

# Тема 4а

## ***ВОДНЫЕ ПРИРОДНЫЕ СРЕДЫ***

### План лекции

**Водные среды суши.**

**Поверхностные водоемы.**

**Подземные пресные воды.**

**Пограничный слой (поверхностная пленка).**

**Абиотические факторы и процессы в водных средах:**

- температурный режим
- освещенность над зеркалом воды
- прозрачность воды
- скорость течения и перемешивание воды и другие гидрологические параметры
- гидрохимические показатели воды (рН, Eh, содержание взвешенных и растворенных веществ, абиогенных и биогенных элементов, органического вещества, газовый режим)
- характер и динамика донных отложений

# Вопросы в экзаменационных билетах

1. Экосистемы озер, основные абиотические факторы и процессы, влияющие на состояние и биоту водоемов.
2. Подземные воды, основные абиотические факторы и процессы, влияющие на состояние грунтовых вод.

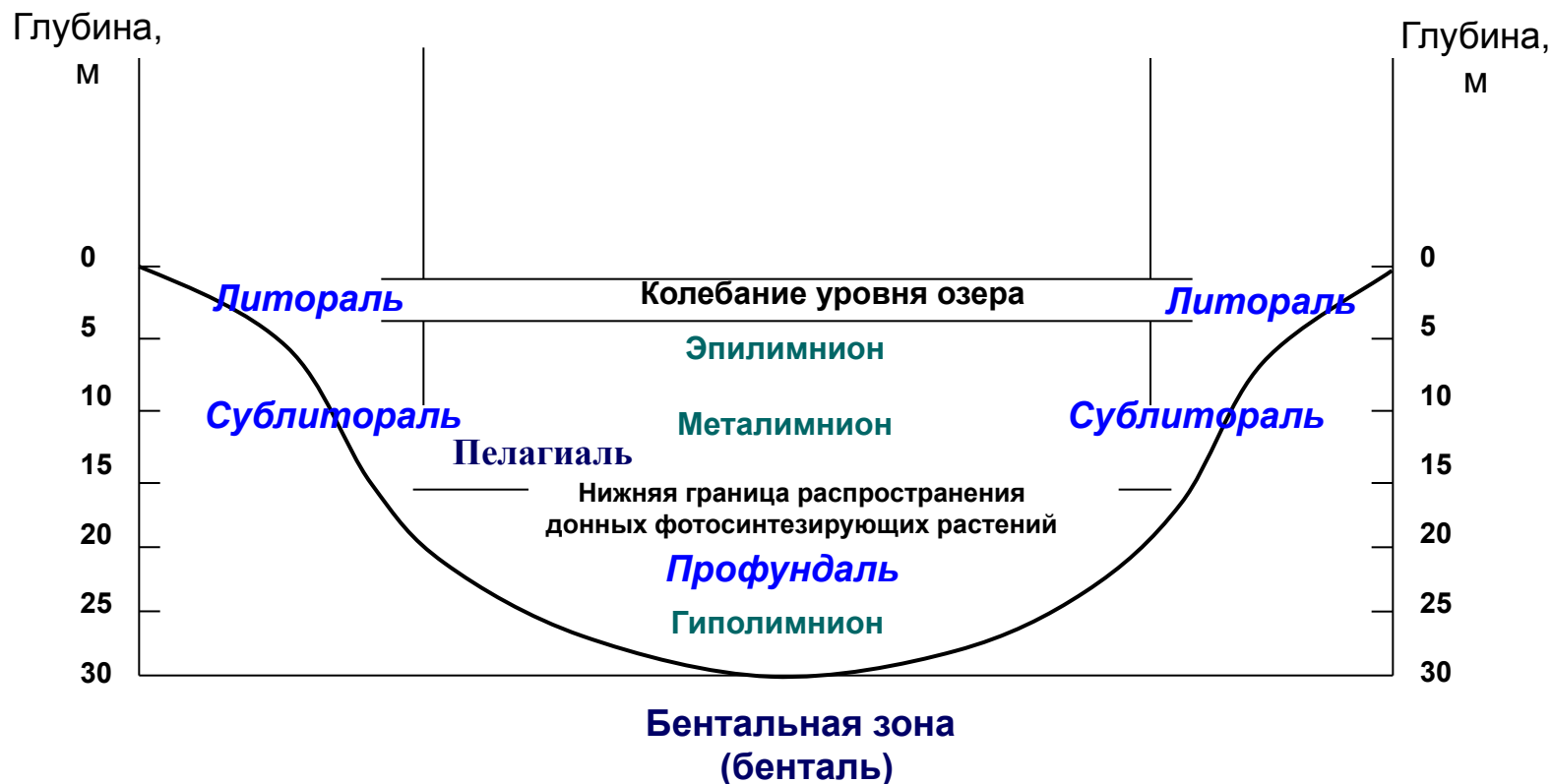
**Кн. 1, с. 74-102**

**Водные среды суши: речные, озерные, водохранилища, подземные воды.**

**Отличия в режиме перемешивания толщи воды (гидрологические условия): роль течения, соотношения поверхности к глубине, ветрового перемешивания.**

**В отличие от речных экосистем, донные осадки, загрязняющие вещества в стоячих водоемах, в озерах и частично в водохранилищах накапливаются, что, влечет за собой глубокие и часто необратимые изменения их экосистем.**

# Экологические зоны озер



**Эвфотическая зона** – толща воды от поверхности до предельной глубины, куда проникает свет и в которой возможен фотосинтез.

**Автотрофная сукцессия в озерах: олиготрофное, эвтрофное, дистрофное озеро.**

## ***Подземные пресные воды***

**Капиллярная вода (влага) – удерживается почвенными частицами.**

**Гравитационная вода – не удерживается капиллярными силами.**

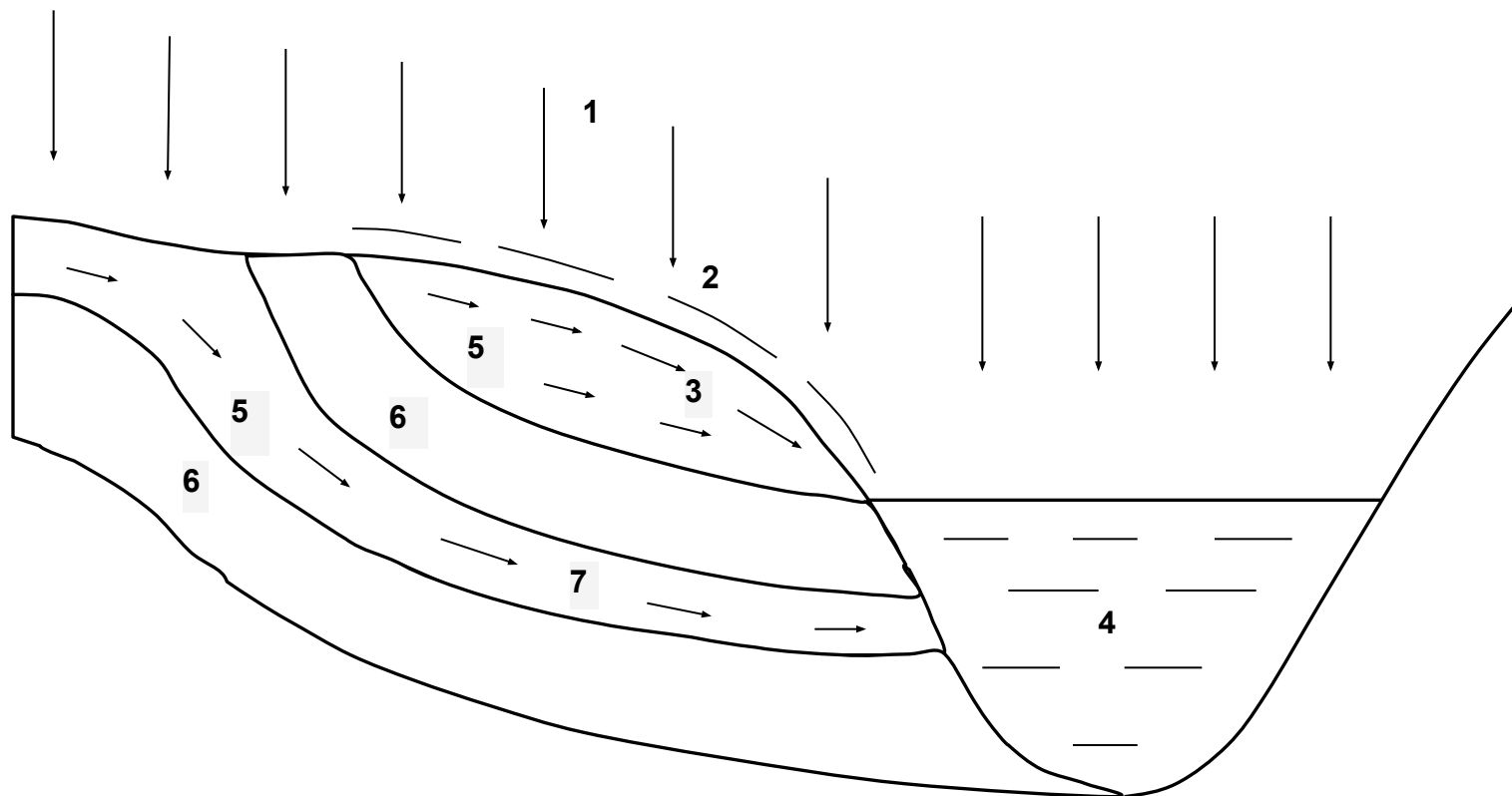
**Флюационная вода – просачивается (инфильтруется) вниз по порам и трещинам или свободно вливается в какую-либо пустоту в породах. Просачивание или стекание воды происходит до тех пор, пока она не достигнет непроницаемого слоя горной породы или плотной глины – водоупорного пласта.**

**Грунтовая вода – накапливается над водонепроницаемым пластом в порах, трещинах и пустотах. Ее верхнюю границу называют **уровнем грунтовых вод**.**

**Слои пористого материала, по которым движутся грунтовые воды, – водоносные горизонты. Под действием силы тяжести грунтовые воды могут двигаться по водоносному слою до тех пор, пока не выйдут на поверхность, образуя естественные родники и ключи.**

**По условиям залегания подземные воды разделяют на **верховодку, грунтовые и артезианские**.**

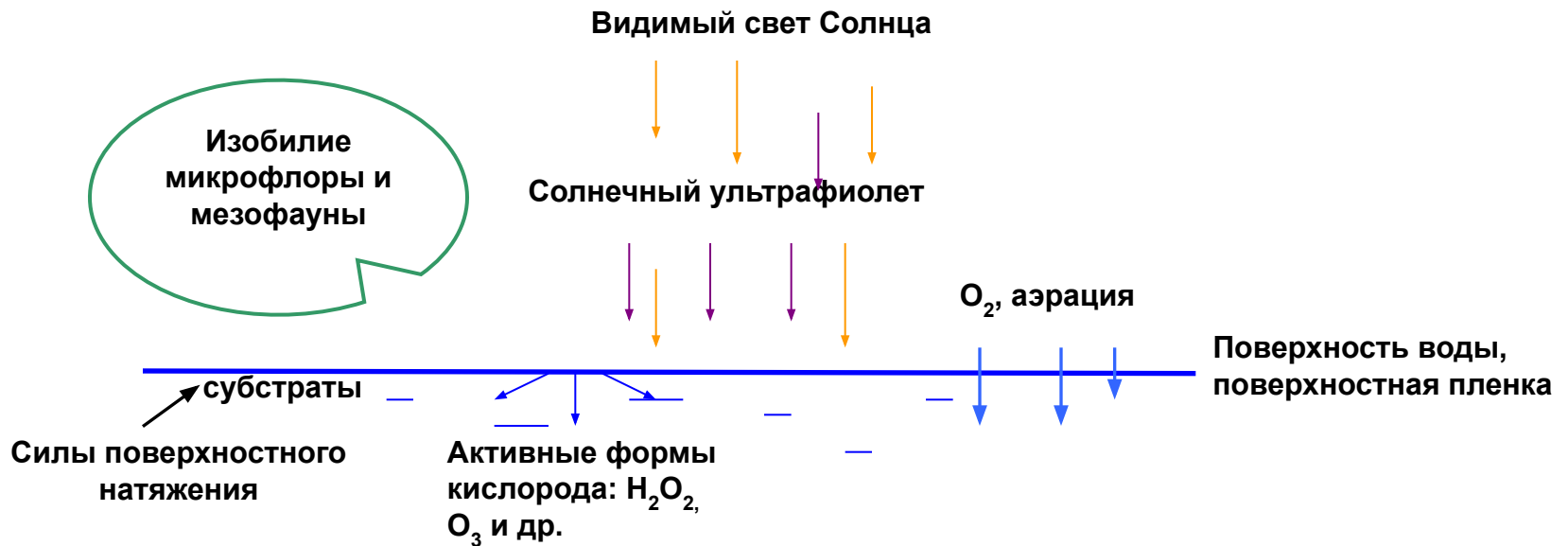
**К верховодке относятся воды, залегающие наиболее близко к поверхности земли при временном переувлажнении. Эти воды наиболее подвержены загрязнению и наиболее изменчивы по составу.**



### Схема образования грунтовых и артезианских вод:

1 – атмосферные осадки; 2 – склоновый сток; 3 – верховодка и грунтовые воды; 4 – река;  
 5 – водоносные горизонты; 6 – водоупорные пласты; 7 – артезианские воды.

**Обмен веществом и энергией с атмосферой происходит в тонком пограничном поверхностном слое (**поверхностной пленке**) воды, свойства которого отличаются от воды в толще. Здесь наблюдается лучшая освещенность, интенсивное испарение и перемешивание, действуют силы поверхностного натяжения.**



**Специфика условий окружающей среды в тонком поверхностном слое воды**

Пограничной зоной водоемов являются также **дно** и **донные отложения**. В донных отложениях создается среда, свойства которой зависят от расстояния до границы раздела вода – донные отложения. Здесь наблюдаются наибольшие концентрации органических веществ, биогенных элементов, загрязнений.

В зависимости от толщины донных отложений в них могут формироваться как **аэробные**, так и **анаэробные зоны**. Трансформация биогенных и загрязняющих веществ, а также обмен с водной средой совершаются в активном слое ила, толщина которого зависит от свойств донных отложений и составляет от 5 до 20 см.



# *Абиотические факторы и процессы в водных средах*

## *Температура*

Верхний слой воды (эпилимнион) подвержен наиболее значительным температурным колебаниям.

**Температурная стратификация** – расположение воды слоями, имеющими разную температуру.

Летом верхние слои воды теплее нижних, – это **прямая стратификация**. Для зимних условий характерна **обратная стратификация** температур, при которой теплее нижние слои. Зимой температура воды наиболее плотного нижнего слоя близка к 4 °С. Лед на поверхности предохраняет водоем от остывания.

Наиболее выражена температурная стратификация в стоячих водоемах: озерах и водохранилищах глубиной не менее 10–12 м. В замкнутых водоемах умеренной зоны на глубине более 12 м температура большую часть времени года может оставаться постоянной.

## ***Влияние температурной стратификации на биоту водоема зависит от лимитирующего фактора***

### ***Лимитирующий фактор – температура.***

Прогрев верхних слоев воды летом усиливает рост водорослей, которые развиваются в верхних освещенных горизонтах, и способствует повышению продуктивности водоема. Накопление органического вещества летом в верхних слоях воды в результате стратификации может затруднять работу водопроводных станций и снижать качество питьевой воды в результате появления в природной воде веществ, ухудшающих ее вкус и запах, а также веществ, снижающих эффективность хлорирования или озонирования воды.

### ***Лимитирующий фактор – недостаток биогенных элементов (азота и фосфора).***

Затрудняется конвективный перенос с глубинных придонных слоев питательных веществ и биогенных элементов, образовавшихся при разложении осевшей биомассы. В этом случае процесс, обратный температурной стратификации – дестратификация – благоприятно влияет на продуктивность водоема.

### ***Лимитирующий фактор – содержание растворенного кислорода.***

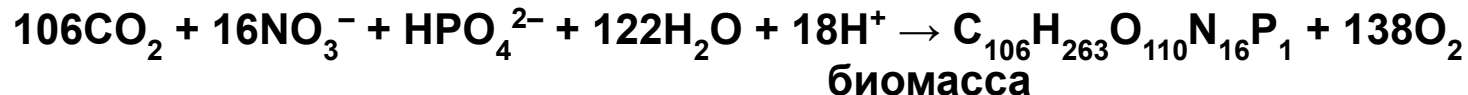
Температурная стратификация для развития гидробионтов неблагоприятна: при повышении температуры снижается растворимость кислорода в воде, в то время как интенсивность обмена возрастает. Это снижает активность дыхания водных организмов.

### ***Лимитирующий фактор – высокое содержание загрязнений в донном иле.***

Дестратификация может приводить к переносу из придонных слоев веществ, угнетающих развитие водорослей.

## Освещенность над зеркалом воды и ее прозрачность

Световая фаза фотосинтеза – выделение кислорода.



**Темновая стадия фотосинтеза** – потребление кислорода водорослями и цианобактериями в процессе дыхания. *Рост фототрофов* (водорослей, растений, цианобактерий) *происходит при положительном балансе фотосинтез – дыхание.*

Активность фотосинтеза, а следовательно и интенсивность образования кислорода, меняется в зависимости от уровня освещенности, который падает с уменьшением прозрачности и увеличением глубины водоема. Активность же дыхания и интенсивность потребления кислорода не зависят от этих факторов, поэтому существует предельная глубина водоема, на которой еще возможен рост растений и водорослей. Эта глубина называется **уровнем компенсации**. Он изменяется в зависимости от времени суток, прозрачности воды и времени года. В океанах в зависимости от широты уровень компенсации располагается на глубине 50–100 м. В пресных водоемах, особенно эвтрофных, уровень компенсации меньше.

**В олиготрофных водоемах** баланс между нарастанием биомассы в результате фотосинтеза и ее потреблением гетеротрофами или в результате абиогенных процессов окисления может быть отрицательным (в ультраолиготрофных водоемах) или нулевым. В этом случае *в донных отложениях органическое вещество не накапливается.*

Если интенсивность фотосинтеза выше скорости разложения органического вещества, например при избытке биогенных элементов (азота, фосфора), происходит накопление биомассы фототрофов, что приводит к перегрузке водоемов органическими веществами.

**В эвтрофных водоемах** баланс положителен, в результате чего органическое вещество накапливается в водоемах и увеличивается толщина донных отложений.

Избыточное накопление или поступление органического вещества и его потребление гетеротрофами может привести к исчерпанию растворенного кислорода в водной среде, к переходу от окислительных процессов к восстановительным: денитрификации, сульфатредукции, метанообразованию при полной смене биоценоза водоема. В результате накапливаются разлагающиеся органические вещества и происходит так называемое **вторичное загрязнение водоема.**

**В искусственных сооружениях биологической очистки сточных вод (биопруды, гидрботанические площадки) потребление органических загрязнений гетеротрофами должно превалировать над его накоплением фотоавтотрофами. При прочих равных условиях полное подавление фотосинтеза в таких сооружениях наблюдается в том случае, если приток энергии, заключенной в органическом веществе, в 50–100 раз превышает приток световой энергии. Если запас энергии органического загрязнения в 10–20 раз меньше энергии дневного освещения, гетеротрофная биомасса уменьшается и очистительная мощность сооружений резко падает.**

**Первичную продукцию и деструкцию и их соотношение можно оценить по количеству  $O_2$ , выделенного фотосинтетиками, и количеству  $O_2$ , поглощенного при одних и тех же температурных условиях. Для этих целей также можно использовать изменения показаний рН. Если преобладает выделение  $CO_2$ , то рН снижается, если фотосинтез и потребление  $CO_2$ , то рН повышается.**

## ***Скорость течения и перемешивание воды***

**Течение способствует перемешиванию воды, выравниванию температуры в водоеме, насыщению ее кислородом, ускоряет поступление питательных веществ со дна водоема, влияет на состав водных биоценозов. При снижении скорости течения до 0,1–0,2 м/с в осадок выпадает минеральная взвесь, в первую очередь соединения кремния и железа. При высоких скоростях течения (> 0,2 м/с и более) в водоемах начинают доминировать виды – **реофилы**, приспособленные к обитанию в таких условиях: колонии прикрепленных диатомовых, нитчатых зеленых водорослей, нитчатых гетеротрофных микроорганизмов, железобактерий.**

## ***Гидрохимические показатели воды***

**pH** природных вод от 3 до 11.

pH большинства рек и озер от 6 до 8. pH прибрежных вод около 9, средний pH воды океана выше 8.

Воды болот – pH 3,4–6,5

Зоны «цветения» водоемов – pH 8,6–9

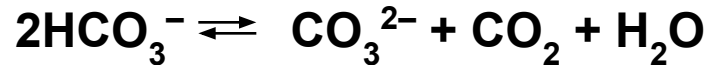
Вода с сульфидсодержащих рудных месторождений – pH 1,0-3,0.

Содовые озера (высокое содержание  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) – pH 11–12.

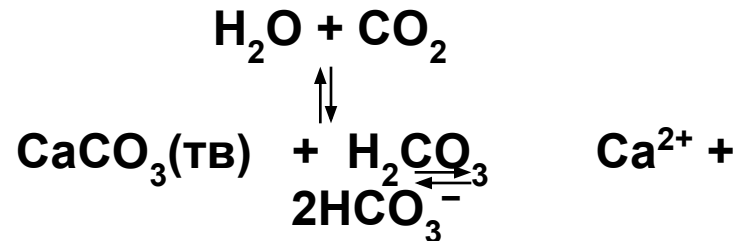
Рыбы выдерживают pH от 5 до 9, отдельные виды могут приспосабливаться к pH до 3,7, плотва – до 10.

При pH ниже 7,5 многие морские организмы погибают.

## Карбонат-бикарбонатная система



Присутствие  $\text{Ca}^{2+}$  и карбонатов кальция определяет буферные свойства вод (карбонатная система служит *pH-задающей*):



Если снижается содержание  $\text{CO}_2$ , то снижается и содержание  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , осаждается карбонат кальция. В нейтральных и слабощелочных водах, где карбонатная система служит *pH-задающей*, *pH* меняется в интервале 6,0–8,5.

Поглощение  $\text{CO}_2$  в процессе фотосинтеза приводит к уменьшению количества  $\text{H}_2\text{CO}_3$  и  $\text{H}^+$ , т.е. к повышению *pH*. При дыхании, наоборот, увеличивается содержание  $\text{CO}_2$  и снижается *pH*. Поэтому *pH* воды в водоемах колеблется в течение суток: ночью *pH* понижается, днем повышается. Амплитуда колебаний *pH* может составить две единицы и более.



## **Окислительно-восстановительный потенциал $E_h$ (редокс потенциал)**

За точку отсчета ( $= 0$ ) принимается реакция при стандартных условиях ( $P = 1$  атм или  $0,1$  МПа,  $T = 25$  °С)



В соответствии с уравнением Нернста  $E = E_o - (RT/nF) \cdot \ln K_a$   
для этой реакции

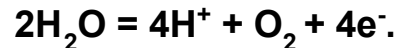
$$E_h = 0,00 + (0,059/2) \lg[\text{H}^+]^2/[\text{H}_2]$$

$$E_h = -0,059\text{pH} - (0,059/2) \lg P_{\text{H}_2}$$

При давлении водорода, равном атмосферному

$$E_h = -0,059\text{pH}$$

Верхний предел  $E_h$  в водных средах при стандартных условиях составляет  $+1,23$ . При более высоких значениях начинается разложение воды (окисление кислорода воды) с выделением кислорода:



Согласно уравнению Нернста в природных условиях, отличающихся от стандартных, потенциал этой реакции

$$E_h = 1,23 + (0,059/4) \lg[\text{H}^+]^4 P_{\text{O}_2}$$

Парциальное давление кислорода в атмосфере составляет  $0,2$  атм ( $0,02$  МПа), поэтому

$$E_h = 1,23 - 0,059\text{pH} + 0,015 \lg 0,2$$

$$E_h = 1,22 - 0,059 \text{ pH}$$

При отсутствии кислорода, низких положительных или отрицательных значениях Eh условия благоприятны для развития анаэробных процессов. Низкий Eh способствует накоплению восстановленных ионов:  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  и др.

В природных средах основными **потенциалзадающими системами** являются система кислорода и окислительно-восстановительные реакции с участием железа, серы и углерода.

Система кислорода как потенциалзадающая доминирует в кислородных щелочных водах.

В зависимости от содержания кислорода, других акцепторов электронов различают следующие режимы:

- **аэробные**, в среде содержится растворенный кислород, Eh высокий;
- **аноксичные** (аноксигенные), в среде отсутствует атмосферный кислород, присутствуют нитраты, сульфаты или окисленные формы ионов металлов;
- **анаэробные**, присутствуют только восстановленные формы азота, серы и металлов, Eh низкий.

Метаногенерация протекает только в анаэробных условиях. Метан не образуется, если в среде присутствуют нитраты и протекает денитрификация.

## Содержание взвешенных и растворенных веществ

Взвешенные вещества характеризуют по **гранулометрическому составу** или **гидравлической крупности** (скорость осаждения частиц взвеси в воде при температуре 10 °С).

*Характеристика взвешенных веществ по гранулометрическому составу*

Взвесь	Гидравлическая крупность, мм/с	Размер частиц взвеси, мм
Песок		
крупный	100	1
средний	53	0,5
мелкий	6,9	0,1
Ил	1,7–0,5	0,05–0,027
Мелкий ил	0,07–0,017	0,01–0,005
Глина	0,005	0,0027
Тонкая глина	0,0007–0,00017	0,001–0,0065
Коллоидные частицы	0,000007	0,0001 и менее (до 0,000001)

Содержание взвешенных веществ в воде определяет **мутность** воды. Чем сильнее выражены эрозионные процессы в зоне водосбора, выше скорость течения воды, тем больше мутность.

На территории России к зонам с наименьшей мутностью (менее 50 мг/л) относятся воды тундры и лесов. Большая мутность (150–500 мг/л) характерна для рек степных районов. В реках, берущих начало в горных районах Кавказа, вода наиболее мутная.

## Растворенные вещества – минеральные и органические

Состав и содержание **минерального растворенного вещества** в речной и озерной воде формируются при контакте ее с почвой и горными породами, через которые она проходит.

В грунтовой воде содержание растворенных веществ больше, чем в водах поверхностного стока. 98% всех подземных вод верхней части литосферы – это минерализованные, соленые и главным образом рассольные воды с высоким содержанием хлоридов (более 50 г/л).

### Вода

- **пресная** – солесодержание до 1 г/л,
- **солончатая** – солесодержание 1–25 г/л
- **соленая** – солесодержание более 25 г/л

В поверхностных пресных водах различают слабую минерализацию – до 200 мг/л, среднюю – 200–500 мг/л и повышенную – 500–1000 мг/л.

Основные ионы:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ .

В зависимости от того, какой анион преобладает в составе солей, природные воды разделяют на **гидрокарбонатные (карбонатные)**, **сульфатные** и **хлоридные**, а по преобладающему катиону на **кальциевые**, **магниевые** и **натриевые**.

Повышенные концентрации в природных и техногенных водах неорганических ионов азота  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$  свидетельствуют об их загрязненности. Наличие  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_2^-$  ионов при отсутствии  $\text{NO}_3^-$  – о недавнем их загрязнении, присутствие ионов  $\text{NO}_3^-$  – о раннем загрязнении.

## Органическое вещество

**Аллохтонное вещество** (от греч. *allos* – другой и *chthou* – земля) – поступление извне, с площади водосбора с ливневыми, тальными или сточными водами, приносимое ветром.

**Автохтонное вещество** – поступление в результате внутриводоемных процессов – продукты фотосинтеза, автотрофной фиксации  $\text{CO}_2$  нефотосинтезирующими микроорганизмами, продукты метаболизма живых организмов, а также биологического распада остатков организмов.

Для рек наиболее характерно аллохтонное органическое вещество, для морей, озер и водохранилищ – автохтонное. Доля автохтонного вещества в озере или водохранилище повышается с увеличением их размеров и глубины.

**Взвешенное органическое вещество (ВОВ)**, включая отмершие остатки организмов (детрит), и **растворенное органическое вещество (РОВ)**.

Доля взвешенного органического вещества, частично включающего и массу живых организмов, приблизительно в 10 раз больше массы РОВ. В среднем концентрация углерода растворенных органических веществ в незагрязненных природных водах колеблется от 0,5–1 мг/л до 10–20 мг/л, в болотных водах может достигать 200–400 мг/л.

Наиболее активная роль в трансформации РОВ природных вод принадлежит бактериям. Доля других организмов водной биоты в деструкции РОВ не превышает 20%.

Окраска природных вод, или их **цветность**, как правило, связана с наличием в водоеме **гумусовых веществ**, прежде всего **фульвокислот**, поступающих с болотными водами или образующихся при распаде органического вещества водной растительности.

В России наиболее высокую цветность имеют поверхностные воды рек и озер, расположенных в таежной зоне, где много торфяных болот и заболоченных лесов. В лесостепной зоне цветность значительно снижается и минимальна в степных районах.

Растворенные в природных водах органические вещества играют основную роль в **миграции многих химических элементов** в подземных и поверхностных водах.

## **Газовый режим**

Для водной биоты наибольшее значение имеют растворенные кислород и  $\text{CO}_2$ . Вследствие низкой растворимости и диффузии в воде **кислород** часто является **лимитирующим фактором** для развития водной биоты.

Вода обогащается кислородом из атмосферы, а также в результате выделения его водной растительностью и микроорганизмами в процессе фотосинтеза. Доля этого кислорода в общем его количестве составляет более 80%.

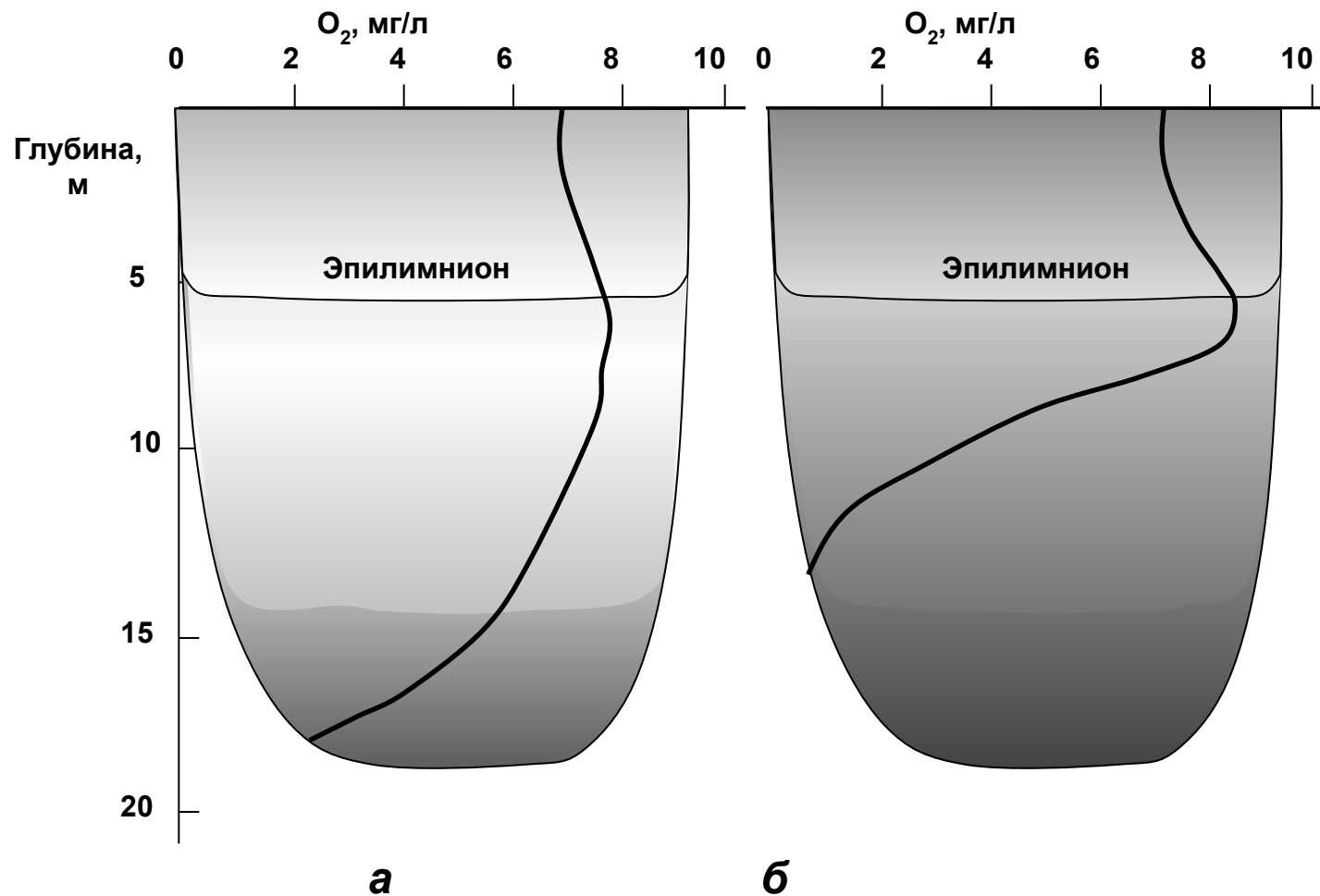
При интенсивном перемешивании и в местах развития водорослей содержание кислорода в воде может превышать равновесное насыщение.

Содержание растворенного кислорода в водоемах минимальное в темное время суток, а в замерзающих водоемах – зимой, поскольку проникновение кислорода в воду из атмосферы затруднено из-за ледового покрова. Зимой при значительном количестве органических веществ, например вследствие подледного сброса сточных вод, возможен особенно серьезный дефицит кислорода, приводящий к замору рыб.

Уменьшение содержания кислорода в водоемах с глубиной называется **вертикальным распределением растворенного кислорода**.

На поверхности водоема интенсивнее атмосферная аэрация и фотосинтез, поэтому во многих водоемах верхние слои воды (эпилимнион) более насыщены кислородом, чем нижние.

В грунтовых водах фотосинтез невозможен, поэтому содержание растворенного кислорода в них уменьшается по мере просачивания вод сквозь почвенные слои и пребывания в подпочвенных горизонтах.



**Содержание растворенного кислорода в зависимости от глубины водоема:  
а – олиготрофного, б – эвтрофного.**

Содержание  $\text{CO}_2$  в природных водах изменяется в широких пределах – от десятых долей до нескольких сотен мг/л и подвержено сезонным и суточным колебаниям. Периоды максимального содержания  $\text{CO}_2$  соответствуют минимальному содержанию  $\text{O}_2$ . Более высокие концентрации  $\text{CO}_2$  наблюдаются в глубинных и придонных слоях воды.

Образовавшийся в результате дыхания и биологического разложения органических веществ  $\text{CO}_2$  удаляется в результате улетучивания в атмосферу из-за пересыщенности им воды, а также растворения карбонатных пород и потребления в процессе фотосинтеза.

В анаэробных условиях образуются **сероводород** и **метан**.

$\text{H}_2\text{S}$  образуется преимущественно в результате жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий, а также при аммонификации при недостатке кислорода и наличии сульфатов в воде.

$\text{CH}_4$  образуется вследствие жизнедеятельности метанообразующих бактерий в строго анаэробных условиях (в болотах, грунтах и придонном слое многих озер и прудов).

Сероводород и метан сравнительно легко окисляются в аэробных условиях микроорганизмами, а также в результате химических реакций, поэтому содержание их в воде невысокое.



## **Ил и донные осадки в экосистеме водоема**

**Донный ил** формируется в результате осаждения взвешенных минеральных частиц и органических веществ, образования и осаждения нерастворимых карбонатов. Ил в верхних слоях, как правило, рыхлый и более кислый, в нижних – плотный и менее кислый.

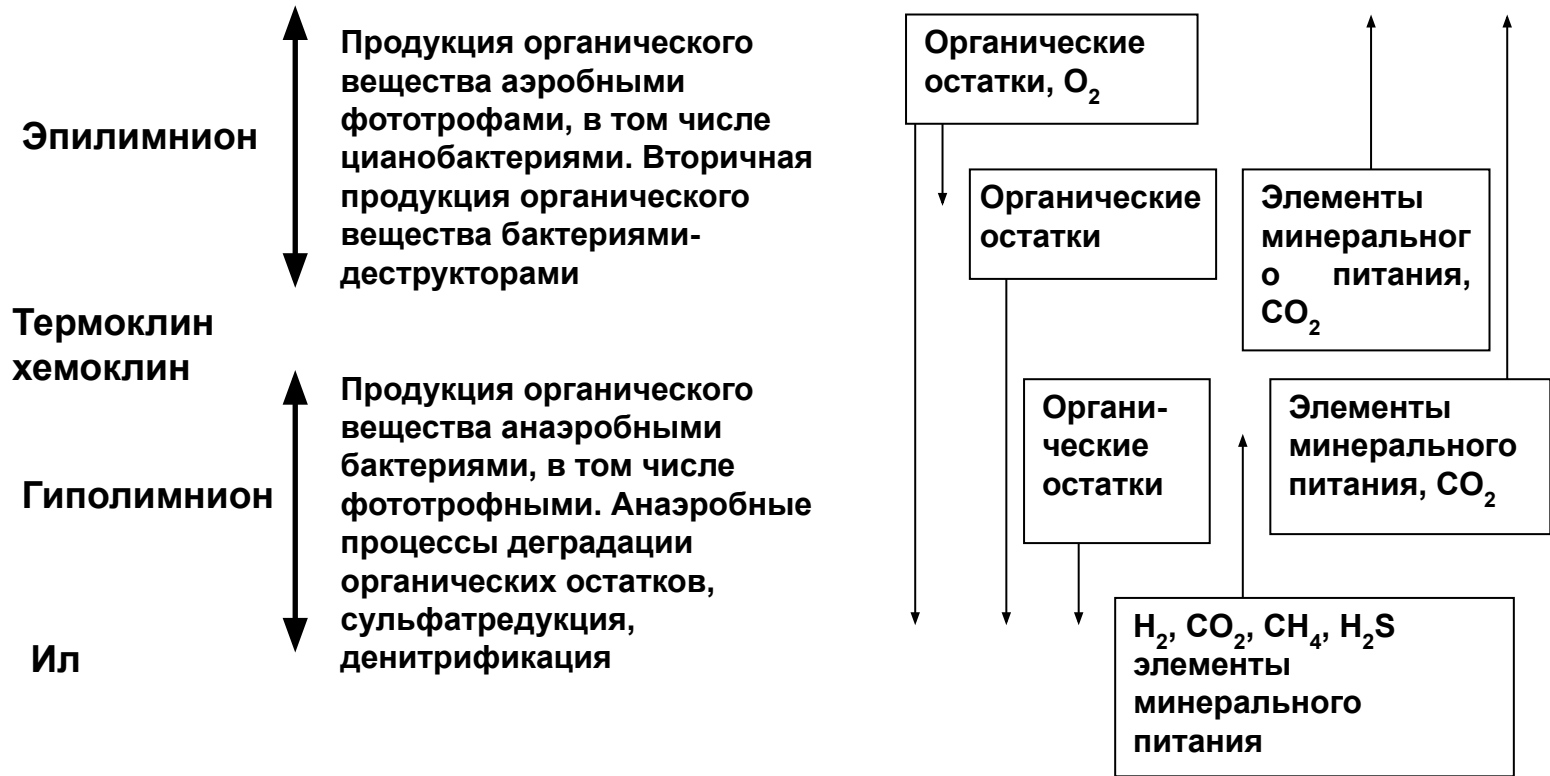
В условиях кислородсодержащих вод образуется **окислительный ил**. Присутствием гидроксидов Fe (III) обусловлена желтая, бурая, красная его окраска. Этот ил характерен для речных экосистем.

Для озер тундры, тайги, влажных тропиков характерен **глеевый ил**. В нем избыток органических веществ и мало сульфатов. К глеевому илу относятся **сапропели**. Окраска ила сизая, зеленоватая, серая, охристо-сизая.

В морях и океанах, озерах степей и пустынь, где преобладают сульфатные воды, развивается сульфатредукция, образуются  $H_2S$  и сульфиды железа, формируется **сероводородный ил** серого, черного и синеватого цвета.

В пресноводных водоемах большую часть донных отложений составляют **карбонаты кальция**.

Карбонаты образуются в результате потребления растворенного  $CO_2$  растениями в процессе фотосинтеза, что приводит к увеличению pH и содержания  $CO_3^{2-}$ , осаждению  $CaCO_3$ . Процесс может быть очень интенсивным. Например, заросли водного растения элодеи канадской в расчете на 100 кг сухой массы в течение дня могут привести к осаждению 2 кг  $CaCO_3$ . В иле под харовыми водорослями может содержаться до 72,4% карбонатов. Карбонаты образуются вне растительного организма, а именно, в зоне контакта растения с водным раствором. При осаждении карбонатов в осадок переходит и Sr. Это один из основных путей депонирования такого радиоизотопа как  $^{90}Sr$ .



**Экосистема поверхностного замкнутого стратифицированного водоема**