

Сравнительная характеристика вкладов физической и биохимической составляющих отрицательного бюджета растворённого кислорода в водных массах тропических и арктических широт океана

Н.М. Адров

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН;

Биологический факультет МГТУ, кафедра биологии

Аннотация. В работе обсуждается механизм формирования дефицита растворённого кислорода, наблюдаемого в глубинах океана в условиях адвективно-конвективных перемещений частиц водных масс высоких и низких широт. На основании экспедиционных данных и модели термокислородной трансформации предложен метод косвенной оценки физической (сорбция-десорбция) и биохимической (фотосинтез-БПК) составляющих отрицательного бюджета кислорода.

Abstract. The mechanism of formation of the dissolved oxygen shortage has been discussed in the paper. The shortage is observed at ocean depths in the conditions of advective and convective transference of the water mass particles at high and low latitudes. Basing on the expedition data and the thermoxygenic transformation model the method of indirect assessment of physical and biochemical constituents of the oxygen negative budget has been proposed.

1. Введение

Воды с минимальными концентрациями растворённого кислорода – наиболее яркий показатель оксигенной структуры водной толщи. Вертикальное изменение содержания кислорода может происходить плавно, как это наблюдается в умеренных и полярных широтах открытого океана, и резко, как в низких широтах Тихого и Индийского океанов и морских водах при ограниченной адвекции, например, в Чёрном море или фьордах Норвегии. Дефицит кислорода отмечается в районах стока крупных рек, он усиливается летней стратификацией при аномально тёплых погодных условиях. Особенно резкий переход от насыщенного кислородом верхнего слоя к абсолютному минимуму кислорода в нижнем слое, состоящем из баренцевоморских вод, наблюдается в реликтовом озере Могильном на о. Кильдин, которое могло бы служить моделью не только превосходящего его размером моря, но и всего Мирового океана, если предположить, что район Могильного не подвержен внешнему влиянию ветров и вся испаряемая через поверхность озера влага пошла на формирование системы циркуляции воздушных масс над озером.

Проблема оценки физической и биологической составляющих дефицита кислорода ставится в связи с изучением круговорота этого элемента в системе океан-биосфера-атмосфера. Главными факторами уменьшения концентрации растворённого кислорода считается биохимическое его потребление (БПК) и пониженная аэрация глубин вследствие слабых нисходящих движений вод.

Существуют различные мнения относительно преобладающего значения физических и биологических факторов, регулирующих количество кислорода в воде и воздухе. Проблемы источников и "стоков" кислорода во всех средах географической оболочки также решаются по-разному. В последние десятилетия, в связи с катастрофической антропогенной нагрузкой на геосферу, исследование баланса кислорода особенно актуально.

В соответствии с представлениями термогалинной трансформации (Адров, 1993), которые позволили определить роль адвективной и конвективной составляющих бюджета кислорода водных масс различного генезиса, поставлена задача косвенной оценки вкладов всех трёх факторов: 1) БПК, 2) горизонтального и 3) вертикального переносов вод.

2. Материал и методы

В качестве статистической информации использовались данные по температуре и концентрации растворённого кислорода, полученные экспедиционными судами, работавшими в районах Гольфстрима, Северо-Атлантического хребта и моря Ирмингера, Норвежско-Гренландского бассейна, Баренцева и Карского морей. По данным диаграмм рассеяния термокислородных индексов, построенных для выделенных в соответствии с термогалинной структурой слоёв водной толщи, рассчитаны уравнения регрессии, которые позволили построить единую схему зависимости бюджета кислорода от трёх вышеназванных факторов по отдельности.

3. Динамика растворённого кислорода как индикатора физических и биологических процессов

Если бы живые организмы не принимали участия в обмене океана и атмосферы кислородом, то содержание кислорода в океане и атмосфере зависело бы только от физических условий газообмена. В системах циркуляции открытого океана эти физические условия определяются адвективным и конвективным переносами частиц воды. Адвективный перенос сопровождается контактом, а конвективный перенос – изоляцией частиц воды и воздуха. Это значит, что охлаждающиеся воды при адвективном движении будут обмениваться кислородом с атмосферой, а при конвективном погружении такого обмена происходить не будет.

Те физические и биологические условия, благодаря которым существует кислородная машина океан-атмосфера-биосфера, мы априори называем нормальными, потому что при отклонении от них включаются синергетические механизмы, возвращающие систему кислородообмена геосфер в исходное положение. Основным регулятором является обмен между жидкостью и газом через поверхность их раздела, когда насыщенная менее предела жидкость поглощает газ, а перенасыщенная – отдает его излишек.

При исследовании газообмена между океаном и атмосферой в нижних её слоях давление воздуха можно принять величиной постоянной, близкой 1000 мб. Сорбция и десорбция кислорода зависит от ряда факторов, главные из которых – температура и солёность – определяют плотность вод и величины поглощения или выделения газов. Количественные оценки растворённого кислорода выражаются в ‰ по объёму растворённого газа в 1 л воды и в % наблюдаемого содержания кислорода от нормы – 100 % насыщенности (Алёкин, Ляхин, 1984). В первом случае оно называется концентрацией растворённого кислорода и обозначается O_2 , а во втором случае – степенью насыщения (насыщенностью) и обозначается ζ . Разность между наблюдаемым и рассчитанным нормальным содержанием кислорода называется дефицитом кислорода ΔO_2 или $\Delta \zeta$.

В экспериментальных условиях и с помощью метеоинформации об условиях обмена кислородом между океаном и атмосферой в центральной части северо-тропической Атлантики установлено, что из океана в атмосферу переходит 346 мг/м^2 в сутки O_2 , что составляет 10 % от общей продукции его при фотосинтезе (Ляхин, 1978). Сложный характер взаимодействия водных масс даёт чередование слоёв воды толщиной до 10 метров, содержание кислорода в которых колеблется в пределах 1.5 мл/л (Стунжас и др., 1980). Тем не менее, на основе статистической обработки данных зондовых измерений океанологических характеристик, отражающих биологический и физический вклады в суточную динамику кислорода, по содержанию последнего возможна оценка чистой первичной продукции в мезотрофных районах (Стунжас, 1988).

Для изучения процентного насыщения кислородом частиц воды в таких крупных подразделениях, как водные массы, можно пренебречь не только колебаниями атмосферного давления, но и изменениями солёности, которые в открытом океане очень незначительны для каких-либо существенных изменений физических условий насыщения и не могут служить ограничениями развития бактериопланктона – главного потребителя кислорода ниже фотического слоя.

Насыщенность вод кислородом при условии незначительного изменения солёности, определяется концентрацией растворённого кислорода и температурой воды. Аналогично термогалинной (T, S -), термокислородная трансформация зависит от времени взаимодействия вод с атмосферой. Явление гистерезиса насыщения, подобно конвекции при охлаждении поверхности океана, наблюдается в осенне-зимний период годового цикла, когда охлаждаемые воды не успевают абсорбировать кислород воздуха и в случае конвективного погружения создают на глубине дефицит растворённого кислорода, который имеет, таким образом, физическую природу (Адров, 1959). Согласно экспериментальным исследованиям, "процесс растворения и поглощения газов в воде происходит медленно, и для того, чтобы содержание растворённого газа в воде пришло в равновесие с его парциальным давлением в атмосфере, требуется определенный, иной раз значительный промежуток времени" (Алёкин, 1952). Особенно это характерно для полярных районов океана, где "недонасыщенность поверхностных вод O_2 в зимний период объясняется малой скоростью газообмена между атмосферой и океаном по сравнению со скоростью охлаждения вод" (Chen, 1987).

Нормальное насыщение кислородом оценивается величиной $\zeta = 100 \%$ не только потому, что это предел насыщения вод в данных физических условиях, но и потому, что эта величина характеризует среднее термокислородное состояние вод поверхностного слоя. Последнее обстоятельство занимает не менее важное место в изучении кислородной структуры океана, чем существование кислородного минимума. На сезонную изменчивость кислорода в верхнем стометровом слое значительное влияние оказывает внутригодовой ход БПК, которое глубже слоя фотосинтеза практически не меняется (Рачков, 1979). В самом слое фотосинтеза синтез кислорода растениями максимален в начале весны (вспышка "цветения" фитопланктона в марте) и заканчивается в начале зимы после осеннего баланса, наблюдаемого в ноябре (Волостных и др., 1981).

Для описания физических и биологических процессов, определяющих изменение содержания кислорода, выбрано пространство T, O_2 , в котором исследуются зависимости между концентрацией растворенного кислорода и температурой при условии $P_{\text{атм}} = \text{const}$ и $S = \text{const}$. В работах (Адров, 1985; 1986; 1989; 1990; 1992; 1993) рассмотрены варианты изменения термокислородных свойств частицы воды, участвующей в обмене кислородом с атмосферой (нормаль насыщения), биосферой (изотерма), одновременно с атмосферой и биосферой (аномаль насыщения), и не участвующей в обмене кислородом ни с атмосферой, ни с биосферой (изоксигена).

Если частица M (рис. 1) изменяет свойства по линии нормального насыщения KMD , значит она насыщается кислородом при охлаждении (MD) и отдаёт кислород при нагреве (MK). Следовательно, она находится в контакте с атмосферой, откуда берёт недостающий кислород или отдаёт его излишек.

Если температура частицы не изменяется, а концентрация кислорода увеличивается (изотерма JMC), то это может быть следствием фотосинтетической деятельности морских растений (MC), а уменьшение кислорода связано с потреблением его на процессы бактериального окисления и дыхания гидробионтов (MJ). Во время этих процессов, уменьшающих или увеличивающих содержание кислорода, контакт частицы определяется исключительно живыми организмами биосферы, самой обширной частью которой является Мировой океан.

Особый интерес представляет выбор пути частицы по изоксигене (AME), так как в этом случае расстояние, пройденное частицей вверх (MA) или вниз (ME) по линии $O_2 = \text{const}$, будет пропорционально повышению или понижению температуры поверхностных вод.

Толщина поверхностного слоя, по данным исследований стратификации растворённого кислорода в океане, определяется глубиной "компенсационного" горизонта (где положительный и отрицательный бюджеты кислорода уравниваются друг друга), имеющего, по Д. Харвею, максимальную глубину залегания 100 м (Harvey, 1963). Толщина поверхностного слоя вод также не превышает 100-метровой глубины и, в среднем, соответствует слою 0-75 м. Глубже поверхностного слоя насыщение вод кислородом всегда меньше нормального. Минимальное насыщение наблюдается в промежуточных водных массах, характеризующихся максимумами АТФ и фосфатов (Karl et al., 1976), на границе между ними и центральными водами (Маньковская, 1984), где плотность составляет приблизительно 27.2 у.е. Эта величина была использована ещё Г.Р. Сейвеллом (Seiwell, 1937) для маркировки изопикнической поверхности, вдоль которой должны распространяться воды с дефицитом растворённого кислорода, однако уже тогда стало ясно, что отрицательные аномалии кислорода наблюдаются преимущественно в слое 100-600 м (Richards, Redfield, 1955).

В полярных водах, принадлежащих системам циркуляции открытого океана, насыщение кислородом никогда не опускается ниже 80 %, то есть дефицит кислорода $\Delta\zeta$ не превышает 20 %.

Адвективные и конвективные составляющие трансформации вод определяют физические условия обмена океана и атмосферы кислородом. Адвективный перенос, как уже говорилось, сопровождается контактом, а конвективный – изоляцией частиц воды и воздуха. Для описания физических и биологических процессов, влияющих на изменение кислорода, выбрано пространство T, O_2 , в котором исследуются зависимости между кислородом и температурой при условии постоянства атмосферного давления и солёности.

Введём понятие бюджетов кислорода $\delta O_2 = O_2^m - O_2^1$ и температуры $\delta T = T_m - T_1$, где O_2^1 и T_1 – значения концентрации растворённого кислорода и температуры на начальном, а O_2^m и T_m – на конечном этапе трансформации водной массы (рис. 2).

Условия адвекции для открытого океана записываются следующим образом: $\delta T < 0$; $\delta O_2 > 0$; $\delta\zeta = \text{const}$, где ζ – относительное содержание кислорода. Условия конвекции: $\delta T < 0$; $\delta O_2 = 0$; $\delta\zeta < 0$. Отрицательный бюджет кислорода, характеризующий биологические процессы в водных массах океана, не лимитируется изменениями температуры в силу незначительных её изменений, поэтому в качестве условия биохимического потребления кислорода принимается $\delta T = 0$; $\delta O_2 < 0$; $\delta\zeta < 0$.

На рис. 2 показаны векторы конвективной и адвективной составляющих термокислородной трансформации вод и биохимического потребления кислорода с момента времени t_1 до момента времени t_m , а на рис. 3 – блок-диаграмма трансформации вод термокислорода. Главный вектор AK представляет собой сумму физической (AE) и биологической (EK) составляющих трансформации. Вектор AE раскладывается на составляющие отрицательного бюджета температуры AB и гистерезиса насыщения в

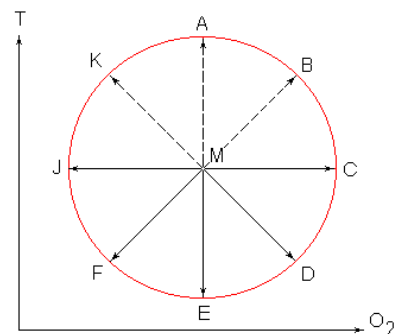


Рис. 1. Главные линии термокислородной трансформации водных масс (обозначения в тексте)

абсолютном (AD) и относительном (AC) выражениях. Вектор EK раскладывается на составляющие отрицательного бюджета кислорода в абсолютных единицах (EF) и процентах насыщения (EG).

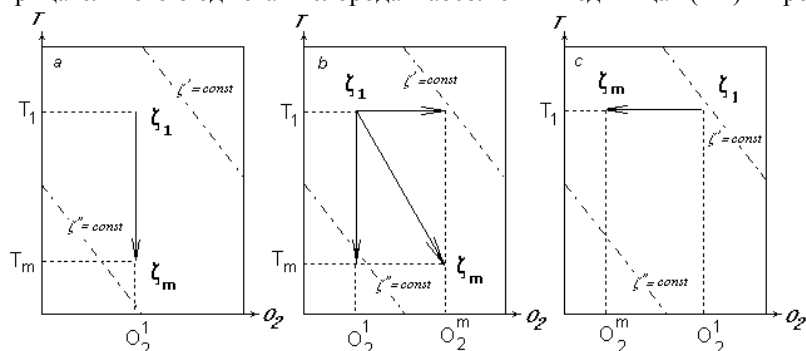


Рис. 2. Изменение температуры T , концентрации растворённого кислорода O_2 и степени насыщения кислородом ζ в условиях: а) конвекции, б) адвекции и в) биохимического потребления растворённого кислорода

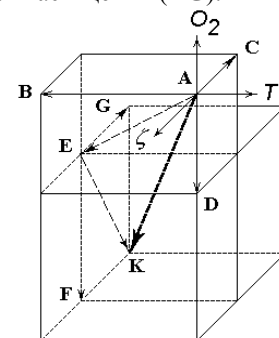


Рис. 3. Блок-диаграмма формирования вод главного термоциклона

4. Оценка физической и биологической составляющих дефицита растворённого кислорода

На основании всех данных экспедиций, в которых производились определения концентрации растворённого кислорода, построены векторные диаграммы составляющих дефицита кислорода, из которых приводятся две наиболее показательные (рис. 4 и 5). Из сравнения величин разности концентрации растворённого кислорода между исходными (A_n) и конечными (B_n) термокислородными индексами следует, что наибольшая величина отрицательного бюджета кислорода свойственна тропическим водам – это связано с максимальным отрицательным бюджетом температуры ($A_n C_n$). При перемещении вод по протяженности системы циркуляции открытого океана величина отрицательного бюджета кислорода уменьшается и становится минимальной в полярных водах. Это уменьшение связано с возрастанием роли нисходящих движений вод.

Таким образом, соотношения физических и биологических составляющих бюджета кислорода водных масс зависят от их климатической характеристики. В полярных районах основную часть кислородного минимума составляет отрицательный бюджет кислорода, образовавшийся вследствие гистерезиса насыщения кислородом в процессе конвекции, а в тропических водах основное потребление кислорода идет на бактериальное окисление органических веществ и дыхание гидробионтов.

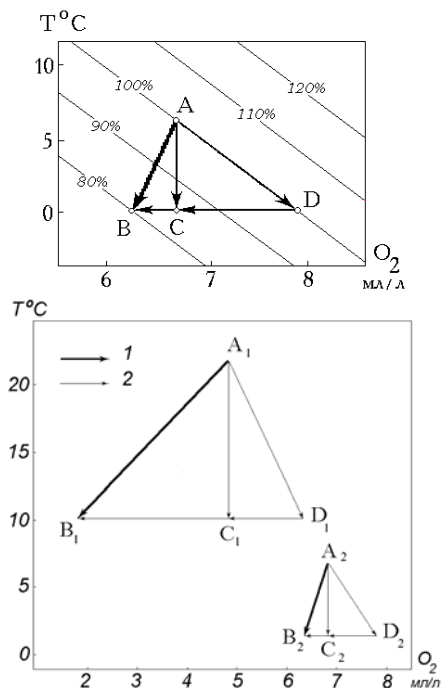


Рис. 4. Термокислородный треугольник для расчёта физической и биохимической составляющих отрицательного бюджета концентрации растворённого кислорода на примере Баренцева моря

Рис. 5. Формирование вод с дефицитом растворённого кислорода в тропических ($A_1 B_1$ – Саргассово море) и полярных ($A_2 B_2$ – Северный Ледовитый океан) районах. 1 – главные векторы трансформации центральных водных масс; 2 – слагаемые векторы: $C_n B_n$ – биологического потребления кислорода, $D_n C_n$ – гистерезиса насыщения кислородом, $A_n C_n$ – отрицательного бюджета температуры, $A_n D_n$ – нормального насыщения

5. Выводы

1) В целом для океана минимальные концентрации кислорода находятся в нижней части центрального слоя на его границе с промежуточными водами тропической и умеренной климатических зон. В полярных широтах подобного явно выраженного недостатка кислорода не наблюдается во всей водной толще от поверхности до дна, но составляющие отрицательного бюджета кислорода имеют ту же природу и разделяются на адвективные, конвективные и БПК.

2) Водные массы являются потребителями кислорода в системе океан-атмосфера-биосфера; прямо пропорциональная зависимость содержания кислорода от температуры описывает главную закономерность термокислородной трансформации.

3) Соотношения физических и биологических составляющих бюджета кислорода водных масс зависят от их климатической характеристики: в полярных районах основную часть дефицита представляет отрицательная составляющая его бюджета вследствие гистерезиса насыщения, а в тропических водах основное потребление кислорода идет на бактериальное окисление органических веществ и дыхание гидробионтов, в сумме составляющих БПК.

Литература

- Chen Chen-Tung A.** Summer-winter comparisons of oxygen content in the polar sea. *Antarct. J.U.S.*, v.22, N 5, p.115-117, 1987.
- Harvey H.W.** Chemistry and fertility of sea waters. *Cambridge Univ. Press.*, 43 p., 1963.
- Karl David M., LaRock Paul A., Morse John W., Sturges Wilton.** Adenosine triphosphate in the North Atlantic Ocean and its relationship to the oxygen minimum. *Deep-Sea Res.*, v.23, N 1, p.81-88, 1976.
- Richard F.A., Redfield A.C.** Oxygen-density relationships in the western North Atlantic. *Deep-Sea Res.*, v.2, N 3, p.182-199, 1955.
- Seivell H.R.** Relationship of minimum oxygen concentration to density of the water column in the Western North Atlantic. *Gerl. Beitr. Geophys.*, v.50, N 2/4, p.302-306, 1937.
- Адров М.М.** Новые данные по гидрологии северо-западной части Баренцева моря. *Мурманск, Тр. Полярн. НИИ мор. рыб. х-ва и океаногр.*, № 11, с.5-25, 1959.
- Адров Н.М.** Два аспекта формирования благоприятных для первичного продуцирования условий в водных массах полярных районов океана. Теоретические подходы к изучению экосистем морей Арктики и Субарктики. *Апатиты, КНЦ РАН*, с. 9-18, 1992.
- Адров Н.М.** Метод расчета физической и биологической составляющих дефицита растворенного кислорода в Баренцевом море. Экология и биологическая продуктивность Баренцева моря. *М., Наука*, с.93-96, 1990.
- Адров Н.М.** Обмен кислородом через фронтальные разделы океан-атмосфера и океан-биосфера. Океанологические фронты сев. морей: характеристики, методы исслед., модели. *Москва*, с.93, 1989.
- Адров Н.М.** Связь между термогалинной структурой вод и стратификацией растворенного кислорода в Северной Атлантике. *Тр. ВНИИГМИ-МЦД*, № 124, с.51-56, 1985.
- Адров Н.М.** Термокислородная структура вод океана. Экология и биол. продуктивность Баренцева моря. *Мурманск*, с.27-29, 1986.
- Адров Н.М.** Трансформация водных масс системы Гольфстрима. *Апатиты, КНЦ РАН*, 171 с., 1993.
- Алёкин О.А.** Гидрохимия. *Л., Гидрометеиздат*, 214 с., 1952.
- Алёкин О.А., Ляхин Ю.И.** Химия океана. *Л., Гидрометеиздат*, 341 с., 1984.
- Волостных Б.В., Ляхин Ю.А., Нестерова М.Н., Новиков П.Д., Сванидзе А.Г.** Кислородный обмен между океаном и атмосферой в районе полигона ПОЛИМОДЕ. *Океанология*, т.21, № 2, с.266-272, 1981.
- Ляхин Ю.И.** О скорости обмена кислородом между океаном и атмосферой. *Океанология*, т.18, № 6, с.1014-1021, 1978.
- Маньковская Л.И.** Слой минимума кислорода в Карибском море. Океаногр. исслед. в центр. амер. морях. *Севастополь, изд. МГИ*, с.94-105, 1984.
- Рачков В.И.** Изменчивость биохимического потребления кислорода в районе субарктического фронта. *Исслед. по биол. рыб и промысл. океаногр.*, № 10, с.8-13, 1979.
- Стунжас П.А.** Оценка первичной продукции путем статистического разделения биологического и физического вкладов в суточную изменчивость кислорода. *Океанология*, т.28, № 4, с.674-676, 1988.
- Стунжас П.А., Бордовский О.К., Гусев Ю.М., Шехватов Б.В.** Тонкая структура распределения кислорода в прибрежных водах Перу. *Океанология*, т.20, № 1, с.57-63, 1980.