней, вредителей, сорняков составляют:

- зерновых – 510 Мт;
- сахарной свеклы – 569 Мт;
- сахарного тростника – 567 Мт;
- картофеля – 129 Мт.

Без применения пестицидов урожайность в мире снизилась бы:

- для картофеля – на 37 %;
- для капусты – на 22 %;
- для яблок – на 10 %;
- для персиков – на 9 %.

Для борьбы с вредителями и болезнями сельскохозяйственных культур сначала использовали вещества, содержащие тяжелые металлы, такие как свинец, мышьяк и ртуть. Эти неорганические соединения называют пестицидами первого поколения.

Современные пестициды представляют собой большую группу органических веществ, токсичных для разного рода нежелательных организмов. По механизму биологического действия они подразделяются на: зооциды; инсектициды; эцициды; акарициды; родентициды; лимациды; нематоциды; фунгициды; бактерициды; гербициды; дефолианты; дефлоранты; десиканты (для высушивания листьев на корню); фумиганты (для окуривания угодий или помещений); ретарданты (для регуляции роста и развития растений); репелленты (для отпугивания насекомых, грызунов); аттрактанты (для привлечения насекомых с последующим уничтожением).

Сегодня в мире в среднем на 1 га наносится 300 г химических средств защиты растений.

Оказалось, что использование органических пестицидов связано с целым рядом проблем. Их можно разделить на четыре категории:

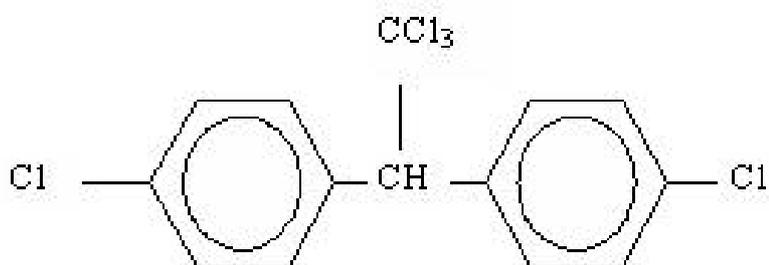
- развитие устойчивости у вредителей;
- возрождение вредителей и вторичные вспышки численности;
- рост затрат;
- нежелательное воздействие на окружающую среду.

Успехи применения пестицидов в 1950–70-е гг. вызвали интерес к использованию аналогичных методов в водном хозяйстве.

Стали исследовать возможность применения гербицидов, альгицидов, моллюскицидов, ихтиоцидов и других биоцидов для подавления или сокращения численности «сорных» и «вредных» гидробионтов. Неприятной неожиданностью стало то, что в водных экосистемах отрицательные последствия применения пестицидов оказались даже резче и острее, чем в экосистемах наземных.

### *ДДТ*

В поисках средства борьбы с вредителями швейцарский химик Пауль Мюллер начал систематически изучать воздействие некоторых органических веществ на насекомых в 1930 г. К 1938 г. он натолкнулся на дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ), который впервые был синтезирован еще в 1874 г.:



ДДТ неожиданно стал долгожданным «чудо-оружием», веществом, чрезвычайно токсичным для насекомых и относительно безвредным для человека и других млекопитающих. Он обладал широким спектром действия, т. е. его можно успешно использовать против очень многих видов насекомых-вредителей. Кроме того, ДДТ оказался стоек, т. е. с трудом разрушался в окружающей среде и обеспечивал продолжительную защиту от вредителей. Это его свойство давало дополнительную экономию, так как отпадала необходимость в затратах труда и материала на неоднократные обработки. Фермеры смогли отказаться от других, более трудоемких методов борьбы, в частности севооборота и уничтожения остатков прошлогодних культур. Еще одним положительным качеством ДДТ стала дешевизна его производства. В разгар использования ДДТ в начале 1960-х г. фунт препарата стоил не более 20 центов (Небел, 1993).

В первое время ДДТ был настолько эффективен, что снижение численности вредителей во многих случаях привело к резкому росту урожаев. Стало возможным выращивать менее устойчивые к вредителям, но более урожайные сорта, распространить некото-

рые культуры в новые климатические зоны, где ранее они были бы погублены насекомыми.

Мало того, из-за широкого спектра инсектицидного действия ДДТ стал эффективным средством борьбы с насекомыми, переносчиками инфекции. Во время Второй мировой войны его использовали против вшей, распространявших сыпной тиф среди солдат, находившихся в антисанитарных фронтовых условиях. Благодаря ДДТ это была первая из больших войн, в которой от тифа погибло меньше людей, чем от боевых ранений. Всемирная организация здравоохранения распространила ДДТ в тропических странах для борьбы с комарами и достигла заметного сокращения смертности от малярии. Вне всякого сомнения, ДДТ спас миллионы жизней.

В 1948 г. Пауль Мюллер, вполне заслуженно, получил за свое открытие Нобелевскую премию. В 1970-е гг. когда выяснилось, что ДДТ благодаря своей устойчивости быстро накапливается в пищевых цепях и опасен для людей, использование ДДТ было запрещено в большинстве развитых стран. В бывшем СССР ДДТ продолжал использоваться в количествах, официально не превышающих ПДК (для воды/почвы – не более  $0,1 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}/\text{кг}^{-1}$ ). В настоящее время в биосфере находится ориентировочно 1 Мт ДДТ (Мазур, 1996).

### ***Поступление пестицидов в гидросферу и его последствия***

Пестициды поступают в водоемы с дождевыми и талыми водами (поверхностный сток), после авиа- и наземной обработки сельскохозяйственных угодий, лесов и водоемов пестицидами, с дренажно-коллекторными водами, образующимися при выращивании хлопка и риса, со сточными водами предприятий, производящими эти вещества. В составе мирового поверхностного стока содержится не менее 2 Мт инсектофунгицидов и других пестицидов органической природы, которыми ежегодно обрабатываются посевы и насаждения сельскохозяйственных культур.

Использование ПХБ в качестве пестицидов обуславливает значительно большее загрязнение ими окружающей среды, чем поступление из других источников. Так, например, доля диоксинов в донных осадках Токийского залива, попавших туда из-за использования пестицидов, оказалась в 5 раз выше, чем благодаря поступлению из других источников (Masunaga, 2003).

Стойкие пестициды (ДДТ и др.) способны к биоаккумуляции. Как правило, в воде часть их находится в растворенном виде в малых и ультрамалых концентрациях, порядка нг или мкг·л<sup>-1</sup> воды, но значительно большая их доля адсорбирована на неорганических и органических частицах, на поверхности тел организмов бактерио-, фито- и зоопланктона. Гидробионты-фильтраторы, поглощая взвеси непосредственно из воды и выедавая фито- и бактериопланктон, накапливают пестициды в своих тканях и передают их в последующие звенья трофических цепей – рыбам. При отмирании планктон оседает на дно и загрязняет донные отложения. Донные отложения служат пищей организмам детритофагам, поедание которых рыбами бентофагами обеспечивает накопление пестицидов уже в их тканях. Таким образом, происходит загрязнение пестицидами двух основных подсистем водной экосистемы: пастбищной и детритной цепей питания.

Эта вероятность концентрирования веществ в достаточно длинных цепях пресноводной или морской среды представляет наиболее опасное последствие загрязнения вод пестицидами.

В качестве наиболее известного примера потрясений, вызванных заражением вод хлорорганическими инсектицидами можно привести катастрофу на оз. Клир-Лейк в Калифорнии. В 1949, 1954, 1957 гг. озеро было обработано ТДЕ (соединение типа ДДТ) с целью уничтожения комаров (*Chaoborus astictopus*). Озеро было обработано относительно слабыми дозами ТДЕ (14 мкг·л<sup>-1</sup>). После распыления препарата его концентрация в планктоне составляла 5 мг·кг<sup>-1</sup>, т. е., в 30 раз выше. В жировой прослойке и мышцах сомика (*Ameiurus catus*), выловленного в 1958 г., содержалось соответственно 1700–2375 (в 1000–1500 раз выше, чем в воде) и 22–221 мкг·кг<sup>-1</sup> этого вещества. Результатом этого стало быстрое уменьшение колонии западных поганок (*Aechmophorus occidentalis*) – птиц, населяющих это озеро и потребляющих в пищу только рыбу. Из 1000 гнездящихся пар после обработки препаратом осталось лишь 30, и те оказались почти стерильными. В тканях мертвых птиц содержалось до 2500 мг·кг<sup>-1</sup> ТДЕ, т. е. в 500 раз выше, чем в планктоне и в 15 тыс. раз выше, чем в воде (Рамад, 1981). Другой пример накопления трех разных пестицидов в пищевых цепях оз. Онтарио приведен в таблице 32. В таблице 33 приведены усредненные данные по накоплению ДДТ компонентами озерной экосистемы средних широт.

Понятно, что аккумуляция пестицидов происходит не только в пресноводных экосистемах, но и в океанских. В качестве примера могут служить концентрации трех пестицидов и коэффициенты их накопления в тихоокеанских животных (см. табл. 34, 35).

Таблица 32

Содержание пестицидов в организмах в оз. Онтарио  
(мкг·кг<sup>-1</sup> сухого веса/л) (по Allan, 1991)

	ДДТ	Мирекс	Линдан
Вода	0,3–57	0,1	0,4–11
Донные осадки	25 000–218 000	144 000	46 000
Бентос	440 000–1 088 000	41 000–228 000	?
Планктон	63 000–72 000	12 000	12 000
Рыбы	620 000–7 700 000	50 000–340 000	2 000–360 000
Яйца птиц	7 700 000–34 000 000	1 800 000–6 350 000	78 000

Таблица 33

Биологическое концентрирование ДДТ в пресноводных экосистемах  
(по Jørgensen, 1992)

Компонент	Концентрация ДДТ, мг·кг <sup>-1</sup> сч. в.	Коэффициент накопления
Вода	0,000003	1
Фитопланктон	0,0005	160
Зоопланктон	0,04	13 000
Мелкие рыбы	0,5	167 000
Крупные рыбы	2	667 000
Рыбоядные птицы	25	8 500 000

Таблица 34

Средняя концентрация в морской воде и гидробионтах (мкг·кг<sup>-1</sup>)  
хлорированных углеводородов в Тихом океане (по Израэль, 1989)

Объект	ПХБ	ДДТ	Линдан
Океанская вода	0,04–0,59	0,006–0,48	0,52–8,2
Зоопланктон	1,8	1,7	0,26
Миктофиды <sup>1</sup>	48	43	2,2
Кальмары	35–95	16–28	0,93–1,5
Полосатый дельфин	2800–4100	4200–6000	48–89

<sup>1</sup> Светящийся анчоус.

Таблица 35

Коэффициент накопления хлорированных углеводородов в Тихом океане  
(по Израэль, 1989)

Объект	ПХБ	ДДТ	Линдан
Зоопланктон	$6,4 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^2$
Миктофиды	$1,7 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^5$	$10^3$
Кальмары	$2,4 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^2$
Полосатый дельфин	$1,3 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^4$

Надо отметить, что ПХБ накапливаются и в организмах типичных сухопутных животных (Hoekstra, 2003). Постоянное накопление в воде хлорорганических пестицидов представляет серьезную угрозу для жизни не только животных, но и людей (табл. 36).

Таблица 36

Концентрации ДДТ ( $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  с. в.) (по Jørgensen, 1992)

Объект	Концентрация
Атмосфера	0,000 004
Дождевая вода	0,0002
Атмосферная пыль	0,04
Возделываемые почвы	2,0
Пресная вода	0,00001
Морская вода	0,000001
Трава	0,05
Водные макрофиты	0,01
Фитопланктон	0,0003
Наземные беспозвоночные	4,1
Водные беспозвоночные	0,001
Пресноводные птицы	2,0
Морские птицы	0,5
Глотатели	2,0
Травоядные млекопитающие	0,5
Хищные млекопитающие	1,0
Человеческая пища, растительная	0,02
Человеческая пища, животная	0,2
Человек	6,0

#### 19.4. Синтетические поверхностно-активные вещества

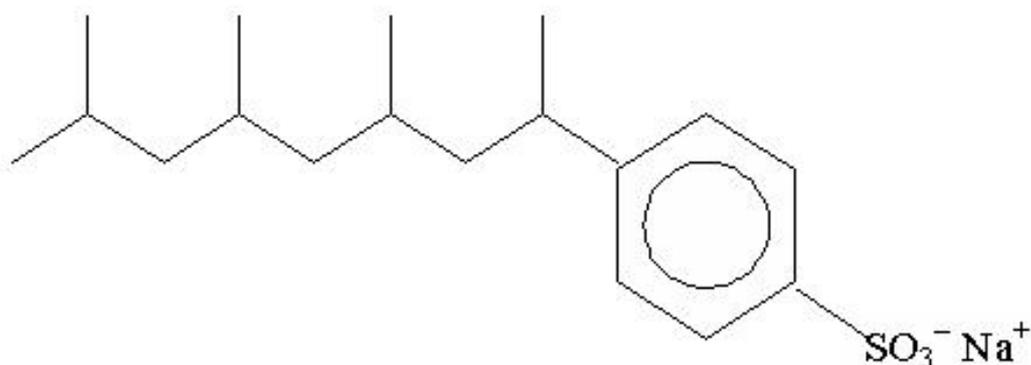
Обычные мыла изготавливаются нагреванием сала с каустической содой. Основной активный компонент такого мыла – стеарат натрия:  $(\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{CO}-\text{O})-\text{Na}^+$ , легко разлагается в водной среде и представляет опасность для окружающей среды не боль-

шую, чем другие легкоокисляемые органические вещества, входящие в состав бытовых сточных вод.

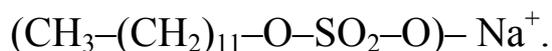
Но с 1950-х гг. начали применяться более эффективные синтетические моющие средства (СМС). В таких моющих средствах содержатся активные соединения – сурфактанты (детергенты), обладающие более сильными поверхностно-активными свойствами, чем «натуральное» мыло. Кроме того, СМС или синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) лучше стирают в жесткой воде, в которой применение обычного мыла, как известно, затруднено.

Обычно такое поверхностно-активное вещество растворено в триполифосфате натрия или в четырехзамещенном трифосфате натрия. Если мыло в воде подвергается полному гидролизу и разлагается до легко усвояемых водной микрофлорой соединений, то СМС обладают многими нежелательными свойствами (вспенивание воды, возникновение кислородного дефицита, токсичность для гидробионтов). Кроме того, входящие в состав СМС фосфатные наполнители вызывают эвтрофирование водоемов. В связи с последней опасностью в настоящее время фосфорсодержащие детергенты в развитых странах заменены сульфатсодержащими веществами, например такими как

алкилбензолсульфонат натрия (Эткинс, 1991):



лорилсульфат натрия:

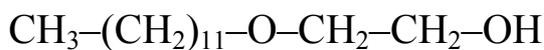


Кроме того, они содержат добавочные ингредиенты: ароматизирующие вещества, отбеливающие реагенты (персульфаты, пербораты), токсичные для водных организмов.

В настоящее время СПАВ – одни из самых распространенных химических загрязнителей водоемов. Они поступают в водные объекты в результате их широкомасштабного применения с бытовыми, промышленными и сельскохозяйственными стоками. В сельском хозяйстве поверхностно-активные вещества используются для эмульгирования пестицидов. В подземные воды поверхностно-активные вещества попадают в результате применения почвенных методов очистки сточных вод, при пополнении запасов подземных вод из открытых водоемов и при загрязнении почвы этими веществами.

Среднее потребление детергентов на одного жителя планеты составляет  $2,5 \text{ г} \cdot \text{сут}^{-1}$ . При нормах водоотведения в пределах 125–350 л на человека в сутки среднее расчетное содержание поверхностно-активных веществ в бытовых сточных водах колеблется в пределах  $7,1\text{--}20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

Кроме описанных выше ионных детергентов, производятся и неионные детергенты. Примером их может служить полиоксиэтилен (Эткинс, 1991):



Их используют, как правило, для эмульгации нефтяных загрязнений больших масштабов.

Поверхностно-активные вещества – «экологически жесткие» вещества. На их окисление расходуется много растворенного кислорода, который, таким образом, отвлекается от процессов биологического окисления. Кроме этого косвенного вреда, детергенты оказывают и прямое токсическое действие на водных животных. Они нарушают функции биологических мембран. Это вызывает жаберные кровотечения и удушье у рыб и беспозвоночных животных. Для теплокровных они усиливают токсическое и канцерогенное влияние других загрязняющих веществ. Как было сказано выше, поверхностно-активные вещества бытового назначения – анионные детергенты. Обычно они менее токсичны, чем неионные (см. табл. 37). Последние особенно трудно ассимилируются природной средой и крайне отрицательно влияют на состояние водных экосистем.

Содержание в воде детергентов, приводящее к 50%-ной смертности через 48 ч среди типичных морских беспозвоночных, мг·л<sup>-1</sup> (по Сытник, 1989)

Вид	Анионные	Неионные
Полихета <i>Capitella capitata</i>	1,0–10	1,0–5,0
Полихета <i>Scolepsis fuliginosa</i>	10–25	0,5–5,0
Креветка <i>Crangon crangon</i>	100	33–100
Изопода <i>Sphaeroma serratum</i>	800	10–100
Мидия <i>Mutilus galloprovincialis</i>	800	1,0–25
Моллюск <i>Cardium edule</i>	10–33	10–100

Рассмотренные материалы свидетельствуют об опасности внесения в гидросферу, несвойственных для нее веществ. Для любого органического вещества, производимого биосферой (даже для бенз(а)пирена и нефтепродуктов) в природе существуют ферменты, способные это вещество разложить до минеральных компонентов. Синтетические же вещества, попав в биосферу, практически не разлагаются ею, и, накапливаясь в пищевых цепях, как и тяжелые металлы, способны представить опасность для здоровья и жизни человека.

## 20. ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ КИСЛОТНОСТИ ВОД

Закисление окружающей среды накоплением сильных кислот или веществ, образующих сильные кислоты, оказывает сильнейшее воздействие на химический режим и биоту десятков тысяч озер, рек, водосборных бассейнов в Северной Европе, на северо-востоке Северной Америки, части Восточной Азии и повсюду, хотя и в меньшей степени. Закисление вод определяется снижением нейтрализационной емкости (acid neutralizing capacity – ANC). Закисленные воды претерпевают химические и биологические изменения, меняется видовая структура биоценозов, снижается биоразнообразие и т. п. Высокая концентрация H<sup>+</sup> ведет к высвобождению из почв металлов с последующим их транспортом в

озера и болота. Высокая концентрация  $H^+$  в водотоках также ведет к высвобождению металлов, в том числе токсичных, из речных осадков.

## 20.1. Источники и распространение

Главными источниками кислотных осадков являются двуокись серы ( $SO_2$ ) и окиси азота ( $NO_x$ ), образующиеся при сжигании угля, нефти, бензина, плавка руд, содержащих серу. В целом поступление  $SO_2$  и  $NO_x$  в атмосферу из антропогенных источников в 2–3 раза превышает естественное (например, из вулканов, почв, болот, морских вод) (Galloway, 1995).

$SO_2$  и  $NO_x$  и продукты их окисления,  $SO_4^{2-}$  и  $NO_3^-$ , в среднем, живут в атмосфере 1–3 дня. При средней скорости переноса  $400 \text{ км} \cdot \text{сут}^{-1}$ , они могут быть перенесены на расстояние от 400 до 1200 км. Окислы выпадают в виде дождя, содержащего  $H_2SO_4$  и  $HNO_3$ , и сухих осадков в форме аэрозолей или в виде газов. Измерение сухих осадков достаточно трудно. Так, при измерении баланса хлоридов в Норвегии оказалось, что в вытекающей реке хлоридов на 37 % больше, чем должно было быть по результатам измерения поступлений из атмосферы. Современные оценки доли сухого поступления – от 20 % их количества, до превышения объема жидких осадков (Kalff, 2002). Современная кислотность осадков в Северном полушарии, включая Японию и Южную Корею, увеличилась в 10–30 раз, по сравнению с доиндустриальным уровнем.

В целом,  $SO_2$  и  $NO_x$  составляют примерно половину кислотных техногенных выбросов. На третьем месте следует поставить хлорид-ионы, образуемые промышленностью, особенно мусоросжигающими печами.

### *Антропогенные выбросы окислов серы и азота*

Быстрый рост потребления минерального топлива после Второй мировой войны привел к значительному росту выбросов  $SO_2$  и  $NO_x$  в атмосферу. На востоке Северной Америки и в Европе выбросы серы выросли более чем вдвое с 1900 по 1985 гг. Контроль выбросов сделал возможным существенное снижение (>40 %) выбросов двуокиси серы к 2000 г. в США, Канаде, Западной Европе, Японии.

Антропогенные выбросы  $NO_x$  связаны, в первую очередь, с окислением газообразного азота в двигателях внутреннего сгора-

ния, а не с самим топливом. В результате, закисление, вызванное окисями азота, сконцентрировано у мегаполисов. Масштабы этого загрязнения трудно оценить, поскольку оно связано со множеством мелких источников загрязнения. Тем не менее, выбросы окислов азота только на востоке США выросли в 12–20 раз в 1985 г. по сравнению с 1900 г. В отличие от окислов серы, эти выбросы не снизились, а продолжают расти (Kalff, 2002).

## 20.2. Действие кислотных осадков на окружающую среду

### *Чувствительность водоемов к повышению кислотности*

Внутренние водоемы, особенно чувствительные к повышению кислотности, характеризуются высокой прозрачностью, низкой минерализацией (проводимость ниже  $50 \text{ мС} \cdot \text{см}^{-1}$ ), относительно низким содержанием гидрокарбонат-ионов,  $\text{ANC} < 50 \text{ мкэкв} \cdot \text{л}^{-1}$ . В Восточной Канаде примерно 350 тыс. таких озер, из них уже 14 тыс. закислены ( $\text{pH} < 4,7$ ,  $\text{ANC} < 0 \text{ мкэкв} \cdot \text{л}^{-1}$ ). В Швеции примерно 85 тыс. озер площадью более 1 га, из которых закислены около 20 тыс. и 90 тыс. км закисленных водотоков. В Норвегии водоемы и водотоки закислены на площади около 33 тыс. км<sup>2</sup>.

При использовании видового состава водорослей в осадках как индикатора кислотности было показано, что большинство озер Адирондэйкских гор (США) в 1900 г. имели pH около 6,0. Сейчас pH снизился на величину от 1,0 (кислотность возросла в 10 раз) до 2,0 (кислотность возросла в 100 раз) в большинстве озер, при наибольшем росте кислотности между 1920 и 1950 гг. (Cumming et al., 1994).

Чувствительность к закислению определяется (Kalff, 2002):

- способностью почв и пород бассейна нейтрализовать поступающие кислоты;
- морфометрией озера и особенностями бассейна;
- содержанием органических кислот в смывах с бассейна;
- нейтрализующими агентами и процессами в водной системе.

Способность почв и пород водосборного бассейна нейтрализовать поступающие кислоты – определяющий фактор закисления озер в регионах с низким pH осадков. Чем больше доля карбонат-

ных пород в водосборном бассейне, тем выше устойчивость озер к закислению. В богатых карбонатами бассейнах поступающие ионы нейтрализуются, освобождая ионы кальция или магния, углекислота поступает в атмосферу. Наоборот, озера, расположенные в бассейнах, образованных изверженными породами (гранитами, базальтами, гнейсами) очень чувствительны к закислению. Озера, расположенные в изголовье бассейна, также очень чувствительны, поскольку площадь бассейна мала, слой почвы тонок, практически все осадки напрямую попадают в озеро. 3/4 из 1 180 озер, исследованных в чувствительных к закислению частях США, были закислены органическими кислотами, поступающими с водосбора (Baker et al., 1991). В Финляндии большое число озер закислено по той же причине (Finnish lake..., 1991). В бассейнах, сложенных изверженными породами,  $\text{HCO}_3^-$  высвобождается в процессах выветривания. Некоторое количество водород-ионов связывается при растворении гидроксидов и оксидов алюминия, двуокси кремния. Часть заменяет катионы в частичках почвы. Буферные свойства почв определяются: долей силикатов и глинистых веществ, способных к выветриванию; долей отрицательно заряженных частиц почвы, связанных с  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , которые могут заменяться на  $\text{H}^+$ ; временем контакта воды с почвой, зависящим от толщины и структуры почвенного покрова.

### ***Буферная емкость озер, рек и болот***

Процессы, воздействующие на буферную, или нейтрализационную емкость вод (ANC), приведены в табл. 38.

Нейтрализационная емкость вод определяется, в упрощенной форме, как

$$\text{ANC} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] \pm [\text{Al}^-] - [\text{H}^+] - \text{У} [\text{Al}^+],$$

где

$$\text{У} [\text{Al}^+] = 3 [\text{Al}^{3+}] + 2 [\text{AlOH}^{2+}] + [\text{Al}(\text{OH})_2^+].$$

Кроме того, обменная

$$\text{ANC} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{NH}_4^+] - [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Cl}^-] - [\text{NO}_3^-].$$

Таблица 38

Процессы, воздействующие на ANC, выраженную в молях потребленного  $\text{CH}_2\text{O}$  ( $\Delta \text{ANC}$ , органическая) и на моль восстановленного неорганического субстрата ( $\Delta \text{ANC}$ , неорганическая) (Kalff, 2002)

Процессы	Реакция	$\Delta \text{ANC}$ С, орг.	$\Delta \text{ANC}$ С, неорг.
Выветривание	$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	–	+2
	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_4$	–	+2
	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}^+ \leftrightarrow 2\text{Al}^{3+} + 6\text{H}_2\text{O}$	–	+6
Ионообмен	$2\text{ROH} + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{R}_2\text{SO}_4 + 2\text{OH}^-$	–	+2
	$\text{NaR} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{HR} + \text{Na}^+$	–	+1
Денитрифика- ция	$2\text{CH}_2\text{O} + \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ \leftrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O}$	+1	+2
	$5\text{CH}_2\text{O} + 4\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ \leftrightarrow 5\text{CO}_2 + 2\text{N}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$	+0,8	+1
Восстановление марганца	$\text{CH}_2\text{O} + 2\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{Mn}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	+4	+2
Восстановление железа	$\text{CH}_2\text{O} + 4\text{FeO}(\text{OH}) + 8\text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + 4\text{Fe}^{2+} + 7\text{H}_2\text{O}$	+8	+2
Восстановление сульфата	$2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$	+1	+2
Нитрификация	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$	–1	–2
Окисление мар- ганца	$2\text{Mn}^{2+} + \text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$	–4	–2
Окисление же- леза	$4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 4\text{FeO}(\text{OH}) + 8\text{H}^+$	–8	–2
Окисление сульфидов	$\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	–1	–2
Окисление пи- рита	$\text{FeS}_2 + 3\text{O}_2 + 3\text{SH}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$	–1,1	–4

### *Действие закисления на водную биоту*

Закисление практически не сказывается на обилии гетеротрофных бактерий в планктоне. Не отмечено и изменения минерализационной активности бактерий.

Отмечается замена некоторых макрофитов, например *Lobelia* и *Isoetes* на мхи рода *Sphagnum*. Наблюдается массовое развитие

нитчатых зеленых водорослей. Число видов фитопланктона уменьшается, но ни биомасса фитопланктона, ни продукция не снижаются. Золотистые, другие мелкие жгутиковые и диатомовые вытесняются динофитовыми водорослями. Биомасса зоопланктона меняется мало, но чувствительные виды замещаются устойчивыми к загрязнению. Происходит замена крупных форм мелкими.

В зообентосе снижается доля гаммарид, моллюсков, тогда как водяные ослики сохраняются, не меняется биомасса хирономид, водяных жуков, клопов. Чувствительны к закислению личинки целого ряда насекомых (ручейников, поденок, верблюдонок). Чувствительна к закислению ихтиофауна, особенно форель. При  $pH < 5,0$  рыбы, как правило, отсутствуют (Comparison..., 1991; Experimental acidification..., 1993).

### **20.3. Борьба с закислением**

Практикуют снижение кислотности вод добавками известняка. Нужно примерно  $5 \text{ г л}^{-1}$  известняка, чтобы поднять  $pH$  с 4,5 до 6,5. Между 1976 и 1982 гг. в Швеции примерно 6 500 озер и 6 тыс. км рек были обработаны известняком. В США ежегодно используется 200 тыс. т известняка, что обходится в \$ 25 млн. Достижимые результаты временны и сопровождаются серьезным стрессом для экосистем (быстрый подъем  $pH$  и осаждение растворенных металлов). Уменьшается прозрачность, соответственно, глубина фотического слоя и продукция бентосных водорослей. Происходит изменение трофической структуры сообщества (Gunn, Mills, 1998). Зоопланктон в обработанном озере восстановился через 10 лет после обработки ( $pH$  поднялся с 5,7), но в более закисленном озере не восстановился и через 15 лет ( $pH$  был ниже 4,5) (The recovery..., 1996).

Предлагается и удобрение (эвтрофирование) озер для увеличения поглощения  $CO_2$  и соответственного поднятия  $pH$  (Davison et al., 1995).

#### ***Перспективы***

После того как горнодобывающий комплекс возле Садбери (Канада), бывший крупнейшим в мире точечным источником выбросов двуокиси серы, снизил выбросы на 80 % (до  $5 \cdot 10^5 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$ ), местные озера постепенно восстановились (Keller, Gunn, 1995). Например, в Лебедином озере  $pH$  вырос с 4,0 до 5,6, прозрачность

воды снизилась, восстановилась популяция форели (Gunn, Mills, 1998). После снижения в Центральной Европе выбросов азота на 30 % и серы на 40 %, произошедших после 1989 г., гидрохимические показатели горного озера в Чехии вернулись в норму (Reversibility of acidification..., 1998).

Анализ трендов для 111 озер в Восточной Канаде не обнаружил изменений для 60, показал продолжающееся закисление для 17 и только для 34 показал изменения в сторону улучшения (Regional precipitation..., 1995). Перспективы восстановления озер в Европе вселяют еще меньший оптимизм (Regional trends..., 1999).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор хочет верить, что прочтение учебного пособия помогло студенту освоить главные теоретические и методологические основы гидробиологии и водной экологии, ознакомиться с тем, как выполняются гидробиологические и водноэкологические исследования; усвоить комплекс базовых знаний по гидробиологии и водной экологии.

Автор надеется, что смог довести до читателя понятийный аппарат и основополагающие принципы гидробиологии и водной экологии, а также предметно-содержательную основу курса. Кроме того, автор попытался систематизировать знания о населении водоемов и экологическом состоянии водных объектов в соответствии с современными требованиями к исследованию водных экосистем. Необходимо помнить, что курс является одним из основных предметов в системе подготовки студентов-экологов и гидрологов биологического, географического и гидрометеорологического профиля. Водная экология как формализованный целостный подход стала самостоятельным разделом общей экологии в результате развития гидробиологии, системологии, синэргетики, современных формальных математических методов, информатики, обработки данных на ПЭВМ и т. д., а также формального упрощения и моделирования водных экосистем.

Учебное пособие, как полагает автор, осветило основные принципы экологии, применительно к водной среде, главные этапы развития гидробиологии, современные воззрения на организацию и функционирование водных экологических систем, теоретические основы гидробиологии и главные направления практического применения гидробиологических знаний.

Автор сознательно опустил очень многие разделы, как хорошо освещенные в других учебниках гидробиологии, так и основательно изучаемые в курсе общей экологии. Основной упор сделан именно на те разделы гидробиологической науки, которые слабо освещаются или вообще опускаются другими пособиями.

## **ПРИМЕРНЫЕ ВОПРОСЫ К СЕМИНАРСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

### I

1. Предмет, цель, методы исследований гидробиологии.
2. Предмет, цель, методы исследований водной экологии.
3. Место гидробиологии и водной экологии в системе наук.
4. История развития. Основные направления гидробиологии.
5. Общая и прикладная гидробиология.

### II

6. Биоценозы. Структура биоценозов.
7. Потоки энергии в экосистемах.
8. Круговорот вещества в экосистемах.

### III

9. Водотоки и водоемы.
10. Горизонтальное деление озер: литоральная и пелагическая зоны.
11. Вертикальное деление озер: фотическая и афотическая зоны.
12. Пруд и озеро. Ручей и река.
13. Характеристики озер: наибольшие длина, ширина, глубина; площадь водного зеркала, объем, средняя глубина; длина береговой линии, развитие береговой линии; сток, водообменность.
14. Характеристики рек: сток, водность, скорость течения.
15. Морфометрическое разнообразие озер.

### IV

16. Происхождение озер.
17. Генетическая классификация озер.
18. Терминология: стратификация, эпилимнион, металимнион (термоклин), гипolimнион.
19. Сезонное «нормальное» поведение озера.
20. Классификация озер по Форелю.
21. Классификация озер по Хатчинсону.

## V

22. Структурные и функциональные особенности водных экосистем.

23. Главные биотопы в водоеме: водная масса и границы.

24. Сообщество толщи вод с биоэкологической точки зрения: продуценты, консументы, редуценты.

25. Сообщество толщи вод с лимнологической точки зрения: планктон и нектон.

## VI

26. Первичная продукция и методы ее определения.

27. Классификация водоемов по величине первичной продукции.

28. Продукция и деструкция, их соотношение в водных экосистемах циклического и транзитного типов.

29. Продукция биоценозов.

## VII

30. Водные экосистемы циклического, транзитного и каскадного типов.

31. Возвратное и безвозвратное потребление воды.

32. Загрязнение вод: источники, предотвращение, борьба с ним.

## VIII

33. Источники поступления и образования в водоемах биогенных элементов. Распределение, динамика и роль в водоемах биогенных элементов.

34. Эвтрофирование.

35. Антропогенное эвтрофирование: причины и контроль.

## IX

36. Загрязнение с бытовыми сточными водами.

37. Последствия загрязнения бытовыми сточными водами.

38. Эвтрофирование. Трофический статус водного объекта.

39. Эвтрофирование и сукцессия. Лимитирующие факторы.

40. Агенты эвтрофирования. Стадии эвтрофирования.

41. Хозяйственные последствия эвтрофирования. Борьба с эвтрофированием.

## Х

42. Нефтепродукты в водных экосистемах.
43. Источники загрязнения.
44. Состав нефтяных загрязнений.
45. Формы нефтяных загрязнений.
46. Воздействие нефтепродуктов на водные экосистемы.
47. Источники бенз(а)пирена. Последствия загрязнения бенз(а)пиреном.

## ХІ

48. Консервативные токсиканты в экосистемах.
49. Загрязнение вод металлами.
50. Источники поступления металлов в водоемы и водотоки.
51. Токсичность тяжелых металлов для гидробионтов.
52. Мышьяк в гидросфере.
53. Свинец в гидросфере.
54. Ртуть в гидросфере.
55. Кадмий в гидросфере.

## ХІІ

56. Синтетические органические вещества в водных экосистемах.
57. Хлорированные углеводороды в водных экосистемах.
58. Пестициды в гидросфере.
59. ДДТ в гидросфере.
60. Синтетические поверхностно-активные вещества в водоемах и водотоках.

## **ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ**

### **1. Гидробиология, лимнология и водная экология как науки.**

Их взаимосвязи и место в системе естественных наук. Связи с другими науками. Смежные науки. Предмет, цель, методы исследований. История развития. Основные направления. Общая и прикладная гидробиология. Практическая значимость.

### **2. Горизонтальное и вертикальное деление озер в гидробиологии.**

Литоральная (эпилитораль, супралитораль, эулитораль; верхняя, средняя, нижняя инфралитораль) и пелагическая (литопрондаль и профундаль) зоны. Фотическая и афотическая зоны.

### **3. Известнейшие озера мира.**

Одно из следующих озер (Танганьика. Ньяса, Виктория, Чад, Джордж, Ладожское, Онежское, Констанц, Балатон, Лох-Несс, Верхнее, Мичиган, Гурон, Онтарио, Эри, Кратер, Титикака, Тайху, Бива, Хубсугул, Эйри) описать по следующей схеме: наибольшая длина, ширина, глубина; площадь водного зеркала, объем, средняя глубина; длина береговой линии, развитие береговой линии; сток, водообменность, возраст и происхождение, особенности химического режима озера, биологические особенности, использование.

### **4. Разнообразие озер.**

Наибольшие озера мира и России по площади водного зеркала, объему, максимальной глубине.

### **5. Генетические классификации озер.**

Классификация озер Мюррэя: каменные, барьерные и органические бассейны. Классификация озер Швербеля: тектонические (включая кратерные), барьерные, вырытые.

### **6. Тектонические озера. Вулканические бассейны (кратерные или кальдеровые, лавовые плотины, на лавовом основании).**

Происхождение озер в результате тектонической деятельности. Свалы, грабены, рифты, подъемы. Примеры озер каждой группы.

### **7. Метеорные, карстовые, ледниковые озера.**

Краткая характеристика каждой группы, примеры озер для каждой группы.

### **8. Барьерные озера. Органические: фитогенные, зоогенные, антропогенные.**

Описать происхождение озер в результате действия рек (дельтовые, старичные, водопадные озера), ветра, волн (прибрежные озера, лагуны, фьорды). Краткая характеристика каждой группы, примеры.

### **9. Главные биотопы в водоеме.**

Описать особенности водной толщи и границ вода/воздух, вода/дно, вода/воздух/дно как сред обитания организмов. Краткие характеристики населяющих их групп организмов.

### **10. Сообщество толщи вод.**

С биоэкологической точки зрения (продуценты, консументы, редуценты) и с лимнологической точки зрения (планктон и нейстон). Краткая характеристика, примеры организмов.

### **11. Бентос.**

С биоэкологической точки зрения (продуценты, консументы, редуценты) и с лимнологической точки зрения (различные структурно-функциональные группы бентонтов). Краткая характеристика, примеры организмов.

### **12. Тепловая стратификация озер.**

Эпилимнион, металимнион (термоклин), гиполимнион. Сезонное «нормальное» поведение озера. Голомиктические и меромиктические озера. Миксолимнион и монимолимнион.

### **13. Классификации озер, основанные на стратификации.**

Классификация озер Уиппла (полярные, умеренной зоны, тропические озера; придонная температура: постоянная, переменная, близкая поверхностной). Классификация Фореля (полярные, умеренной зоны, тропические озера; мелкие, глубокие озера). Классификация Хатчинсона (амиктические, холодные мономиктические, димиктические, теплые мономиктические, олигомиктические). Дополнение к ней: холодные и теплые полимиктические. Примеры озер каждой группы.

#### **14. Биологическая классификация озер.**

Классификация Тинеманна (олиготрофные и эвтрофные озера). Современная биологическая классификация (дистрофные, ультраолиготрофные, олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные, гиперэвтрофные) озер. Морфометрия, оптические свойства, гидрохимия, растения, животные, продуктивность озер разной трофности. Примеры озер каждой группы.

#### **15. Уровни организации живых систем: популяции.**

Структура, плотность, динамика популяций. Поток энергии через популяцию. Плодовитость популяций. Стратегии развития популяций (R, K, L-стратегии).

#### **16. Уровни организации живых систем: сообщества.**

Взаимодействия популяций (хищничество, паразитизм, конкуренция, аменсализм, комменсализм, симбиоз).

#### **17. Уровни организации живых систем: биоценозы.**

Структура биоценозов.

#### **18. Экосистемы.**

Потоки энергии в экосистемах. Круговорот вещества в экосистемах.

#### **19. Водные экосистемы.**

Структурные и функциональные особенности водных экосистем. Водные экосистемы и водные геосистемы. Иерархия водных экосистем. Водные экосистемы циклического, транзитного и каскадного типов.

#### **20. Первичная продукция.**

Методы ее определения. Классификация водоемов по величине первичной продукции.

#### **21. Эвтрофирование.**

Лимитирующие факторы. Биогенные элементы. Источники поступления и образования в водоемах. Распределение, динамика и роль в водоемах. Антропогенное эвтрофирование: причины и контроль.

#### **22. Хозяйственно-бытовые сточные воды.**

Состав, последствия сброса. Особенности действия на речные и озерные системы.

### **23. Природные и синтетические загрязняющие вещества.**

Примеры, особенности воздействия на водные экосистемы, трансформация.

### **24. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде.**

Источники поступления в гидросферу. Состав нефтепродуктов. Воздействие на гидробионтов. Трансформация.

### **25. Поверхностно-активные вещества в окружающей среде.**

Источники поступления в гидросферу. Состав ПАВ. Синтетические ПАВ. Воздействие на гидробионтов. Особенности трансформации.

### **26. Пестициды в окружающей среде.**

Источники и объемы поступления в гидросферу. Действие на гидробионтов. Накопление в пищевых цепях. Трансформация. Примеры. ДДТ.

### **27. Металлы в окружающей среде.**

Источники и объемы поступления в гидросферу. Действие на гидробионтов. Накопление в пищевых цепях. Примеры (рассмотреть на выбор один из металлов).

### **28. Ацидификация водных экосистем.**

Агенты закисления водоемов и водотоков. Масштабы ацидификации. Борьба с закислением.

### **29. Вода – среда обитания гидробионтов.**

Аномальное поведение воды в естественных условиях. Молекулярная структура воды. Водородные связи. «Кристаллическая» структура воды. Зависимость плотности воды от температуры. Теплоемкость воды. Вязкость и поверхностное натяжение воды.

### **30. Отличия водотоков от водоемов.**

Течение. Уровень воды. Влияние бассейна. Пространственная структура. Стратификация. Эрозия. Градиент.

### **31. Биологические особенности водотоков.**

Свет, температура, растворенные и взвешенные вещества в реках. Биотопы и экологические ниши в реках.

### **32. Водохранилище – водоем или водоток?**

Количественные и качественные различия водохранилищ, озер и рек.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### ОСНОВНАЯ

*Авакян А. Б.* Водохранилища / А. Б. Авакян, В. П. Салтанкин, В. А. Шарапов. – М. : Мысль, 1987. – 325 с.

*Алимов А. Ф.* Введение в продукционную гидробиологию / А. Ф. Алимов. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 152 с.

*Алимов А. Ф.* Элементы теории функционирования экосистем / А. Ф. Алимов. – СПб. : ЗИН РАН, 2000. – 147 с.

*Гольд З. Г.* Словарь терминов и понятий по водным экосистемам (биологическая структура, качество вод, охрана) : учеб.-метод. пособие / З. Г. Гольд, И. И. Морозова ; Краснояр. гос. ун-т. – Красноярск, 2004. – 94 с.

*Зданович В. В.* Гидробиология и общая экология: словарь терминов / В. В. Зданович, Е. А. Криксунов. – М. : Дрофа, 2004. – 192 с.

*Киселев И. А.* Планктон морей и континентальных водоемов / И. А. Киселев. – Л. : Наука, 1969. – Т. 1: Вводные и общие вопросы планктологии. – 658 с.; 1980 – Т. 2: Распределение, сезонная динамика и значение. – 440 с.

*Кожова О. М.* Введение в гидробиологию : учеб. пособие / О. М. Кожова. – Красноярск, 1987. – 244 с.

*Константинов А. С.* Общая гидробиология : учеб. пособие / А. С. Константинов. – 4-е изд. – М. : Высш. шк., 1986. – 472 с.

*Михайлов В. Н.* Гидрология : учебник для вузов / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский, С. А. Добролюбов. – М. : Высш. шк., 2005. – 463 с.

*Одум Ю.* Экология : в 2 т. / Ю. Одум ; пер. с англ. Ю. М. Фролова ; под ред. В. Е. Соколова. – М. : Мир, 1986. – Т. 1. – 328 с. ; Т. 2. – 376 с.

*Реймерс Н. Ф.* Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы) / Н. Ф. Реймерс. – М. : Россия молодая, 1996. – 367 с.

*Садчиков А. П.* Экология прибрежно-водной растительности : учеб. пособие для студентов вузов / А. П. Садчиков, М. А. Кудряшов. – М. : НИА-Природа, РЭФИА, 2004. – 220 с.

*Страшкраба М.* Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование / М. Страшкраба, А. Гнаук ; пер. с англ. В. А. Пучкина ; под ред. В. И. Беляева. – М. : Мир, 1989. – 376 с.

*Хатчинсон Д. Э.* Лимнология : пер. с англ. / Д. Э. Хатчинсон. – М. : Прогресс, 1969. – 591 с.

*Хендерсон-Селлерс Б.* Инженерная лимнология : пер. с англ. / Б. Хендерсон-Селлерс. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 335 с.

*Хендерсон-Селлерс Б.* Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования : пер. с англ. / Б. Хендерсон-Селлерс, Х. Р. Маркленд. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 487 с.

*Шитиков В. К.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг, Т. Д. Зинченко. – Тольятти : ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.

*Шитиков В. К.* Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения : в 2 кн. / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг, Т. Д. Зинченко ; Ин-т экологии Волж. бассейна. – М. : Наука, 2005. – Кн. 1. – 281 с. ; Кн. 2. – 337 с.

*Эдельштейн К. К.* Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения / К. К. Эдельштейн. – М. : ГЕОС, 1998. – 277 с.

*Эрхард Ж. П.* Планктон : пер. с фр. / Ж. П. Эрхард, Ж. Сежен. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 256 с.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

*Акимова Т. А.* Экология: Человек – Экономика – Биота – Среда : учебник для вузов / Т. А. Акимова, В. В. Хаскин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 566 с.

*Аксенов С. И.* Вода и ее роль в регуляции биологических процессов / С. И. Аксенов. – М. : Наука, 1990. – 117 с.

*Виноградова М. Е.* Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана / М. Е. Виноградова, Э. А. Шушкина. – М. : Наука, 1987. – 240 с.

*Дедю И. И.* Экологический энциклопедический словарь / И. И. Дедю. – Кишинев : Молд. сов. энцикл., 1989. – 408 с.

*Дмитриевский Ю. Д.* Озера Африки / Ю. Д. Дмитриевский, И. Н. Олейников. – Л. : Гидрометеиздат, 1979. – 184 с.

*Гутельмахер Б. Л.* Метаболизм планктона как единого целого: трофометаболические взаимодействия зоо- и фитопланктона / Б. Л. Гутельмахер. – Л. : Наука, 1986. – 155 с.

*Зилов Е. А.* Модельный эксперимент в водной токсиколоэкологии / Е. А. Зилов, Д. И. Стом // Гидробиол. журн. – 1990. – Т. 26, № 1. – С. 68–73.

*Зилов Е. А.* Модельные экосистемы и модели экосистем в гидробиологии / Е. А. Зилов, Д. И. Стом. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1992. – 72 с.

*Зилов Е. А.* Химия окружающей среды / Е. А. Зилов. – Иркутск : Иркут. ун-т, 2006. – 148 с.

*Израэль Ю. А.* Антропогенная экология океана / Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 528 с.

*Камшилов М. М.* Эволюция биосферы / М. М. Камшилов. – М. : Наука, 1979. – 256 с.

*Кожов М. М.* Биология озера Байкал / М. М. Кожов. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 316 с.

*Кожова О. М.* Прогноз состояния водных экосистем и приемы экологической оценки действия антропогенных факторов // Прогнозирование экологических процессов. – Новосибирск, 1986. – С. 27–34.

*Кожова О. М.* Методология оценки состояния экосистем : учеб. пособие / О. М. Кожова, Л. Р. Измestьева, Б. К. Павлов. – Ростов н/Д : ЦВВР, 2000. – 128 с.

*Крючкова Н. М.* Трофические взаимоотношения зоо- и фитопланктона / Н. М. Крючкова. – М. : Наука, 1989. – 124 с.

*Лосев К. С.* Вода / К. С. Лосев. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.

*Маргалев Р.* Облик биосферы / Р. Маргалев. – М. : Наука, 1992. – 214 с.

Методические аспекты лимнологического мониторинга. – Л. : Наука, 1988. – 177 с.

*Михайловский Г. Е.* Жизнь и ее организация в пелагиали Мирового океана / Г. Е. Михайловский. – М. : Наука, 1992. – 270 с.

*Михайловский Г. Е.* Описание и оценка состояния планктонных сообществ / Г. Е. Михайловский. – М. : Наука, 1988. – 214 с.

*Муравейский С. Д.* Реки и озера. Гидробиология. Сток / С. Д. Муравейский. – М. : Гос. изд-во геогр. лит., 1960. – 388 с.

*Мусатов А. П.* Пространственно-временная структура водных экосистем / А. П. Мусатов. – М. : Наука, 1994. – 118 с.

*Никаноров А. М.* Гидрохимия / А. М. Никаноров. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 352 с.

*Новиков Ю. В.* Вода и жизнь на Земле / Ю. В. Новиков, М. М. Сайфутдинов. – М. : Наука, 1981. – 184 с.

Окружающая среда : энцикл. словарь-справочник : пер. с нем. – М. : Прогресс, 1993. – 640 с.

*Посохов Е. В.* Химическая эволюция гидросферы / Е. В. Посохов. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 285 с.

*Рамад Ф.* Основы прикладной экологии: Воздействие человека на биосферу / Ф. Рамад ; пер. с фр. Ю. И. Ляхина, А. Г. Попова, А. И. Смирнова ; под ред. Л. Т. Матвеева. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 544 с.

*Реймерс Н. Ф.* Природопользование : словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.

*Реймерс Н. Ф.* Экология: Теории, законы, правила, принципы и гипотезы / Н. Ф. Реймерс. – М. : Россия молодая, 1994. – 367 с.

*Синюков В. В.* Вода известная и неизвестная / В. В. Синюков. – М. : Знание, 1987. – 176 с.

*Сытник К. М.* Биосфера. Экология. Охрана природы : справ. пособие / К. М. Сытник, А. В. Брайон, А. В. Гордецкий ; под ред. К. М. Сытника. – Киев : Наукова думка, 1987. – 524 с.

## ДЛЯ УГЛУБЛЕННОГО ИЗУЧЕНИЯ КУРСА

*Алекин О. А.* Основы гидрохимии / О. А. Алекин. – Л. : Гидрометеориздат, 1970. – 296 с.

*Алексеев В. А.* Основа биоиндикации качества поверхностных вод на уровне организмов // Водн. ресурсы. – 1984. – № 2. – С. 107–121.

*Алексеев В. В.* Теоретические и экспериментальные исследования экологических систем // Итоги науки и техники. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. – М., 1980. – Т. 5. – С. 58–104.

*Алимов А. Ф.* Подходы к оценке состояния водных экосистем / А. Ф. Алимов, Е. В. Балушкина, А. А. Умнов // Экологическая экспертиза и критерии экологического нормирования. – СПб. : СПбНЦ РАН, 1996. – С. 37–47.

*Баканов А. И.* Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов // Биол. внутр. вод. – 2000. – № 1. – С. 68–82.

*Баканов А. И.* Использование комбинированных индексов для мониторинга пресноводных водоемов по зообентосу // Водн. ресурсы. – 1999. – Т. 26, № 1. – С. 108–111.

*Баканов А. И.* О некоторых методологических вопросах применения системного подхода для изучения структур водных экосистем // Биол. внутр. вод. – 2000. – № 2. – С. 5–18.

*Баканов А. И.* Способ ранжирования гидробиологических данных в зависимости от экологической обстановки в водоеме // Биол. внутр. вод. – 1997. – № 1. – С. 53–58.

*Балушкина Е. В.* Применение интегрального показателя для оценки качества вод по структурным характеристикам донных сообществ // Реакция озерных экосистем на изменение внешних условий. – СПб. : ЗИН РАН, 1997. – С. 266–292.

*Балушкина Е. В.* Структура сообществ донных животных и оценка экологического состояния р. Ижоры: оценка качества вод р. Ижоры по структурным характеристикам донных животных в разные годы // Биол. внутр. вод. – 2002. – № 4. – С. 61–68.

*Башкин В. Н.* Оценка степени риска при критических нагрузках загрязняющих веществ на экосистемы // География и природные ресурсы. – 1999. – № 1. – С. 35–39.

*Зилов Е. А.* Использование мезокосмов для моделирования водных экосистем / Е. А. Зилов, Д. И. Стом // Биол. науки. – 1989. – № 2. – С. 101–109.

*Зилов Е. А.* Микрокосмы и их применение в экспериментальной гидробиологии / Е. А. Зилов, Д. И. Стом // Успехи совр. биол. – 1989. – Т. 107, вып. 1. – С. 150–157.

*Зилов Е. А.* Использование эксэргии для оценки здоровья водных экологических систем // Экосистемы и природные ресурсы горных стран. – Новосибирск : Наука, 2004. – С. 22–40.

*Зилов Е. А.* Возможность использования целевых функций для оценки «здоровья» водных экологических систем: эксэргия // Сиб. экол. журн. – 2006. – № 3. – С. 269–284.

*Зилов Е. А.* Математическое моделирование экосистемы озера Байкал: вчера, сегодня, завтра // Изв. Самар. НЦ РАН. – 2006. – Т. 8, № 3. – С. 58–64.

*Изместьева Л. Р.* Опыт организации гидробиологического мониторинга / Л. Р. Изместьева, О. М. Кожова // Методология оценки состояния экосистем. – Новосибирск, 1998. – С. 95–110.

*Изместьева Л. Р.* Опыт организации гидробиологического мониторинга и создания ГИС / Л. Р. Изместьева, О. М. Кожова // Методология оценки состояния экосистем. – Ростов н/Д : ЦВВР, 2000. – С. 96–105.

*Кожов М. М.* Пресные воды Восточной Сибири (бассейн Байкала, Ангары, Витима, Верхнего течения Лены и Нижней Тунгуски) / М. М. Кожов. – Иркутск : Иркут. обл. кн. изд-во, 1950. – 368 с.

*Кожов М. М.* Очерки по байкаловедению / М. М. Кожов. – Иркутск : Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1972. – 254 с.

Изменчивость природных явлений во времени / под ред. О. М. Кожовой, Т. Г. Рященко. – Новосибирск : Наука, 1982. – 223 с.

Приемы прогнозирования экологических систем / под ред. О. М. Кожовой, Л. Я. Ащепковой. – Новосибирск: Наука, 1985. – 128 с.

Оценка состояния водных и наземных экологических систем / под ред. О. М. Кожовой, И. К. Боковой. – Новосибирск : Наука, 1993. – 164 с.

Проблемы сохранения биоразнообразия / под ред. О. М. Кожовой, А. С. Плешанова, Л. Р. Изместьевой. – Новосибирск : Наука, 1998. – 257 с.

Экосистемы и природные ресурсы горных стран / под ред. А. И. Смирнова, Л. Р. Изместьевой. – Новосибирск : Наука, 2004. – 328 с.

*Мокрый А. В.* Сезонная динамика планктонного сообщества пелагиали Южного Байкала // Вестн. Бурят. гос. ун-та. – Улан-Удэ : Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2006. – С. 113–118. – Спец. вып.

Мониторинг фитопланктона / Л. Р. Изместьева [и др]. – Новосибирск : Наука, 1992. – 141 с.

Оценка продуктивности фитопланктона / под ред. О. М. Кожовой, Л. Р. Изместьевой. – Новосибирск : Наука, 1993. – 144 с.

*Frid C.* Ecology of Aquatic Management / C. Frid, M. Dobson. – London : Pearson Education Limited, 2002. – 274 p.

*Golterman H. L.* Physiological Limnology / H. L. Golterman. – Amsterdam : Elsevier, 1975. – 490 p.

Socio-Economic Aspects of Lake Reservoir Management / ed. Hashimoto M. – Shiga : ILEC, 1991. – 229 p.

*Henderson-Sellers B.* Engineering Limnology / B. Henderson-Sellers. – Boston ; London, Melbourne : Pitman Advanced Publishing Program, 1984. – 336 p.

Freshwater Field Tests for Hazard Assessment of Chemicals / eds. I. R. Hill [et al.]. – Boca Raton : Lewis Publishers, 1994. – 562 p.

*Horne A. J.* Limnology / A. J. Horne, C. R. Goldman. – McGraw-Hill, Inc., 1994. – 670 p.

Influence of biogenous elements on the lake Baikal plankton community / E. A. Silow [et al.] // *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. – 1991. – Bd. 19, Hf. 6. – S. 629–634.

Management of Lake Acidification / ed. S. E. Jørgensen. – Shiga : ILEC, 1993. – 195 p.

Lake Shore Management / eds. S. E. Jørgensen, H. Löffler. – Shiga : ILEC, 1990. – 174 p.

Principles of Lake Management / eds. S. E. Jørgensen, R. A. Vollenweider. – Shiga : ILEC, 1988. – 200 p.

*Kalbe L.* Limnische Oekologie / L. Kalbe. – Stuttgart ; Leipzig : B. G. Teubner-Verlagsgesellschaft, 1997. – 296 S.

*Kalff J.* Limnology: Inland Water Ecosystems / J. Kalff. – Prentice Hall, 2002. – 593 p.

*Kausch H.* Ergebnisse der Limnologie / H. Kausch, W. Lampert. – Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1994. – 508 S.

*Kozhova O. M.* The current problems of Lake Baikal ecosystem conservation / O. M. Kozhova, E. A. Silow // *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. – 1998. – Vol. 3. – P. 19–33.

*Kozhova O. M.* Ecological monitoring of Lake Baikal: principles and results / O. M. Kozhova, E. A. Silow // *The Journal of Lake Science*. – 1998. – Vol. 10. – P. 575–580.

*Kozhova O. M.* Economic use and anthropogenic pressure / O. M. Kozhova, B. K. Pavlov, E. A. Silow // *Lake Baikal. Biodiversity and evolution*. – Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers, 1998. – P. 279–292.

*Kozhova O. M.* Principles and Results of Ecological Monitoring of Lake Baikal / O. M. Kozhova, E. A. Silow // *Partnerships for Sustainable Life in Lake Environments*. – Otsu, Japan, 2001. – Vol. 5. – P. 532–536.

Enclosed Experimental Marine Ecosystems: A Review and Recommendations / ed. C. M. Lalli. – N. Y. : Springer Verlag, 1990. – 218 p.

*Lampert W.* Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams / W. Lampert, U. Sommer. – Oxford : University Press, 1997. – 382 p.

*Margalef R.* Limnologia / R. Margalef. – Barcelona: Omega, 1983. – 1010 p.

Mathematical models of lake Baikal ecosystem / E. A. Silow, V. J. Gurman, D. J. Stom, D. M. Rosenraukh, V. I. Baturin // Ecological Modelling. – 1995. – Vol. 82. – P. 27–39.

Toxic Substances Management in Lakes and Reservoirs / ed. S. Matsui. – Shiga : ILEC, 1991. – 170 p.

*Schwoerbel J.* Handbook of Limnology / J. Schwoerbel. – N. Y. : J. Wiley & Sons, 1987. – 228 p.

ANSWER'97 / ed. Y. Shi. – Nanjing, 1997. – 602 p.

*Segar D. A.* Introduction to Ocean Sciences / D. A. Segar. – Belmont : Wadsworth Publishing Company, 1998. – 497 p.

*Silow E. A.* Mathematical model of ecosystem perturbation / E. A. Silow // Handbook of environmental and ecological models. – Baton Rouge : Lewis Publishers, 1995. – P. 100–103.

*Silow E. A.* The changes of ecosystem goal functions in stressed aquatic communities / E. A. Silow // The Journal of Lake Science. – 1998. – Vol. 10, Suppl. – P. 421–435.

*Silow E. A.* The use of two lumped models for the analysis of consequences of external influences on the lake Baikal ecosystem / E. A. Silow // Ecological Modelling. – 1999. – Vol. 121. – P. 103–113.

*Silow E. A.* The present state of the Lake Baikal contamination / E. A. Silow // Ecotechnology in Environmental Protection and Fresh Water Lake Management. – Taejon : Pae Chai University, 2000. – P. 105–110.

*Silow E. A.* Prediction of Lake Baikal ecosystem behaviour using an ecosystem disturbance model / E. A. Silow, V. A. Baturin, D. J. Stom // Lakes & Reservoirs: Research and Management. – 2001. – Vol. 6, N 1. – P. 33–36.

*Silow E. A.* Exergy: Preliminary Results of an Experimental Laboratory Verification of its Applicability in Applied Ecology / E. A. Silow, I. H. Oh // Journal of Natural Sciences. – 2002. – Vol. 12. – P. 61–67.

*Silow E. A.* Aquatic ecosystem assessment using exergy / E. A. Silow, I. H. Oh // Ecological Indicators. – 2004. – Vol. 4. – P. 189–198.

*Smith R. L.* Elements of Ecology / R. L. Smith, T. M. Smith. – 4th ed. – San-Francisco, 2000. – 567 p.

*Straskraba M.* Reservoir Water Quality Management / M. Straskraba, J. G. Tundisi. – Shiga: ILEC, 1999. – 230 p.

Sustainable Lake Management. – Copenhagen, 1999. – 900 p.

*Wetzel R. G.* Limnology: Lake and River Ecosystems / R. G. Wetzel. – 3-d ed. – N. Y. : Academic Press, 2001. – 1017 p.

## РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТ

*Boelter M.* Limnoecology of Lake Baikal: Microorganisms – Number and Biomass [Электронный ресурс] / М. Boelter // REC Baikal, 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/projects/ecosystem/library.html?action=show&id=143>.

*Boelter M.* Limnoecology of Lake Baikal: Microbial Loop [Электронный ресурс] / М. Boelter // REC Baikal, 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/projects/ecosystem/library.html?action=show&id=142>.

*Boelter M.* Limnoecology of Lake Baikal: Nutrient Cycles [Электронный ресурс] / М. Boelter // REC Baikal, 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/projects/ecosystem/library.html?action=show&id=141>.

*Boelter M.* Limnoecology of Lake Baikal: Limno-micro-biology in Lake Baikal [Электронный ресурс] / М. Boelter // REC Baikal, 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/projects/ecosystem/library.html?action=show&id=140>.

*Silow E. A.* Introduction to Limnoecology: Limnology-State-of-the-Art [Электронный ресурс] / Е. А. Silow. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/library/library.html?action=show&id=126>.

*Silow E. A.* Introduction to Limnoecology: Physical Processes in the Water [Электронный ресурс] / Е. А. Silow. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/library/library.html?action=show&id=127>.

*Silow E. A.* Introduction to Limnoecology: Chemical Processes in the Water [Электронный ресурс] / Е. А. Silow. – 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/library/library.html?action=show&id=128>.

*Silow E. A.* Introduction to Limnoecology: Biological Processes in the Water [Электронный ресурс] / Е. А. Silow. – REC Baikal, 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/library/library.html?action=show&id=129>.

*Silow E. A.* Introduction to Limnoecology: Classification of Lakes [Электронный ресурс] / Е. А. Silow. – REC Baikal, 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/library/library.html?action=show&id=130>.

*Silow E. A.* Introduction to Limnoecology: Lake Baikal Contamination and Conservation / Е. А. Silow. – REC Baikal, 2007. – Режим доступа: <http://www.lake.baikal.ru/ru/projects/ecosystem/library.html?action=show&id=131>.

International Lake Environment Committee. – Режим доступа: <http://www.ilec.or.jp/eg/index.htm>.

World Lake Database. – <http://www.ilec.or.jp/database/database.html>.

Chaplin M. Water structure and behaviour. 2002. – Режим доступа: <http://www.sbu.ac.uk/water/>



*Jackson J.* Heavy metals and other inorganic toxic substances / J. Jackson // Toxic Substances Management in Lakes and Reservoirs. – Otsu : ILEC, 1991. – P. 65–80.

*Jørgensen S. E.* Integration of Ecosystem Theories: a Pattern / S. E. Jørgensen. – Doedrecht ; Boston ; London : Kluwer Academic Publishers, 1992. – 383 p.

*Keller W.* Lake water quality improvements and recovering aquatic communities / W. Keller, J. M. Gunn // Restoration and Recovery of an Industrial Region: Progress in Restoring the Smelter-damaged Landscape near Sudbury, Canada. – N. Y : Springer-Verlag, 1995. – P. 80–87.

Profile of persistent chlorinated contaminants, including selected chiral compounds, in wolverine (*Gulo gulo*) livers from the Canadian Arctic / P. F. Hoekstra [et al.] // Chemosphere. – 2003. – Vol. 53. – P. 551–560.

Regional precipitation and surface water chemistry trends in Southeastern Canada / J. E. Clair [et al.] // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 1995. – Vol. 52. – P. 197–212.

Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe / J. L. Stoddard, D. S. Jeffries, A. Lukewille // Nature. – 1999. – Vol. 401. – P. 575–578.

Reversibility of acidification of mountain lakes after reduction in nitrogen and sulphur emissions in Central Europe / J. Kopacek [et al.] // Limnol. Oceanogr. – 1998. – Vol. 43. – P. 357–361.

*Ryder R.* The Dioxin problem in Britain / R. Ryder // The Ecologist. – 1999. – Vol. 29, N 6. – P. 369–374.

*Salanki J.* Heavy metals in Lake Balaton / J. Salanki, I. Licsko // Toxic Substances Management in Lakes and Reservoirs. – Otsu : ILEC, 1991. – P. 81–85.

Source and behavior analyses of dioxins based on congener-specific information and their application to Tokyo Bay basin / S. Masunaga [et al.] // Chemosphere. – 2003. – Vol. 53. – P. 315–324.

The recovery of crustacean zooplankton communities from acidification: Comparing manipulated and reference lakes / N. D. Yan [et al.] // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 1996. – Vol. 53. – P. 1301–1327.

Учебное издание

**Зилов** Евгений Анатольевич

**ГИДРОБИОЛОГИЯ И ВОДНАЯ ЭКОЛОГИЯ**  
(организация, функционирование  
и загрязнение водных экосистем)

*Учебное пособие*

ISBN 978-5-9624-0388-5

Подготовлено к печати М. А. Айзиман

Верстка А. В. Врон

Дизайн обложки М. Г. Яскин

Подписано в печать 19.11.09 Формат 60x84 1/16

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 5,2

Тираж 200 экз. Поз. 93. Зак. 107

Издательство Иркутского государственного университета  
664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 36