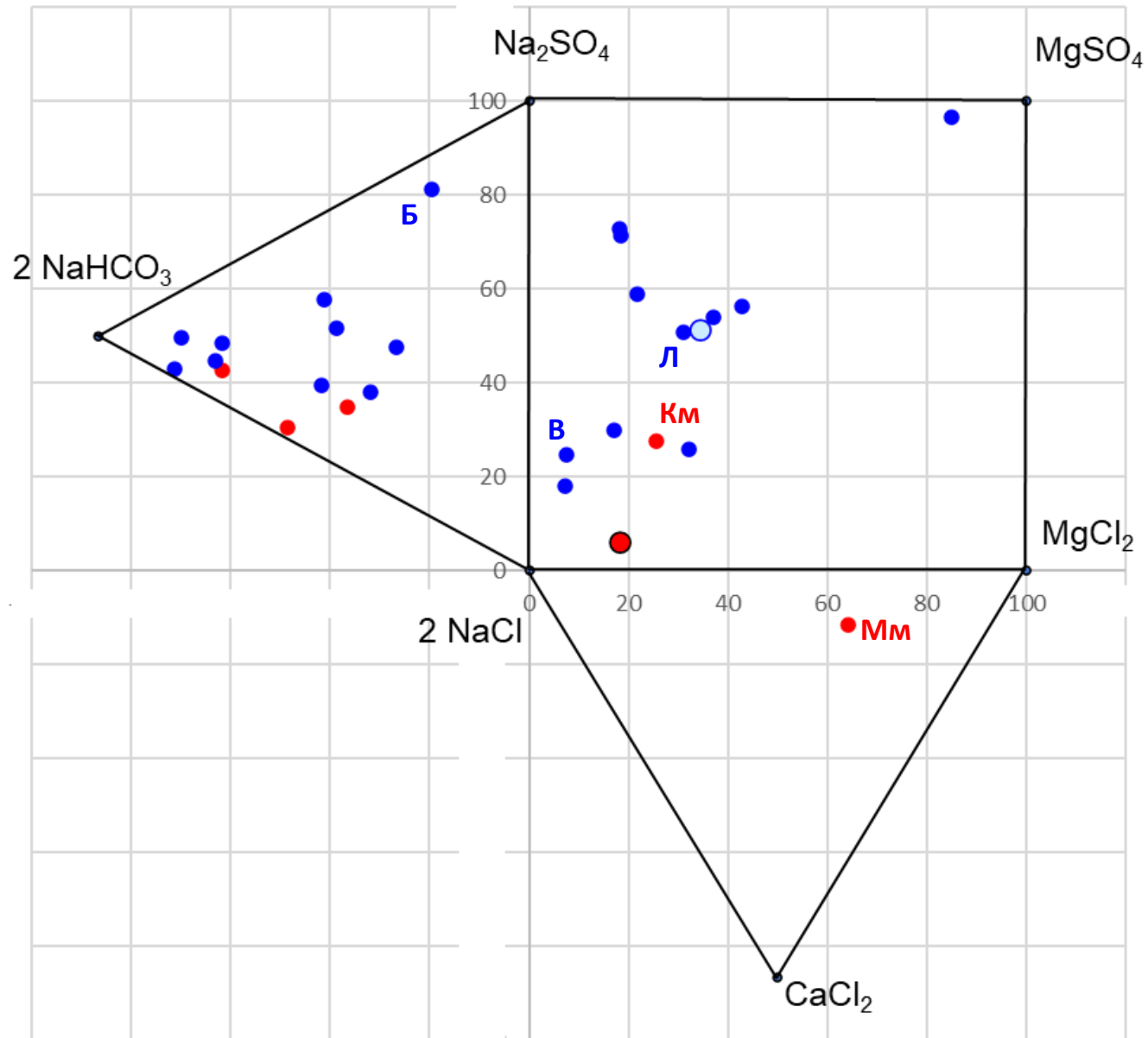


Тема 12. Химический состав озер

Озера



Воды крупнейших озер мира на диаграмме Валяшко

Синие точки – пресные озера

Красные точки – соленые озера

Кружками показаны составы океана (красный) и речных вод (голубой).

Км – Каспийское море; Б – Байкал; В – Верхнее; Л - Ладожское; Мм – Мертвое море

Озера – важная составная часть гидросферы Земли.

Общий объем воды в озерах мира оценивается (по разным подсчетам) как 280 – 410 тыс. км³. Это – небольшая часть от общего объема гидросферы (0,03%), однако в доступных для человека запасах пресной воды вклад озер уже существенно выше.

По запасам пресной воды озера в 50 раз превышают мгновенные запасы речной воды.

Всего в мире насчитывают более 3 млн. озер разного размера, однако основная масса озерной воды сосредоточена в крупных озерах. Самое большое по площади и по объему озеро – Каспийское море, с соленостью воды до 14 г/кг.

Из пресных озер самое большое по запасам воды – озеро Байкал (19% мировых запасов пресных озерных вод).

По режиму водообмена озера подразделяются на:

- проточные,
- бессточные
- временно сточные.

Режим водообмена – климатически обусловлен: для зон избыточного увлажнения свойственны проточные озера, тогда как для засушливого – бессточные и временно сточные.

С этими характеристиками тесно связан солевой режим.

Проточные озера почти во всех случаях – пресные, временно сточные – солоноватые, бессточные – солоноватые и соленые.

Доля пресных озер в общем объеме (с учетом Каспийского моря) составляет около 40%.

Воды проточных пресных озер в целом не отличаются по основному ионному составу от питающих их речных и атмосферных вод, и подчиняются климатической зональности.

Бессточные озера химически очень разнообразны. Их ионный состав сильно связан с геологическим строением водосборного бассейна. Для внутриконтинентальных областей характерно образование соленых озер карбонатного и сульфатного типов. Соленые озера хлоридного типа редки, и, как правило, имеют подземное питание (пример – Мертвое море). (Соленые озера более подробно рассмотрены в теме «Галогенез».)

Из общей массы озер выделяются озера с вулканогенным питанием. Кратерные озера, связанные с активным вулканизмом имеют воды кислого типа и очень специфичный ионный состав (более подробно рассмотрены в теме «Термальные воды», ч.2).

Вертикальная стратификация озер

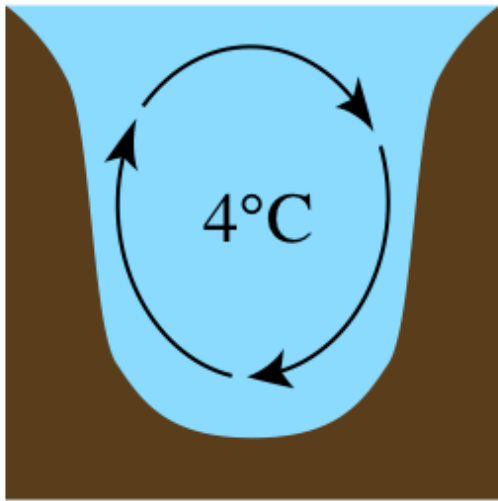
В отличие от речных водотоков, для озер характерно более сложное внутреннее строение, наиболее заметной особенностью которого является вертикальная стратификация.

Вертикальная стратификация озер возникает при разнице плотности воды в верхнем и нижнем слоях водоема, достаточной для предотвращения волнового перемешивания воды. Слой волнового перемешивания обычно имеет толщину 5-7 м (зависит от размеров озера и климата). Поэтому вертикальная стратификация не возникает на озерах мелководных; для этого нужна глубина более 10-15 м.

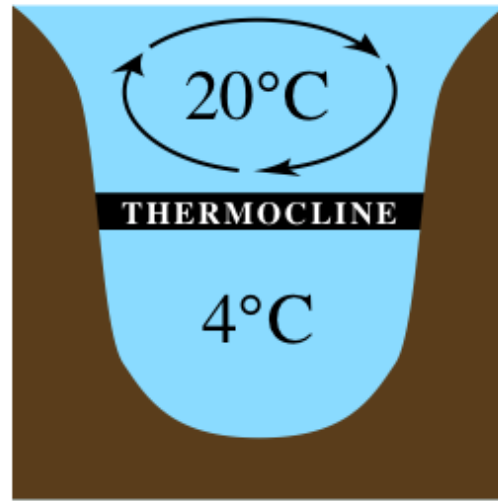
Возникающий плотностной раздел (пикноклин) препятствует конвективному переносу кислорода в нижний слой, где развивается восстановительная обстановка. Природа пикноклина может быть температурная (термоклин), когда внизу вода более холодная и плотная, или химическая (хемоклин), когда вода в нижнем слое более соленая.

Температурная стратификация имеет, как правило, сезонный характер. Химическая стратификация обычно устойчива во времени, и такие озера выделяются в специальную разновидность – меромиктические озера.

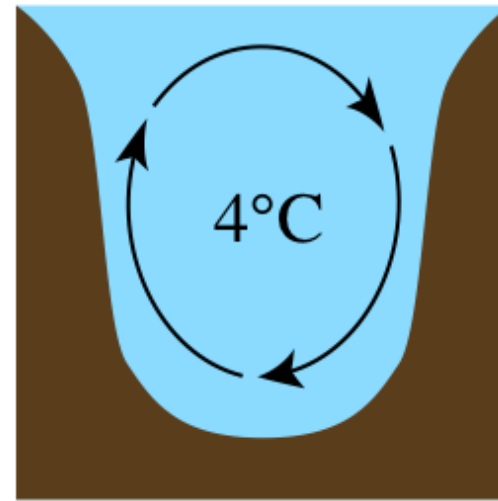
Сезонная динамика температурной стратификации озер



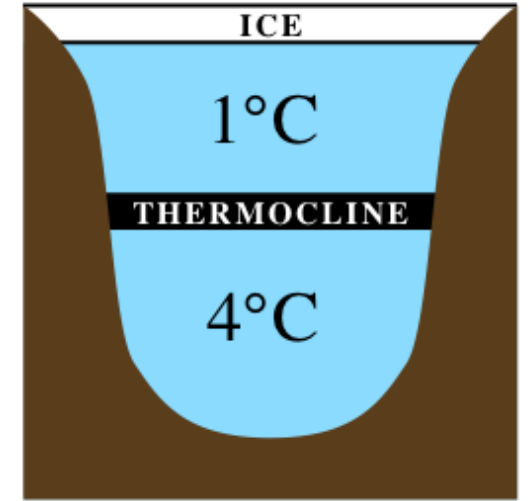
SPRING



SUMMER



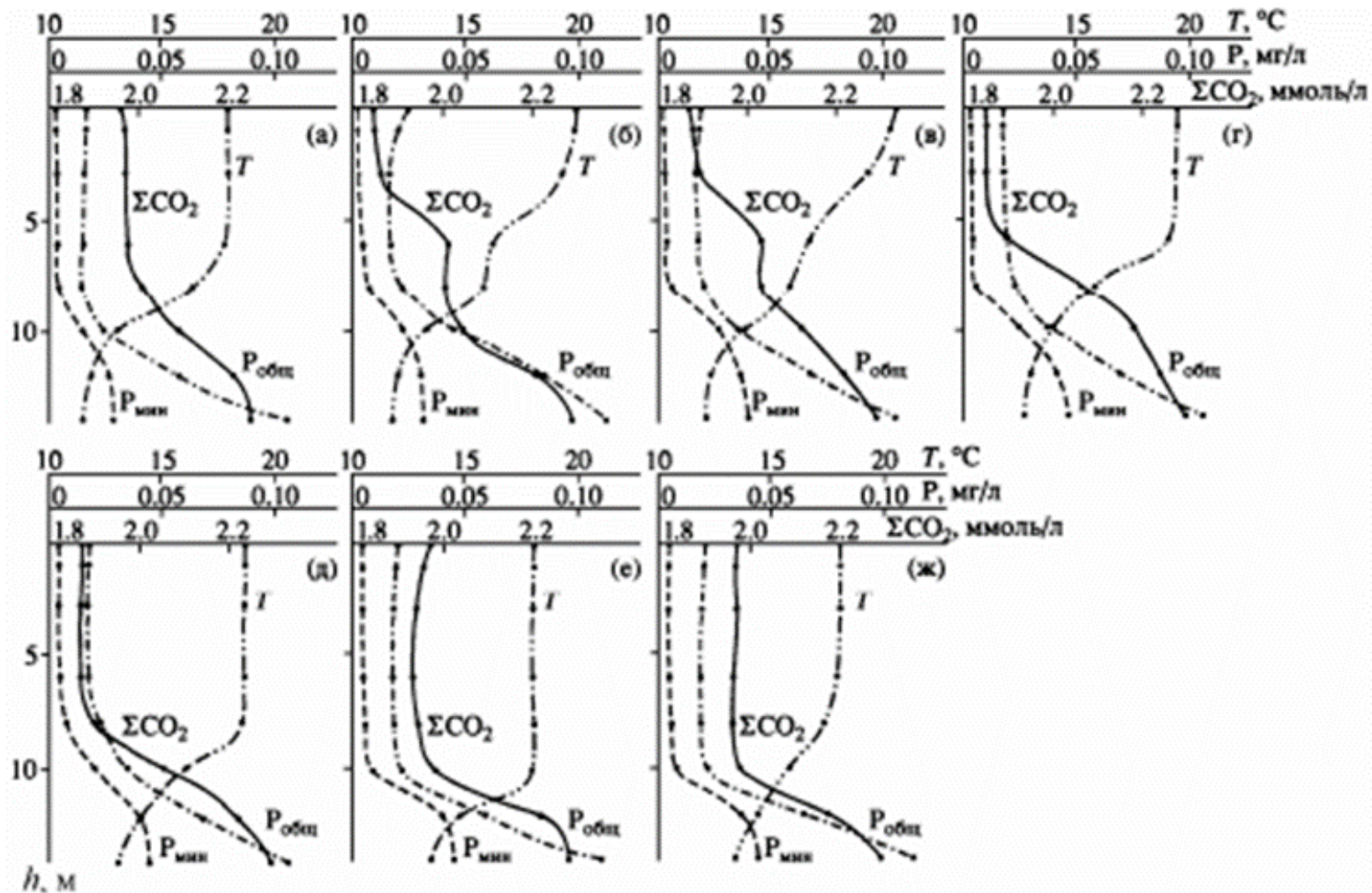
FALL



WINTER

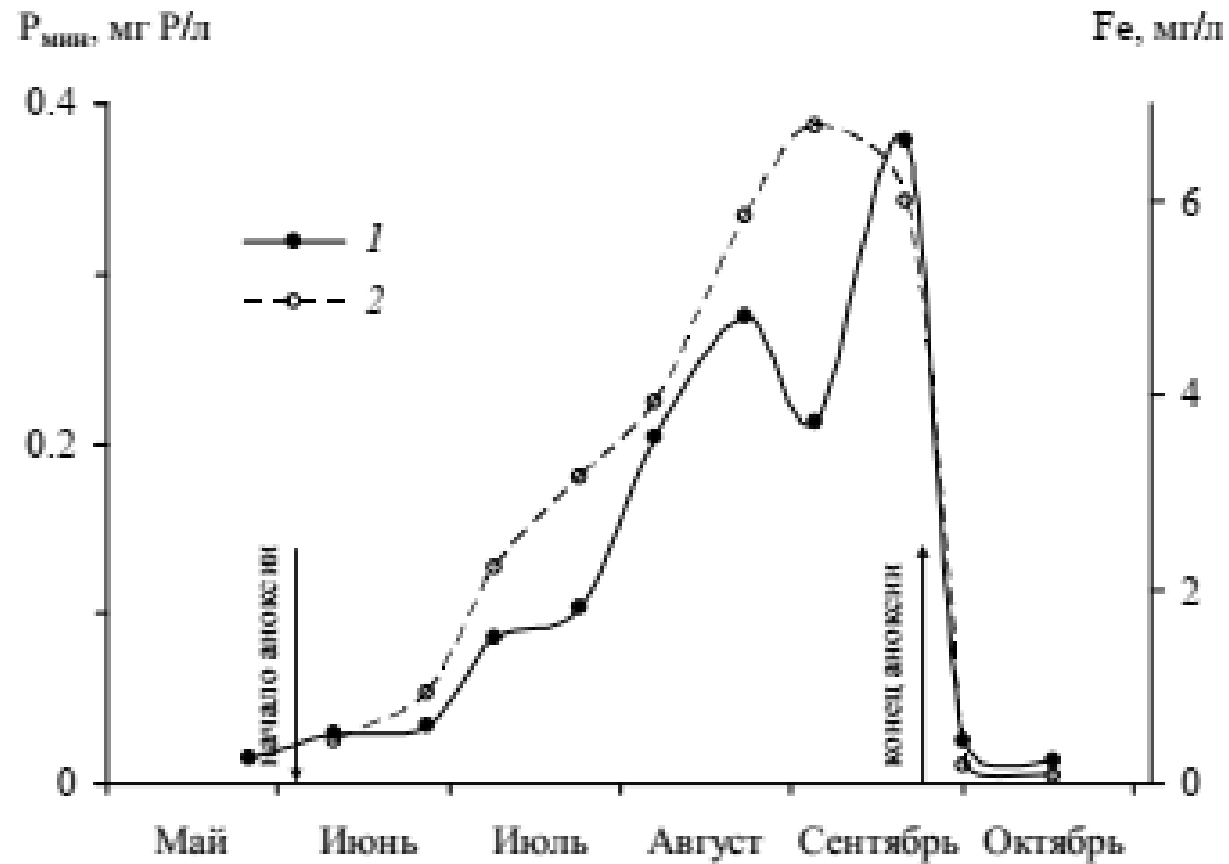


Строение водоема при температурной стратификации.



Распределение форм фосфора и карбонатного углерода в воде Можайского водохранилища в период летней стратификации. По (В.С.Савенко, А.В.Савенко, 2006).

Рис. 3.16. Динамика вертикального распределения температуры воды и концентраций растворенных форм неорганического углерода (ΣCO_2), общего и минерального фосфора на Красновидовской рейдовой вертикали Можайского водохранилища с 8 по 14 июля 1998 г. (а–ж соответственно) [162]



Связь содержаний Fe и P в воде стратифицированного озера при летней аноксии. По (В.С.Савенко, А.В.Савенко, 2006).

Рис. 3.25. Изменение концентраций растворенных форм минерального фосфора (1) и железа (2) в оз. Де-Грей [417]

Классификация озер по интенсивности
биологических процессов.

Эвтрофикация

Деление водоемов по степени накопления биогенных компонентов, как в водной толще, так и в донных отложениях.

1. Олиготрофные водоемы – кислород присутствует во всей толще, донные отложения бедны органическим веществом, недостаток биогенных элементов не допускает сильного развития фитопланктона, но хорошо развивается бентосная растительность, низкая биомасса прибрежно-водных растений (Байкал, Ладожское озеро, многие горные озера).
2. Мезотрофные водоемы – существенное накопление биогенных компонентов в донных отложениях, часто дефицит кислорода в придонных слоях, многочисленная и разнообразная донная растительность (Рыбинское, Иваньковское, Можайское водохранилища).
3. Эвтрофные водоемы – обилие биогенных элементов в воде и донных отложениях, массовое развитие фитопланктона, снижение прозрачности воды, дефицит кислорода в водной толще (зимой и летом возможны заморы), зарастание водоема, при этом обеднение видового разнообразия водных растений (Ильмень, Неро, Цимлянское водохранилище).

В настоящее время разработаны интегральные показатели эвтрофности, включающие многие факторы.

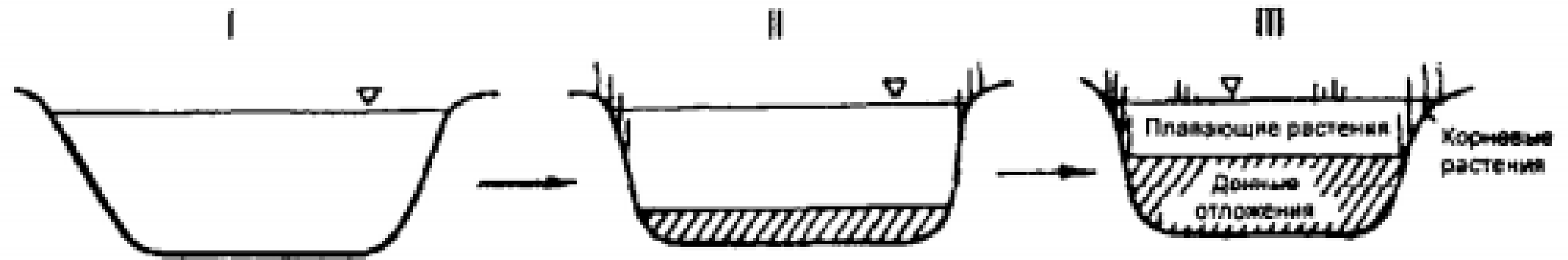


Рис. 1. Процесс эвтрофирования водоёма – естественное развитие от олиготрофного через мезотрофное к эвтрофному состоянию по [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990].

I – олиготрофное озеро с малым количеством биогенных веществ, высокой концентрацией растворённого кислорода; II – мезотрофное озеро (среднее количество биогенных веществ); III – эвтрофное озеро (высокое содержание биогенных веществ, возможна низкая концентрация растворённого кислорода).

Ключевыми параметрами для интенсивного развития биологических процессов в озерах оказался запас в них доступных для водных растений соединений азота и фосфора.

Сочетание температурной стратификации и эвтрофирования водоемов может дать негативные последствия для экологического состояния водоема, вплоть до возникновения анаэробных условий в гипolimнионе.

Наиболее масштабный вид антропогенного воздействия на водоемы – ускорение их эвтрофикации вследствие сброса сточных вод и смыва удобрений с прилегающих территорий.



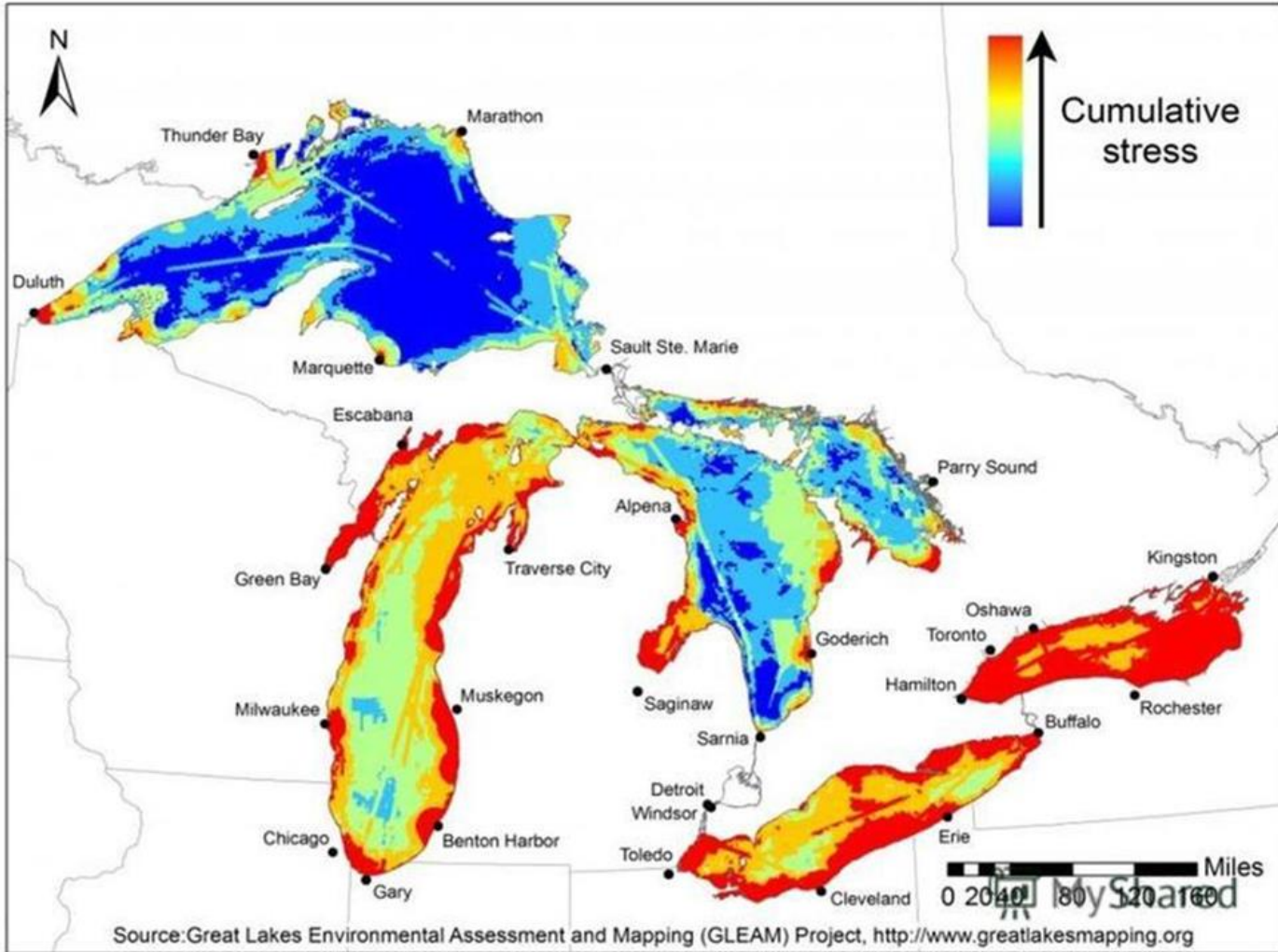
Эвтрофикация Великих озер

Великие Американские озера – каскад пресноводных озер в Северной Америке, на территории США и Канады: Верхнее, Гурон, Мичиган, Эри и Онтарио. Площадь около 245,2 тыс. км², объём воды 22,7 тыс. км³.



К середине XX века качество воды в этих озерах сильно ухудшилось, в наибольшей степени – в конце каскада (Эри, Онтарио). Были последовательно организованы несколько межправительственных программ (США и Канада), направленных на спасение Великих озер.

Цветение планктона на оз. Эри (космический снимок).



Детальное исследование показало, что наиболее масштабное проявление антропогенного воздействия – эвтрофикация озер - вызвана, главным образом, поступлением в них соединений фосфора.

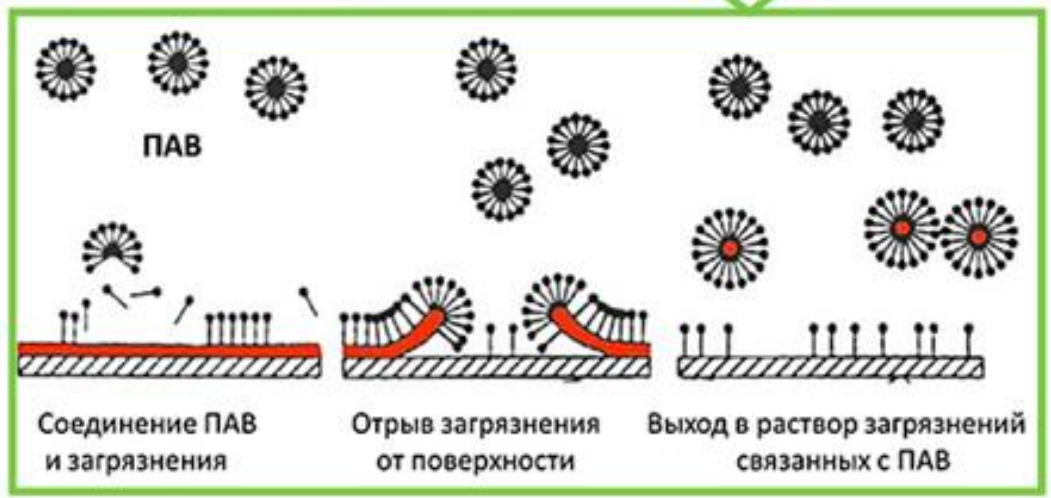
Из всех источников фосфора главным оказались сточные воды городских агломераций, в которых фосфор попадал в составе синтетических моющих средств.



гидрофильная,
«дружественная к воде»
часть молекулы ПАВ.

гидрофобная,
«враждебная к воде»
часть молекулы ПАВ.

В воду ПАВ погружается гидрофильной частью, а гидрофобная выталкивается наружу. Эта особенность обуславливает способность молекул ПАВ в растворе образовывать сферические системы, в которых гидрофобные «хвосты» обращены внутрь шара, а гидрофильные «головки» наружу. Такие системы называются мицеллами. Они как раз и поглощают, затягивают внутрь частички грязи, оторванные от поверхности.



Как работает поверхностно-активное вещество (ПАВ) – действующий агент синтетических моющих средств (рисунок)

В химическом отношении ПАВ – это эфиры минеральной кислоты и низкомолекулярной жирной кислоты.

В промышленных и бытовых ПАВ в качестве органической составляющей используются олеиновая, стеариновая и др. органические кислоты, в качестве минеральной – фосфаты, сульфаты, нитраты, щелочи (для мыла), и др.

Фосфаты более эффективны, потому что фосфорная кислота – трехосновная, способна присоединить в эфире три органических радикала.

Синтетические моющие средства, применявшиеся в середине XX века, содержали в качестве активного агента – поверхностно-активного вещества сложные органические эфиры орто-фосфорной кислоты.

Когда был установлен главный источник фосфора при эвтрофикации Великих озер, были приняты межправительственные соглашения, включавшие комплекс мер.

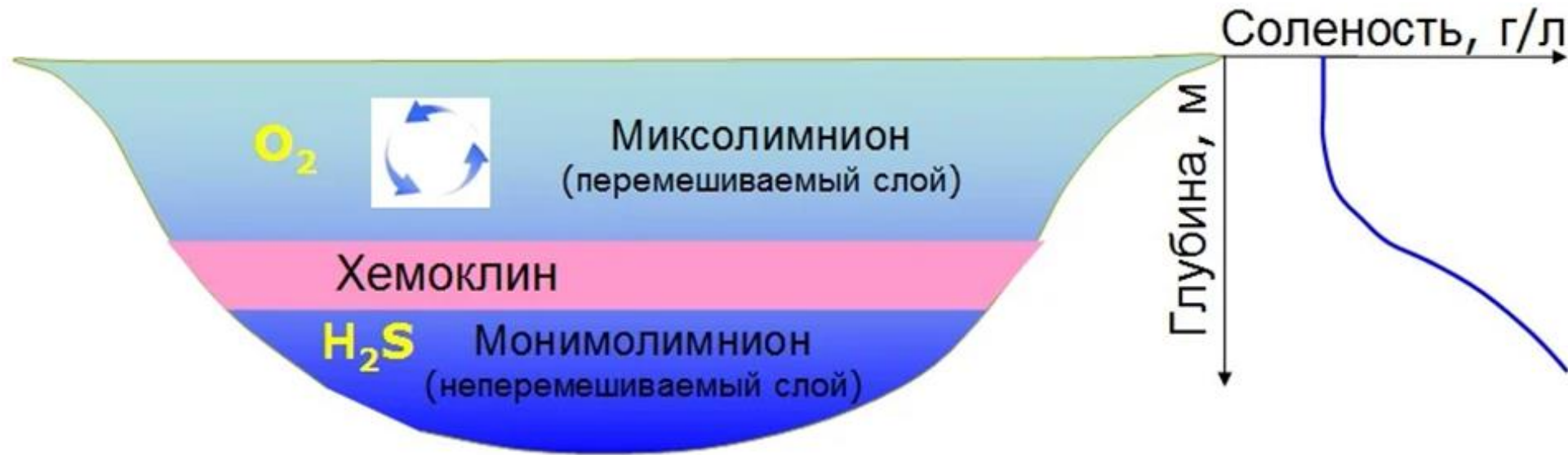
1. Были ужесточены нормативы по содержаниям фосфора при переработке и очистке муниципальных сточных вод.
2. Были установлены предельные содержания фосфатов в производимых синтетических моющих средствах (со временем они понижались).
3. Были установлены налоговые льготы для производителей синтетических моющих средств на основе серной и азотной кислот.

(В настоящее время практически все моющие средства в мире содержат ПАВ на основе сульфатов.)

Разработанный комплекс экономических и административных мер привел к существенному снижению уровня эвтрофикации Великих озер.

Меромиктические озера

Стратификация меромиктического водоема с сероводородным заражением



Меромиктические озера – глубокие химически стратифицированные озера. Разное содержание солей создает постоянную разницу в плотностях поверхностной и придонной вод. Нижний слой (монимолимнион) отличается повышенной минерализацией и не перемешивается с верхним (миксолимнионом). Эти два слоя разделены хемоклином.

Из-за отсутствия притока кислорода и разложения органических остатков на дне в нижнем слое меромиктического водоема развивается анаэробная среда, и накапливаются восстановленные газы – H_2S , CH_4 , H_2 , а также – CO_2 .

Условия для возникновения меромиктических водоемов специфичны, поэтому они в природе немногочисленны (примерно 1 : 1000 обычных озер). Однако они могут быть и огромными по размерам (пример – Черное море).

Современная классификация меромиктических озер предложена Дж.Хатчинсоном (1969), она основана на периодичности возникновения расслоения водной толщи и природе хемоклина.

В упрощенном виде причинами образования хемоклина могут быть:

1. Растворение пород – гипсовый и соляной карст и приток соленых подземных вод (Южный Урал, Пермский край, Башкирия и др.).
2. Проникновение морской воды в литоральные озера и фиорды (фильтрация, приливное, сезонное, вековое) (озера на берегах Баренцева и Белого морей, фиорды Норвегии и Дании, Черное море).
3. Реликтовые воды соленой стадии изменения бессточного озера (оз.Шира и другие в Хакасии)
4. Концентрирование солей при вымораживании (оз.Ванда в Антарктиде)
5. Поступление вод и газов из вулканогенных подводных источников (оз.Ниос).
6. Техногенные воздействия (сброс сточных вод в водоемы, аварии)

Соляной и гипсовый карст.

Озеро Развал (Соль-Илецк, Оренбургская обл.)



Озеро техногенного происхождения – бывший карьер по добыче каменной соли, затопленный весной 1906 г. Площадь зеркала озера ныне около 7 га (300×250 м), наибольшая глубина 17,5 м. Соленость воды озера – до 316 г/л. Летом верхний слой рапы прогревается до 24-28°C на глубину 1,5-2 м. Зимой переохлажденная рапа в озере опускается на дно, где вследствие постоянных отрицательных температур происходит садка гидрогалита $\text{NaCl} \times 2\text{H}_2\text{O}$. Вода ниже 5 м в озере всегда имеет отрицательную температуру, в наиболее глубокой части - до -12°C .

На озере организован бальнеологический курорт.

Озеро Роголёк (Пермский край)

Озеро Роголёк – самое глубокое карстовое озеро Урала. При ширине около 100 м глубина составляет 61 м. Над глубокой частью озера всю зиму остаётся полынья. Причина заключается в обильных придонных родниках жестких подземных вод, имеющих постоянно низкую температуру 4 – 4,5°C.



Озера с питанием морской водой. Озеро Могильное на о.Кильдин (Баренцево море)

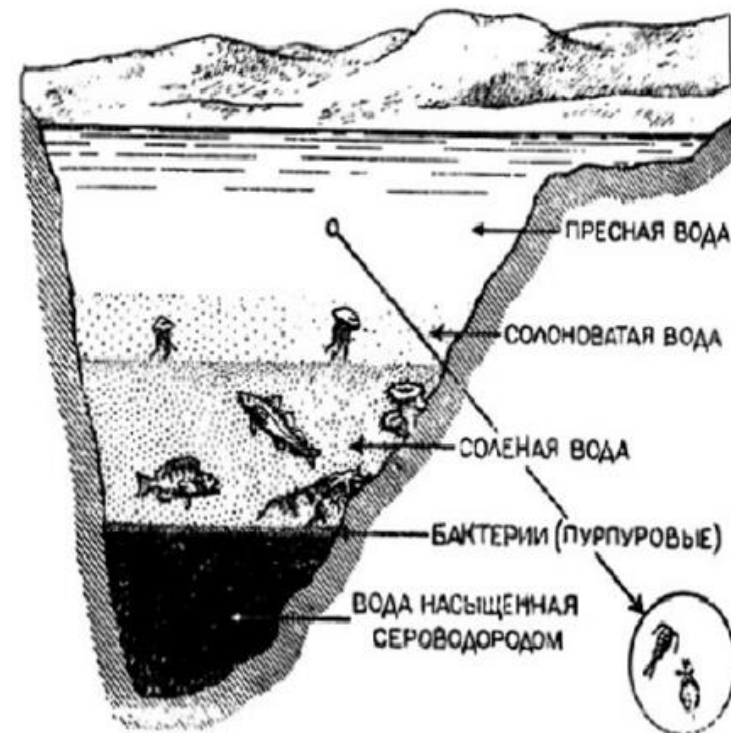


Озеро Могильное имеет размеры 0,56×0,28 км и наибольшую глубину 17 м.

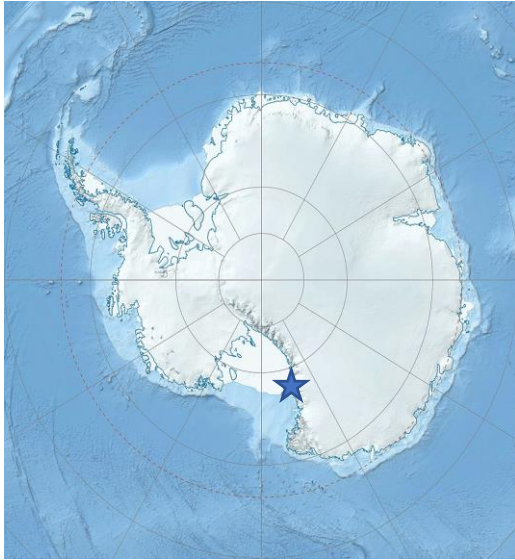
В толще озера выделяют 4 (по другим источникам – 5) слоев с разными температурами и минерализациями: от 3 до более 30‰. Причина расслоения – просачивание морской воды через перемычку (береговой вал).

Нижний слой озера имеет соленость до 33‰. Он анаэробный, с сероводородным заражением, полностью лишенный фауны. Верхний слой – пресный, населен пресноводными организмами. Промежуточные – солоноватые, в них обитают морские виды животных, часть из которых – эндемичные (в т.ч. - подвид кильдинская треска *Gadus morhua kildinensis*).

Длительность существования такого режима озера оценивается в более 1 тыс. лет.



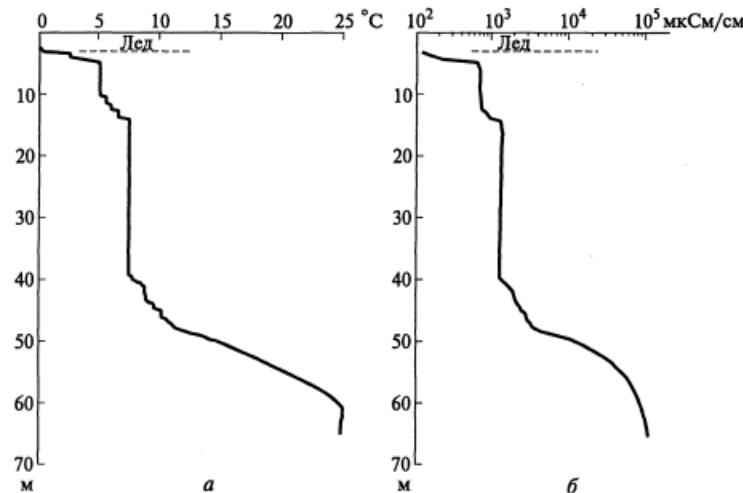
Озеро Ванда (Антарктида)



Озеро Ванда имеет длину 5 км и максимальную глубину 69 м. Поверхность озера постоянно покрыта льдом, свободным от снега. Толща воды озера состоит из нескольких слоев с разной температурой и минерализацией.

Непосредственно под льдом вода имеет температуру 0-5°C и очень низкую минерализацию - менее 0,25‰. На интервалах 5-10 м и 15-40 м температура увеличивается до 5°C и 8°C, соответственно, а минерализация – до 1‰. В этих слоях в течение антарктического лета вода пересыщена кислородом вследствие фотосинтеза водорослями.

В придонной части – на хемоклине - температура увеличивается до 25°C, а минерализация – до 115‰. Вода имеет Cl-Ca-Mg состав, имеет коричневый цвет и лишена кислорода.



Стратификация водной массы оз. Ванда. По (Эдельштейн, 2011).
а) температура;
б) удельная электропроводность.

Повышенную температуру нижнего слоя большинство исследователей связывают с вековым накоплением тепла солнечного света, проходящего через очень прозрачные лед и верхние слои воды («гелиотермический режим»).

Рассолы нижнего слоя, вероятно, являются реликтом криогенного соленого озера, высокая минерализация которого определялась сезонным вымораживанием. Подобный маленький водоем (Don Juan Pond) с минерализацией 380‰ и Cl-Ca составом, но без признаков расслоения водной толщи найден в 10 км от оз. Ванда.

Катастрофические проявления на меромектических озерах – озеро Ниос



21 августа 1986 г. на озере произошел мощный выброс углекислого газа. Облако газа накрыло 4 близлежащих поселения, и от удушья погибло более 1700 человек.

Природа катастрофы была установлена через довольно длительное время, после проведения большого круга исследований (первоначально гибель людей отнесли на неизвестное инфекционное заболевание).

Озеро Ниос – меромиктическое озеро в кратере потухшего вулкана в Восточном Камеруне. Размеры озера $1,9 \times 1,2$ км, максимальная глубина 210 м.

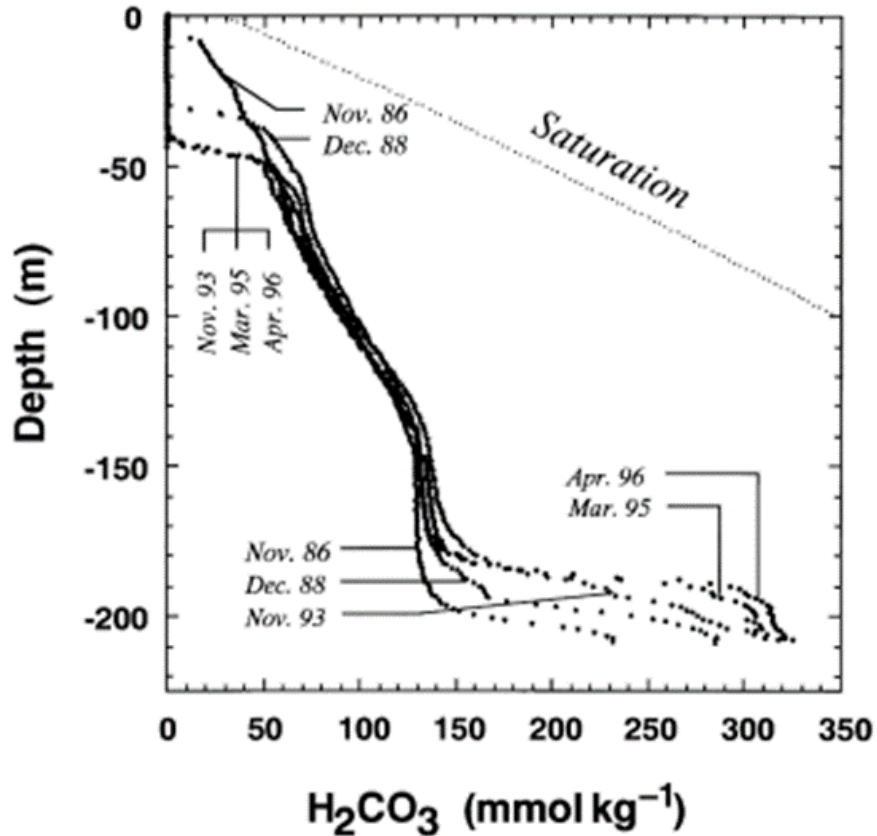
Верхний слой воды – пресный (<100 мг/кг) – озеро проточное.

Нижний слой (глубже 50 м) солоноватый (у дна до $1,6$ г/кг), восстановительный, содержит много растворенного CO_2 вулканического происхождения.



Вероятный механизм катастрофы

Нижний слой в озере (монимолимнион) содержит много растворенной углекислоты, которая, однако не выделяется в газовую фазу из-за гидростатического давления вышележащей воды



Триггером катастрофы, вероятно, послужил большой оползень берега кратерного озера, всколыхнувший нижний слой. Вода с растворенной углекислотой выплеснулась выше уровня насыщения, началось бурное выделение растворенного газа. Вспенивание воды резко снизило гидростатическое давление, что далее спровоцировало извержение по типу гейзера.

Распределение растворенной углекислоты по глубине в воде оз. Ниос. Данные разных лет (ноябрь 1986 – апрель 1995 г.). Пунктиром показано расчетное давление насыщения для заданной глубины. По Kusakabe et al., 2000.



Вид озера после катастрофы. Бурый цвет воды создается гидроксидами железа, образовавшимися после перемешивания воды мониомлиминна, богатой Fe^{2+} , с водой миксолиминна и кислородом воздуха.

Для предотвращения подобной катастрофы на озере проводились работы по принудительной дегазации нижнего слоя воды.



Работа установки по дегазации воды. Оз. Ниос, 2006 г.

Установка работает на принципе «эрлифта» - водно-газовая смесь за счет малой объемной плотности самоизливом фонтанирует из нижнего газо-насыщенного слоя.

