

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАМОРОВ В ШЕЛЬФОВЫХ ВОДАХ

Вопрос об образовании заморов в придонных водах рассмотрен с позиций физических условий проникновения кислорода. Показано, что поток кислорода ко дну лимитируется не только условиями турбулентного обмена в столбе воды, но и предельным потоком кислорода через поверхность воды. Определено критическое значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии ниже перемешанного слоя, при котором турбулентный обмен в столбе воды начинает лимитировать поступление кислорода из атмосферы. Это значение пропорционально скорости газообмена и глубине. Для условий северо-западной части Черного моря оно равно $0,1-1 \text{ см}^2/\text{с}$. Сделан вывод, что в прибрежных водах поток кислорода ко дну нередко лимитируется условиями газообмена через поверхность.

Начиная с 70-х годов заморы регулярно наблюдаются в мелководной северо-западной части Черного моря, причем они охватывают все большие площади [5]. Заморы происходят обычно в августе и характеризуются резким снижением концентрации растворенного в воде кислорода, что приводит к массовой гибели рыб и нередко сопровождается появлением очагов сероводородного заражения. Ответ на вопрос о причинах образования заморов на первый взгляд очевиден — это биологическое потребление кислорода (БПК). Модели экосистемы шельфа хорошо воспроизводят момент наступления замора как время максимального БПК в системе [1], обусловленное сезонным ходом процесса фотосинтеза и отмирания органики. Гораздо меньше ясности в проблеме прогнозирования масштабов областей, охваченных замором, и, самое главное, в вопросе о мерах, позволяющих избежать появления заморов. Ниже мы остановимся на этих задачах с позиций анализа условий поступления кислорода.

В пренебрежении боковым обменом будем считать, что кислород поступает в воду из атмосферы и проникает в растворенном виде до дна за счет турбулентной диффузии. Поступление кислорода из атмосферы не может быть сколь угодно большим — поток кислорода через поверхность определяется скоростью газообмена V_L и отклонением концентрации растворенного кислорода от равновесной с атмосферой $C_{\text{равн}}$

$$q = V_L (C_{\text{равн}} - C). \quad (1)$$

Скорость газообмена меняется на порядок в зависимости от скорости ветра и ветрового волнения. В штилевых условиях, характерных для времени наступления заморов, эта величина составляет 10^{-3} см/с [4]. Поскольку для поверхностных вод Черного моря в августе характерно, что $C_{\text{равн}} = 0,24 \text{ ммоль/л}$, то отсюда следует, что максимально возможный поток кислорода через поверхность (при концентрации растворенного кислорода $C=0$) в штилевых условиях составляет $0,2 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \times \text{сут}^{-1}$.

На мелководье значительная часть отмершего органического вещества не успевает окислиться и поступает во взвешенном виде на дно. В условиях эвтрофикации вод это приводит к значительному потреблению кислорода вблизи дна. Поступление сюда кислорода помимо геохимического барьера на границе вода — воздух регулируется условиями турбулентного обмена в водной толще. В простейшем случае, когда верхний квазиоднородный слой (ВКС) достигает дна, турбулентный обмен эффективно переносит ко дну поступающий через поверхность кислород и не накладывает дополнительных ограничений на критический уровень БПК. Можно констатировать, что замор наступает, если интегральное БПК в столбе воды достигает $0,2 \text{ ммоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. Этот па-

параметр легко поддается измерению. В частности, если БПК в прибрежных водах определяется сбросом неокисленных хозяйственно-бытовых отходов, отсюда прямо следует условие на степень разбавления этих стоков.

В общем случае слабый турбулентный обмен ниже ВКС может «запирать» кислород в верхнем слое, способствуя развитию замора [3]. При этом ужесточаются требования к уровню БПК ниже ВКС. Запирание происходит тогда, когда турбулентный поток кислорода ниже ВКС оказывается меньше максимально возможного потока кислорода через поверхность. Критическое значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии A_z можно найти, приняв

$$-A_z \frac{dC}{dz} = V_L C_{\text{равн}}. \quad (2)$$

Считая, что основное потребление кислорода происходит на дне (глубина H) нетрудно выразить dC/dz в левой части через максимально возможный перепад концентрации растворенного кислорода

$$A_z C_{\text{равн}} / (H - H_{\text{вкс}}) = V_L C_{\text{равн}}. \quad (3)$$

Отсюда критическое значение A_z равно

$$A_z = V_L (H - H_{\text{вкс}}). \quad (4)$$

Таким образом, условия запирания различны на разных глубинах. При $H - H_{\text{вкс}} = 10$ м запирание происходит при $A_z < 1$ см²/с. На мелководье критическое значение A_z еще меньше (до 0,1 см²/с). В Черном море типичные значения A_z ниже ВКС составляют 0,2—1 см²/с [2], поэтому при сильной стратификации поток кислорода ко дну в несколько раз меньше полученного нами значения. Соответственно критическим становится БПК на уровне 0,01 моль·м⁻²·сут⁻¹. Заметим, что под A_z мы здесь понимаем некоторое среднее значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в слое $H_{\text{вкс}} - H$, а не значение в слое скачка плотности. Если эта величина меньше критического значения, определяемого выражением (4), замор наступает при БПК на уровне

$$q = A_z C_{\text{равн}} / (H - H_{\text{вкс}}). \quad (5)$$

Таким образом, для прогнозирования заморов необходимо следить как за интегральным БПК в расчете на единицу поверхности акватории, так и за условиями турбулентного обмена и газообмена через поверхность. Если БПК достигает уровня 0,01—0,1 моль·м⁻²·сут⁻¹, то место образования замора на достаточно больших глубинах определяется параметрами турбулентности ниже ВКС, например числом Ричардсона [3]. Однако на глубинах до 10—15 м, где ВКС обычно достигает дна или величина $H - H_{\text{вкс}}$ порядка 1 м, турбулентный обмен не ограничивает поступление кислорода ко дну. Здесь замор наступает при более высоких значениях БПК и определяется условиями газообмена через поверхность воды, например, присутствием нефтяной пленки.

Область замора ограничена зоной эффективного потребления растворенного кислорода, в связи с чем она занимает обычно небольшой придонный слой. Ситуация принципиально меняется, если на месте замора развивается очаг сероводородного заражения. В этом случае вертикальный размер анаэробной зоны может быть гораздо больше за счет эффекта дальнего действия: вырабатываемый бактериями сероводород переносится вверх той же турбулентной диффузией. Теперь граница анаэробной зоны определяется балансом между турбулентными потоками кислорода и сероводорода. Интересно, что неокисленное органическое вещество в придонном слое при этом изолируется от кисло-

рода и лишь частично используется для сульфатредукции. В этом смысле сероводородное заражение является защитной реакцией моря, позволяющей избежать распространения замора на всю водную толщу.

1. Беляев В. И. Моделирование морских систем. — Киев: Наук. думка, 1987. — 203 с.
2. Богуславский С. Г., Жоров В. А., Пороцкая Е. М. Вертикальное перемешивание в Черном море // Комплексные океанографические исследования Черного моря. — Севастополь: МГИ АН УССР, 1983. — С. 17—25.
3. Брянец В. А. Физические предпосылки рыбопромысловой продуктивности морских экосистем: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — Л.: ЛГМИ, 1990. — 29 с.
4. Бютнер Э. К. Планетарный газообмен. — Л.: Гидрометеониздат, 1986. — 240 с.
5. Зайцев Ю. П. Состояние и тенденции развития экосистемы Черного моря // Южные моря СССР: географические проблемы исследования и освоения. — Л.: Геогр. о-во СССР, 1989. — С. 59—71.

Мор. гидрофиз. ин-т АН Украины,
Севастополь

Получено
30.04.91

L. V. EREMEEVA, A. Kh. DEGTEREV

A MECHANISM OF THE SUFFOCATION FORMATION IN THE SHELF WATERS

Summary

An analysis of the mechanism of oxygen inflow to the bottom underlies obtaining of estimates for maximum permissible oxygen demand in a water column. It is shown that at the depth of 40 m suffocation is caused by insufficient oxygen inflow from the atmosphere rather than by oxygen blocking in the upper mixed layer. Maximum oxygen demand is determined here by gas exchange rate and is $0.2 \text{ mol/m}^2/\text{day}$ in summer. Oxygen is blocked if the depth exceeds the thickness of the upper mixed layer. Critical oxygen demand at the bottom falls to $0.01 \text{ mol/m}^2/\text{day}$.