

# **ЭКОЛОГИЯ БАЙКАЛА**

**Температурная стратификация**

**Подвижность водной среды**

**Удивительные свойства воды**

**Структура воды**

**Объяснение аномальных свойств воды**

**Индексы оценки качества водных экосистем**

**Уровень сапробности водной экосистемы**

**Классификации планктона**

## Температурная стратификация

Динамика поведения водных экосистем во многом определяется таким важным свойством водоемов, как *температурная стратификация*. 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 имеющая температуру ниже, занимает вышележащие слои водного тела, тогда как вода с температурой максимальной плотности – нижние. В годовой динамике типичного водоема умеренных широт можно выделить 4 основных фазы: 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. Необходимо упомянуть еще несколько гидрологических терминов. Верхний слой воды озера в период стратификации именуется *эпилимнионом*, нижний – *гиполимнионом*. Разделяющий их слой температурного скачка или *термоклин* – *металимнионом*.

Эпилимнион, как правило, составляет *трофогенный*, 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 (микроорганизмов). 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, т.к. взвешенное органическое вещество (живые и отмершие организмы планктона) образовавшееся в ходе процессов продуцирования в эпилимнионе при осаднении задерживается в этом слое и служит пищей многочисленным консументам и редуцентам.

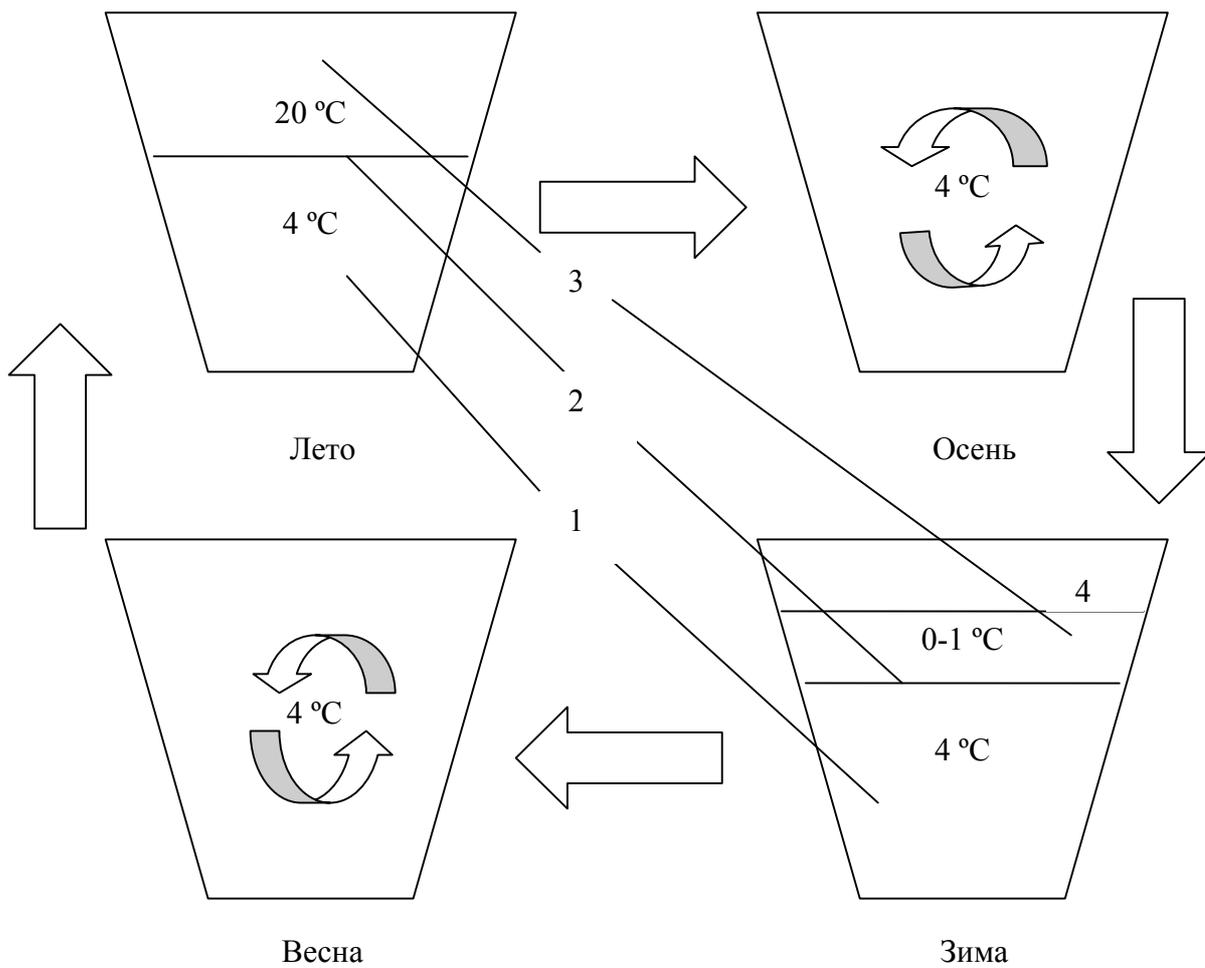


Рис. 1. Годовой ход стратификации типичного димиктического водоема умеренных широт (озеро Байкал). 1 – гипolimнион, 2 – металимнион, 3 – эпилимнион, 4 – лед.

## Подвижность водной среды

Водные экосистемы со стоячей и текущей водой принципиально отличаются по характеру происходящих в них экологических процессов.

Водоёмы замедленного водообмена (лентические: озера, пруды и т.п.) являются, как правило, водоёмами автохтонными. Это значит, в переводе с греческого, – экосистемами способными «прокормить» себя самостоятельно. Большая часть первичной продукции в этих водоёмах 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. 2).

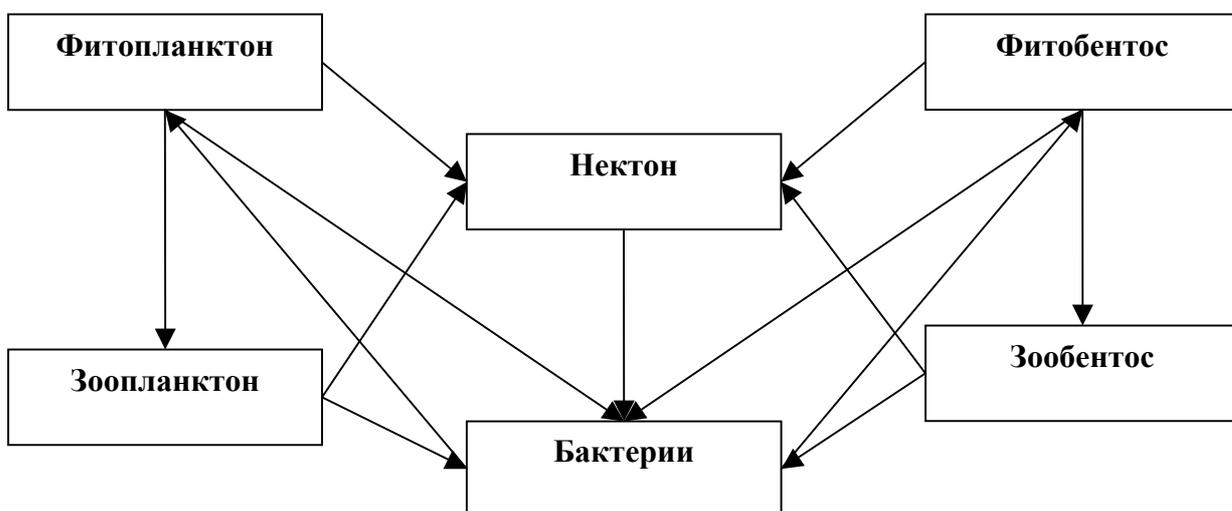


Рис. 2. Кругооборот веществ в идеализированной экосистеме водоёма.

В типичном большом озере основной поток энергии и круговорот вещества совершается в планктонном сообществе экосистемы пелагиали (рис. 3).

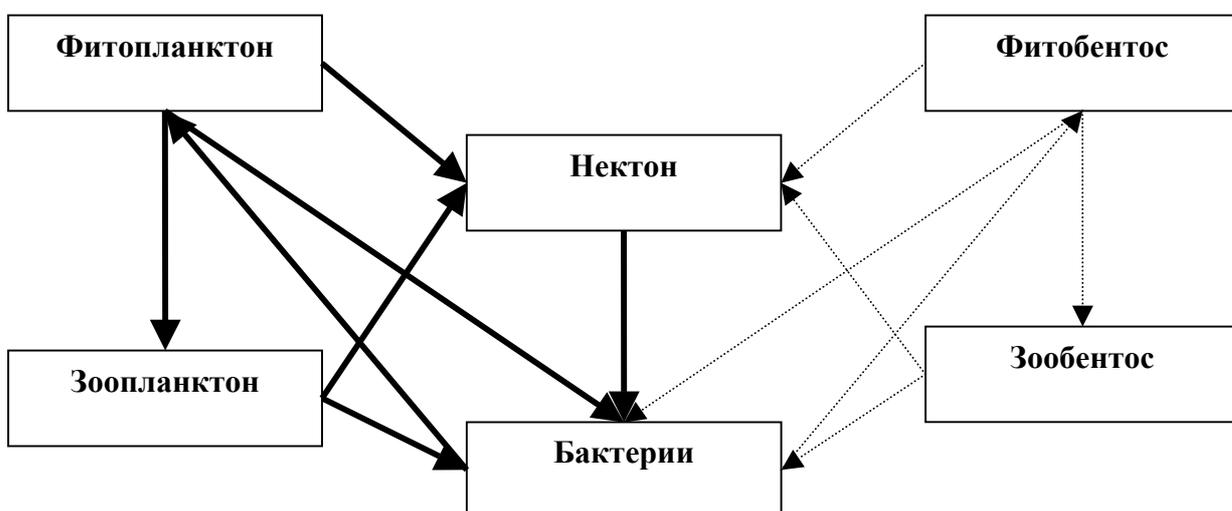


Рис. 3. Кругооборот веществ в идеализированной экосистеме гидробиоценоза циклического типа (лентического). Жирные стрелки – основные потоки вещества, тонкие – второстепенные.

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 нектон (рис. 4).

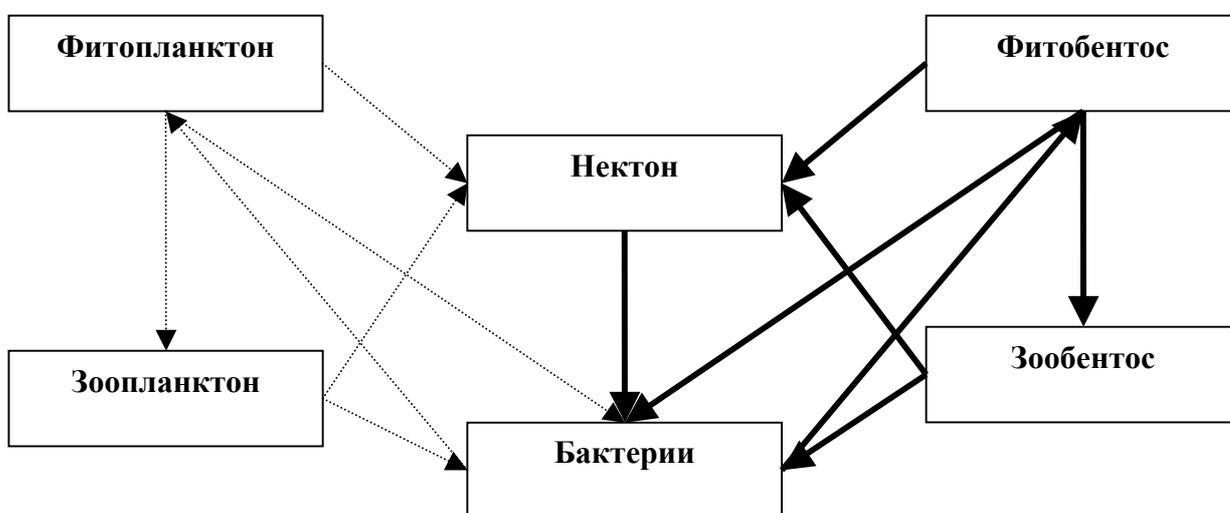


Рис. 4. Кругооборот вещества в идеализированной экосистеме гидробиоценоза транзитного типа (лотического).

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. 5).

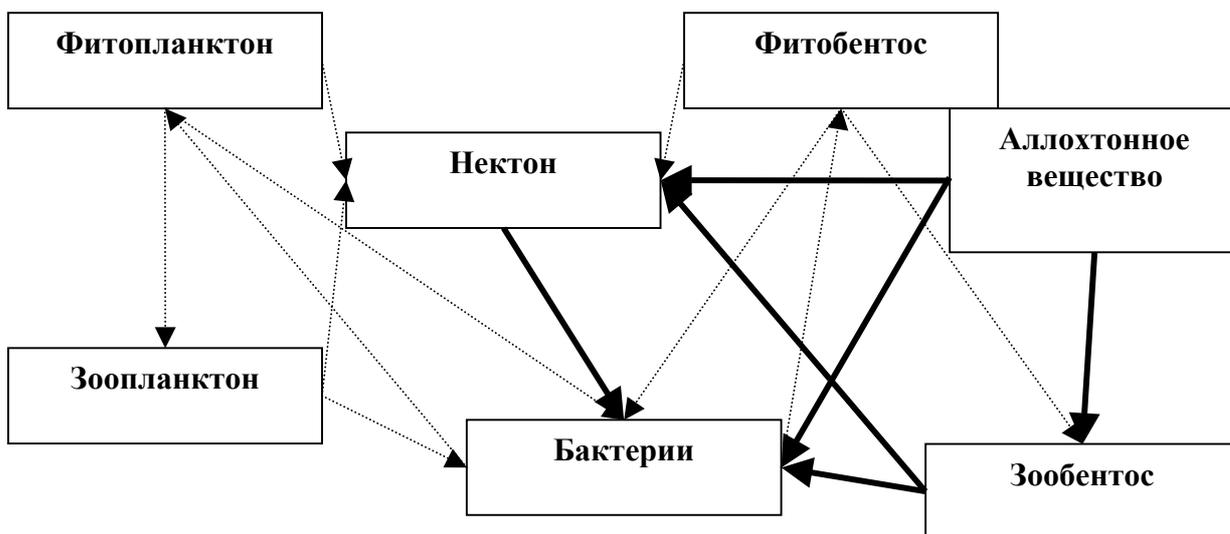


Рис. 5. Кругооборот вещества в идеализированной аллохтонной экосистеме гидробиоценоза транзитного типа (лотического).

В водных экосистемах каскадного типа (системы водохранилищ, группы сообщающихся меж собой проточного типа озер, глубокие водотоки), совмещающих лотические и лентические участки, системы кругооборота 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).

Экосистема озера Байкал – типичная система лентического типа. Поэтому все процессы – типичны для больших озер и даже океанских систем. Они проходят по схеме, представленной на рис. 2. При всей замысловатости схемы, экосистема Байкала достаточно проста, поскольку 99 % энергии идет через планктонную сеть. Это можно представить в графической форме как на рис. 6, или в табличной форме – на таблице 1.



Рис. 6. Поток энергии в экосистеме озера Байкал.

Таблица 1

Продукция трофических уровней в экосистеме озера Байкал	
Уровень	Продукция, г м <sup>-2</sup>
Фитопланктон	67
Эпишура	7
Макрогектопус	0,7
Голомянки	0,07
Нерпа	0,007

## Удивительные свойства воды

Вода ( $H_2O$ ) – 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 неожиданно оказалось, что вода полна загадок не только для обывателей, но и для ученых, постоянно ее исследующих.

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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  каждая молекула жидкой воды совершает  $10^{11} - 10^{12}$  движений в секунду, каждая молекула льда –  $10^5 - 10^6$ . Вода расширяется при замерзании, т.е. 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 бы наша планета была покрыта сплошной ледяной коркой и жизнь была бы невозможна.

*Плотность воды* возрастает с ростом температуры от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По превышении температуры  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  движения молекул воды становятся интенсивнее и плотность воды начинает снижаться.

Зависимость плотности воды от температуры

Температура, $^{\circ}\text{C}$	0 (ice)	0 (water)	4	5	10	15	20	25	35
Плотность, $\text{г см}^{-3}$	0.919	0.9999	1.0000	0.9999	0.9997	0.9991	0.998	0.997	0.994

*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 выше при высоких температурах (см. табл. 2). 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  $7,3 \cdot 10^{-3}$  Н м<sup>-1</sup>. 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.

Зависимость вязкости воды от температуры

Температура, °С	0	5	10	20	30
Относительная вязкость, %	100	85	79	56	45

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.

## Структура воды

Жизнь на Земле определяется необычной структурой и аномальной природой жидкой воды. Организмы состоят, в основном, из жидкой воды. Можно сказать даже, что все живые существа нашей планеты – ожившие водные или коллоидные структуры. Вода выполняет множество функций, она ни в коем случае не может рассматриваться как инертный растворитель. Несмотря на огромные усилия, направленные на изучение воды, многие ее свойства все еще загадочны. Молекулы воды образуют бесконечную объемную сеть, держащуюся водородными связями, и структурированную в *кластеры*.

Еще Платон гениально полагал, что частицы воды выглядят как икосаэдры. Удивительно, но современная наука также пришла к выводу о том, что молекулы воды образуют кластеры формы икосаэдров (рис. 7).

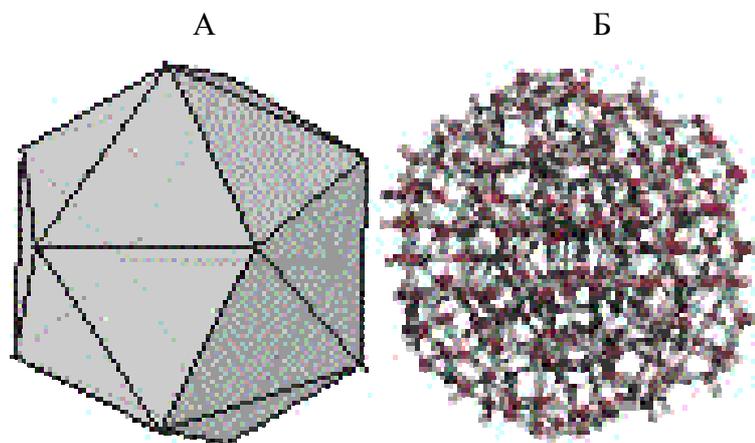


Рис. 7. Форма частиц воды по Платону (А) и кластер воды по современным воззрениям (Б)

Как формируется кластерная структура? Маленькие кластеры из 4-х молекул воды могут сближаться, образуя бицикло-октамеры. Такие структуры относительно устойчивы благодаря существованию двух минимумов потенциальной энергии ( $U$ ) – отталкивания молекул в зависимости от расстояния ( $r$ ) (рис. 8). Первый минимум (а) относится к двум тетрамерам, не связанным водородными связями, тогда как второй (b) характеризует два тетрамера, связанные водородными связями.



Рис. 9. Наиболее распространенные малые кластеры молекул воды, служащие строительным материалом для больших икосаэдрических кластеров: А – циклические пентамеры, Б – бицикло-октамеры, В – трицикло-декамеры.

Эти три малые структуры относительно стабильны и, взаимодействуя, строят большие кластеры, которые уже и формируют жидкий кристалл, состоящий из открытых и рыхлых или, напротив, компактных структур (рис. 10).

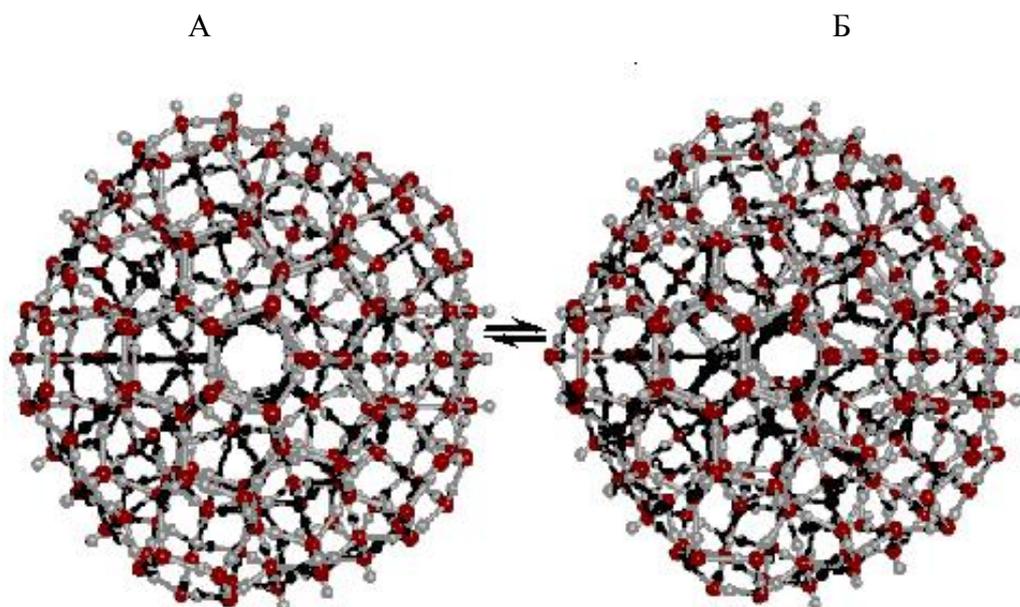


Рис. 10. Идеализированные икосаэдрические кластеры: А - открытая рыхлая структура, Б – компактная структура.

Такая флюктуирующая структура перекрывающихся и постоянно перемещающихся икосаэдров, обеспечивает движение молекул воды между рыхлыми и компактными кластерами. Постоянная смена наличных водородных связей каждой молекулы и ее перемещение в жидком кристалле объясняет многие аномальные свойства воды.

С ростом температуры средний размер кластеров и их взаимосвязанность уменьшаются. Это объясняет многие аномальные свойства воды – зависимость плотности от температуры, вязкости от давления, ионизацию растворенных веществ, растворимость гидрофобных молекул, углеводов, макромолекул.

## Объяснение аномальных свойств воды

Многие аномалии свойств воды связаны с температурой, как это показано на рис.

11.

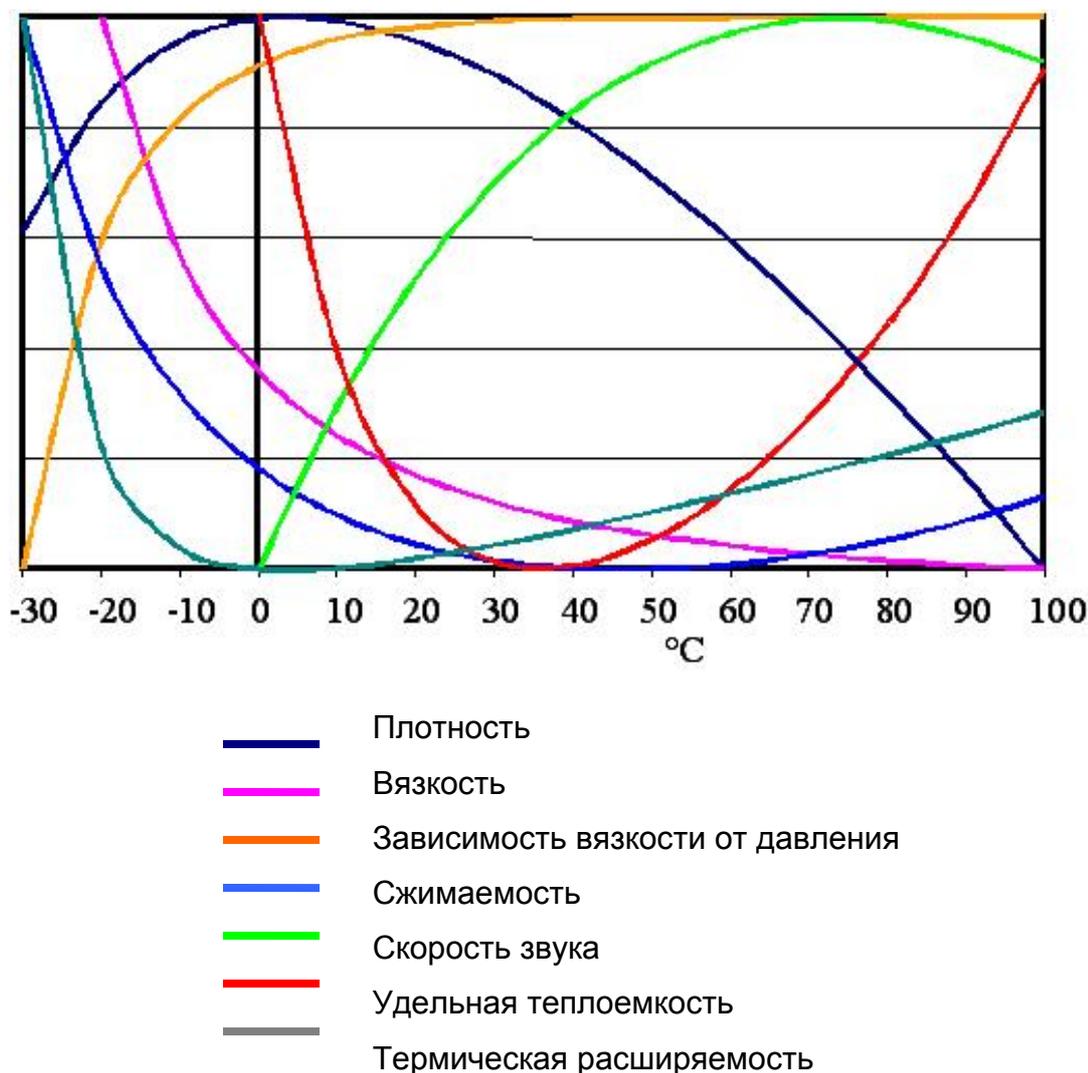


Рис.11. Зависимость разных свойств воды от температуры.

Максимальная плотность воды наблюдается при 3,984 °C, высокая плотность жидкой воды объясняется именно стягиванием ее структуры водородными связями. Давление снижает температуру максимальной плотности. Увеличение давления сдвигает равновесие кластерной структуры воды в сторону более компактных образований. Особенно заметен этот эффект при низких температурах. При достаточно высоких давлениях (20 МПа, например), температура максимальной плотности воды опускается ниже 0 °C. Растворенные вещества оказывают разное действие на плотность воды. Это зависит от того, поддержанию каких кластеров — рыхлых или компактных, они способствуют.

Эффектом Мпембы (в честь танзанийского школьника Эраста Мпембы, обнаружившего явление при приготовлении мороженого) называется тот феномен, что

горячая вода может замерзать быстрее холодной. С первого взгляда это противоречит природе вещей, поскольку, «очевидно», что горячая вода должна сначала остыть, а затем уже замерзнуть. Тем не менее, экспериментально показано, что вода с исходной температурой 90 °С, замерзает быстрее того же количества воды с температурой 18 °С при прочих равных условиях. Объясняется эффект тем, что в горячей воде кристаллическая структура возникает при объединении относительно свободных молекул, тогда как в холодной воде требуется время на расформирование уже имеющейся кластерной организации.

*Точка плавления* воды необычно высока. Объясняется это тем, что во льду каждая молекула – участник четырех водородных связей (в двух – как донор, а в двух – как акцептор) и относительно статична. В жидкой воде некоторые водородные связи разрушаются, что позволяет молекулам двигаться свободнее. При таянии льда потребляется много энергии, необходимой именно для разрушения этих связей, а количество энергии восстанавливаемое за счет изменения объема незначительно. В точке плавления изменение свободной энергии должно быть равным нулю. С ростом температуры количество водородных связей снижается и энтропия возрастает. Таяние происходит лишь тогда, когда энтропия изменится настолько, чтобы значительная часть водородных связей распалась. Низкая энтропия (=высокая упорядоченность) жидкой воды и объясняет высокую точку плавления.

Объем воды уменьшается при таянии. Когда вода замерзает при 0 °С и атмосферном давлении, ее объем увеличивается примерно на 9 %. Если давление повышено и, соответственно, точка плавления приходится на более низкие температуры, то увеличение объема при замерзании даже выше (13 % при -20 °С, например). Количество ближайших соседей молекулы воды увеличивается при таянии. Каждая молекула воды в гексагональном льду окружена четырьмя ближайшими соседками. При таянии льда, частичное разрушение водородных связей позволяет освободившимся молекулам сблизиться, увеличивая, таким образом, число ближайших соседей. В других жидкостях, как правило, свободное движение молекул и большее доступное для передвижения пространство, чем в твердом состоянии, увеличивает среднее расстояние между молекулами и уменьшает количество ближайших соседних молекул. Например, каждый атом аргона окружен двенадцатью соседями в твердом состоянии, а в жидком – десятью.

Удельная теплоемкость жидкой воды в два раза превышает удельную теплоемкость льда или пара. Это связано с тем, что усиливающееся движение молекул вызывает разрывы водородных связей. Энергия, расходуемая на этот процесс, не увеличивает

кинетическую энергию молекул, т.е. температуру. Таким образом, вода – один из наилучших буферов изменения температуры.

*Точка кипения* воды также необычно высока. Это опять так объясняется множеством водородных связей, мешающих молекулам воды покинуть жидкость и перейти в газообразное состояние. Это уменьшает давление пара. Кипение невозможно, пока давление пара не сравняется с наружным давлением, что достигается только при относительно высоких температурах.

*Теплота испарения воды* высока тоже в связи с водородными связями. Даже при 100 °С в жидкой воде остается примерно 75 % водородных связей. Для перехода воды из жидкого в газообразное состояние, эти связи должны быть разрушены. Естественно, это требует немалых энергетических затрат. Понятно, что чем ниже температура воды, тем больше действующих водородных связей и тем выше удельная теплота испарения. Например, при 0 °С она составляет 44,8 кДж Моль<sup>-1</sup>.

Большое поверхностное натяжение воды также объясняется наличием водородных связей, которые удерживают молекулы жидкой воды вместе сильнее, чем молекулы других жидкостей. Понижение температуры значительно увеличивает количество водородных связей и, соответственно, силу поверхностного натяжения. Интересно, что если капельку воды (диаметром 1 мм) покрыть слоем гидрофобного вещества, то такая капля сможет долго не расплываться и даже плавать по поверхности воды.

Вязкость жидкости определяется легкостью, с которой молекулы жидкости могут двигаться относительно друг друга. Понятно, что это зависит от сил, удерживающих молекулы вместе. Трехмерная структура воды, скрепленная водородными связями, достаточно прочно удерживает молекулы, причем с ростом температуры количество действующих водородных связей снижается и вязкость также падает. Вязкость воды снижается с давлением (при температурах ниже 33 °С).

Необходимо также отметить, что вода неоднородна и химически. Кроме обычной (H<sub>2</sub>O) воды в природе существует так называемая *тяжелая вода* – оксид дейтерия (D<sub>2</sub>O). Примесь тяжелой воды очень мала (1:5000). Тяжелая вода ядовита благодаря своей радиоактивности, но в малых дозах оказывает стимулирующее действие. Физические характеристики обычной и тяжелой воды несколько различаются (табл.).

Таблица 2

Основные физические характеристики воды и тяжелой воды

Свойства	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O
Плотность при 20 °С	0,998	1,105
Относительный объем молекул	1	1,0037
Точка плавления	0 °С	3,82 °С

Точка кипения	100 °С	101,42 °С
Температура максимальной плотности	3,98 °С	11,6 °С
Диэлектрическая постоянная	82	80,5
Коэффициент вязкости при 20 °С	10,09	12,6
Молекулярный вес	18,02	20,03

---

## **Индексы оценки качества водных экосистем**

В настоящее время в мировой практике отсутствует сколько-нибудь формализованная классификация индексов и критериев, рекомендуемых для решения конкретных задач гидробиологического мониторинга.

Несмотря на то, что и естественные условия водоемов, и виды загрязнений очень разнообразны, можно выделить несколько универсальных реакций сообществ водных организмов на ухудшение качества воды. Прежде всего, это:

- 1) уменьшение видового разнообразия (в 2-4, а иногда и в десятки раз);
- 2) изменение обилия водных организмов.

Причем обилие может как снижаться (при очень высоком уровне загрязнения или при наличии токсичных загрязнителей), так и расти по сравнению с нормальным состоянием сообщества. Этот рост объясняется тем, что в водоемах, особенно при их загрязнении органическими веществами, могут оставаться немногие, но устойчивые к загрязнению виды животных. В таких условиях они достигают очень высокого обилия.

Именно эти закономерности применяются во многих методиках биоиндикации. К их числу относятся индексы видового разнообразия и методы, учитывающие соотношение обилия разных групп водных организмов. Кроме этого, часто учитывается способность определенных групп организмов обитать в водоемах с тем или иным уровнем загрязненности. Надо особо отметить то, что представители любой надвидовой систематической группы (рода, семейства, отряда) практически никогда не обладают одинаковыми экологическими потребностями. В состав таких групп могут входить совершенно разные с точки зрения отношения к загрязнению виды: устойчивые к загрязнителям, неустойчивые, виды-универсалы, способные жить в очень широком спектре внешних условий и т.д. Одной из распространенных ошибок является использование надвидовых таксонов как индикаторов качества воды без критического рассмотрения набора входящих в этот таксон видов.

Необходимо помнить, что в своем естественном состоянии различные природные водоемы могут сильно отличаться друг от друга. На водную флору и фауну действуют такие показатели как глубина водоема, наличие и скорость течения, кислотность воды, мутность, температурный режим, количество растворенной органики, соединений азота и фосфора. На все эти параметры влияет как антропогенная нагрузка, так и естественные процессы, происходящие в водоемах. Значит, для водоемов разных типов в норме будет характерен разный видовой состав и обилие гидробионтов.

Видовое разнообразие складывается из двух компонентов [по: Одум, 1986]:

1) видового богатства, или плотности видов, которое характеризуется общим числом имеющихся видов;

2) выравненности, основанной на относительном обилии или другом показателе значимости вида и положении его в структуре доминирования.

Виды, входящие в состав биоценоза, очень сильно различаются по своей значимости. Традиционно принято выделение следующей иерархии видов: *руководящие* (или «*доминантные*») виды; за ними следует группа «*субдоминантов*»; остальные же виды считаются *второстепенными*, среди которых отмечают *случайные* или *редкие*. Значение отдельных видов должно определяться тем, какую роль играют они в функционировании экосистемы или в продукционном процессе. Но при исследованиях водных сообществ установить истинную функциональную роль видов нелегко, если об их значении судить только по обилию, т.е. численности и биомассе.

Как показатель качества воды также используют *соотношение количества видов*, по-разному относящихся к загрязнению. При усилении загрязнения, как правило, уменьшается обилие стенобионтных и олигосапробных видов животных, в результате чего возрастает относительная доля эврибионтных и сапробионтных видов. О.М. Кожова [1986] разделила виды гидробионтов на четыре группы: 1 – чувствительные и устойчивые, 2 – чувствительные и неустойчивые, 3 – нечувствительные и неустойчивые, 4 – нечувствительные и устойчивые. Группа 1 – лучшие индикаторы загрязнения; при усилении загрязнения виды группы 2 обычно мигрируют (при наличии соответствующей способности), а группы 3 – погибают. При дальнейшем загрязнении начинают доминировать представители группы 4.

К этой группе критериев относятся и так называемые *биотические индексы*, предложенные В. Бекком, Т. Биком, Ф. Вудивиссом, Т. Грэхемом и Р. Патрик. Оценка степени загрязнения с использованием биотических индексов зависит от числа встреченных на станции видов. При этом организмы, неустойчивые к загрязнению, влияют на итоговую оценку сильнее, чем устойчивые виды. В связи с этим, окончательный результат зависит от видового разнообразия и от того, какие виды это разнообразие создают.

## Уровень сапробности водной экосистемы

Важнейшей комплексной характеристикой состояния водоема является уровень его *сапробности*.

Система сапробности – эта та часть гидроэкологии, которая претендует на быструю и емкую оценку типа водоема в зависимости от соотношения обилий отдельных видов индикаторных организмов. Изначально в используемую классификационную терминологию был заложен определенный понятийный дуализм. С одной стороны – это *классификация организмов* по их сопротивляемости загрязнению (органической нагрузке, недостатку кислорода, присутствию соединений сероводорода), поскольку:

**Сапробность** (от греч. *sapros* - гнилой) - это комплекс физиологических свойств данного организма, обуславливающий его способность развиваться в воде с тем или иным содержанием органических веществ, с той или иной степенью загрязнения.

С другой стороны, – *классификация водоемов* по сапробности прямого отношения к той или иной «физиологической способности отдельных видов организмов» не имеет – это типичное районирование водоемов по соотношению двух конкурирующих абиотических факторов: «концентрации органических веществ естественного (в основном, детритного) характера» и «концентрации растворенного кислорода» [6].

**Сапробность** – характеристика водоема, показывающая уровень его загрязненности органическими веществами и продуктами их распада. По нарастанию количества органических веществ различают водоемы **олигосапробные** (практически незагрязненные), **бета-мезосапробные** (слабо или умеренно загрязненные), **альфа-мезосапробные** (загрязненные) и **полисапробные** - сильно загрязненные органикой.

От олигосапробной к полисапробной зоне ухудшаются многие важные для водных обитателей показатели: уменьшается содержание растворенного в воде кислорода, необходимого для дыхания гидробионтов, нитраты превращаются в более токсичные нитриты и аммонийные соединения. Сульфаты переходят в сульфиты, сульфиды и далее до образования сероводорода. При этом уменьшается количество видов живых существ, требовательных к содержанию кислорода, вплоть до полного их исчезновения. В то же время виды, способные выдержать изменение химического состава воды и недостаток кислорода, могут даже увеличить свою численность за счет притока питательных веществ и исчезновения конкурентов. Происходит *эвтрофирование водоема*. По мере дальнейшего загрязнения ситуация ухудшается: исчезает все больше видов, нарушаются пищевые связи, нарушаются круговороты веществ и использование энергии в системе. Снижается устойчивость экосистемы, ее способность к переработке веществ и «самоочищению», экосистема деградирует.

В одном и том же водоеме могут быть участки (зоны) с разной сапробностью. Зачастую это является естественным свойством водоема, не связанным с антропогенным воздействием. Например, в прибрежной зоне у топких берегов обычно располагается альфа-мезосапробная зона – здесь активно идут естественные процессы старения водоема, связанные с его зарастанием. Пробы воды, взятые с наиболее глубоких участков, дают нередко характерную полисапробную картину. Весь же водоем в целом с учетом характеристики разных жизненных форм, по субъективному мнению эксперта-гидробиолога, может быть охарактеризован, как переходный от бета- к альфа-мезосапробному типу.

Иногда специально выделяют также особую группу **дистрофных** водоемов. Как правило, это торфяные озера, таинственные и страшные «окна» в трясинах. Несмотря на высокое содержание органических веществ, процессы жизнедеятельности в них протекают слабо; дистрофные водоемы отличаются бедностью видового состава гидробионтов и малой их биомассой. Это связано с особыми свойствами в них воды, обладающей кислой реакцией, высоким содержанием гуминовых кислот (из-за чего она часто имеет темный оттенок) а также веществ-антисептиков, выделяемых сфагнумом.

Для каждой зоны сапробности можно выделить тесно связанное с ней подмножество видов гидробионтов (полисапробы, мезосапробы, олигосапробы), которые считаются ее индикаторами. В системе сапробиологического анализа существуют специально разработанные списки индикаторных организмов с указанием их принадлежности к той или иной зоне сапробности.

О.П. Оксийук и В.Н. Жукинский в своих классификационных таблицах соотнесли две шкалы: **сапробности** и **трофности**. Если под сапробностью понимается интенсивность органического *распада*, то трофность означает интенсивность органического *синтеза* (продуктивность). В природе оба процесса – органический синтез и распад – существуют параллельно и состоят друг с другом в многократном взаимодействии, что позволяет говорить об аналогии ступеней сапробности и трофики: «олигосапробность - олиготрофия», «β-мезосапробность - мезотрофия», «α-мезосапробность - эвтрофия» и «полисапробность - гипертрофия». В то же время, ряд исследователей подчеркивает неполное совпадение форм трофики и сапробности, особенно в мезосапробных зонах и для непроточных водоемов.

Все системы сапробности учитывают фактически только нетоксичные органические загрязнения, которые влияют на организмы в первую очередь через изменение кислородного режима. Для учета влияния токсических органических и неорганических соединений делаются попытки разработать шкалы **токсобности** и затем

объединить их со шкалами сапробности в единую шкалу сапротоксобности, причем существуют противоположные мнения о возможности такого объединения.

В.И. Жадин [1964] указывал: «Под **токсобностью** мы понимаем свойство организмов существовать в водах, содержащих то или иное количество токсических веществ минеральной или органической природы, и способных использовать часть этих веществ себе в пищу или сорбировать на своей поверхности или внутри тела. В зависимости от степени загрязнения водоема токсичными веществами можно различать зоны токсобности: **политоксобную**, **мезотоксобную** и **олиготоксобную**, заселяемые организмами, выносящими соответственно сильную, среднюю и слабую степени токсического загрязнения водоема...».

## **Классификации планктона**

Существует множество классификаций планктона по разным признакам.

**По качественному составу** планктон делится на:

- Фитопланктон - растительный планктон: фитопланктон, состоящий из хлорофиллоносных растений; сапропланктон, включающий бактерии (бактериопланктон) и грибы.
- Зоопланктон - животный планктон.

**По количественному развитию:**

- Монотонный, однообразный планктон, очень однородного состава, состоящий на 9/10 из одного и того же вида.
- Превалирующий планктон, когда преобладающая группа организмов составляет больше 1/2 всего объема планктона.
- Полимиктический, смешанный планктон, в котором присутствует несколько доминирующих видов.
- Пантомиктический планктон, разнообразный, пестрого состава, без преобладания какого-нибудь вида или группы организмов.

**По географическому положению водоема:** арктический, бореальный, умеренный, субтропический, тропический, антарктический, высокогорный (высокоальпийский; субальпийский), Балтийский, Черноморский планктон и т.д.

**По местопребыванию или по типу водоема:**

- Галипланктон - планктон морей.
- Лимнопланктон - планктон пресных вод.
- Эвлимнопланктон - планктон озер.
- Гелеопланктон – планктон прудов.
- Потомапланктон, реопланктон - планктон рек.
- Тельматопланктон, или фосопланктон - планктон луж.
- Кренопланктон - планктон ключей, родников.
- Планктон болот.
- Гифальмиропланктон - планктон солоноватых вод.

**По горизонтальному распространению:**

– Океанический планктон - планктон открытого моря, за пределами континентальной ступени.

– Неритический планктон – прибрежный планктон моря, в пределах континентальной ступени.

– Промежуточный, безразличный (океаническо-неритический) планктон.

**Или (второй вариант):**

– Пелагический планктон – планктон открытой части водоема.

– Литоральный планктон - планктон прибрежной части водоема.

**По вертикальному распределению:**

– Эпипланктон - поверхностный планктон (0 - 50 м).

– Мезопланктон – планктон средних слоев (50 - 200 м).

– Инфрапланктон - планктон средних слоев (200 – 500 м).

– Гипопланктон, или батипланктон - глубинный планктон (ниже 500 м).

**По вертикальному распределению, но в зависимости от света:**

– Евфотический, или сильно световой, планктон.

– Дисфотический, или бессветовой, планктон.

– Олигофотический, или слабосветовой, планктон.

**По встречаемости во времени:**

– Постоянный, круглогодичный, перманентный планктон – планктон, встречающийся в течение всего года в водоеме.

– Периодический планктон: летний, зимний, весенний, осенний.

**Или (второй вариант):**

– Голопланктон, или перманентный планктон, проводящий весь свой жизненный цикл в свободноплавающем состоянии.

– Меропланктон, или временный планктон, входящий в толщу воды только в известных стадиях своего развития.

**По отношению к температуре:**

– Холодноводный планктон.

– Тепловодный планктон.

**По размерам организмов, входящих в планктон:**

– Мегалопланктон, состоящий из организмов, видимых простым глазом с борта судна (больше 100 мм). Размеры могут достигать нескольких метров. Распространен только в морях.

– Макропланктон, состоящий из организмов, размером 5 мм – 100 мм.

– Мезопланктон, куда относятся относительно крупные формы копепод и кладоцер в пресных водах, размерами от 1 до 5 мм.

– Микропланктон, состоящий из мелких организмов, размерами от 50 мкм до 1 мм. Сюда относится большинство представителей фитопланктона, коловратки, науплии ракообразных и многие взрослые рачки.

– Нанопланктон, под которым подразумеваются мельчайшие планктеры, размерами 5 - 50 мкм.

– Ультрапланктон, состоящий из мельчайших организмов, размерами 5 мкм и меньше, проходят через плотные фильтры (многие бактерии и вирусы).

–  $\mu$ -водоросли, размерами меньше 5 мкм,  $\mu$ -планктон,  $\mu$ -клетки.

Группы планктических организмов в биологическом отношении далеко не равноценны: одни проводят во взвешенном состоянии всю свою жизнь, другие входят в планктон только на известных стадиях, третьи встречаются в планктоне в качестве эпипланктеров, т.е. прикрепляясь к другим планктическим организмам, четвертые в планктон попадают случайно, отрываясь от дна при волнениях, под влиянием течения и т.п.

Подробного рассмотрения заслуживает биологическая классификация планктона, разработанная по отношению к озерному планктону, которая группирует планктон в отношении степени планктизма.

Еще Апштейн (1896) различая в озере три области - литоральную, пелагическую и глубинную, выделял пелагическую (лимнетическую) область, считая ее областью, в которой пребывают организмы планктона. Однако даже при таком узком понимании планктона как населения пелагиали не все организмы, встречающиеся в этой области, по Апштейну, характеризуются как лимнетические, т.е. не все принадлежат к собственно планктону. Он различает три группы:

**1. Активно-лимнетические организмы**, под которыми понимают те организмы планктона, которые всю жизнь проводят в свободной воде, находя здесь благоприятные условия и размножаясь.

**2. Пассивно-лимнетические организмы**, к которым относят формы, прикрепляющиеся к лимнетическим (планктическим) организмам, на которых они проводят в свободной воде свою жизнь и без которых недолго принадлежат к планктическим.

**3. Тихо-лимнетические (случайно-лимнетические, случайно-планктические) организмы** – это те организмы, которые только благодаря механическим причинам (ветер, течения) выносятся в лимнетическую область. К таковым относятся, например, личинки комаров, некоторые корненожки.

Среди настоящих лимнетических, или эвпланктических, организмов Апштейн, кроме встречающихся в планктоне круглый год (постоянный, круглогодичный планктон), отмечает организмы, которые остаются в планктоне только часть года, принадлежат к так называемому периодическому планктону (личиночные формы, обладатели которых живут на дне; организмы, живущие в планктоне, но имеющие покоящиеся стадии, которые в течение периода покоя выпадают из планктона и находятся на дне). Таким образом, группа периодического планктона объединяет не только настоящий меропланктон, или временный планктон, но и такие организмы, которые в более поздних классификациях относятся к истинно-планктическим, т.к. наличие покоящихся стадий не препятствует отнесению организма к истинно-планктическим.

Воронков (1913), посвящая отдельную главу биологической классификации озерного планктона, различает следующие группы:

**1. Истинно-планктические организмы**, которые всю свою жизнь проводят в открытой воде. Только покоящиеся стадии их могут опускаться на дно. Даже яйца, развивающиеся без периода покоя, «летние» яйца, остаются или привешенными к телу животного, или помещаются в особых камерах.

**2. Временно-планктические организмы**, которые только известный период своей жизни проводят в пелагическом состоянии.

**3. Пассивно-планктические организмы**, которые ведут сидячий образ жизни, прикрепляясь к другим планктерам.

**4. Случайно-планктические организмы**, которые в планктоне встречаются случайно, главным образом благодаря действию ветра, течениям и вообще движениям воды.

**5. Псевдопланктон** – различные частицы, плавающие в воде и с планктоном не имеющие ничего общего: детрит, пыльца растений, шкурки насекомых [3].