

УДК 556.555.43

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ВОДОЕМОВ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ АНОКСИИ В ГИПОЛИМНИОНЕ

Ю. С. Даценко

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Основанный на балансовом подходе расчет минимальной концентрации кислорода в гипolimнионе озер применен для оценки уровня продукционных процессов, соответствующего появлению аноксии в гипolimнионе озер. По данным регулярных наблюдений за режимом растворенного кислорода в 16 водоемах мира получены линейные регрессионные зависимости величины годовой первичной продукции, при которой может наблюдаться аноксия в гипolimнионе водоема. Установлена обратная линейная зависимость критической первичной продукции с коэффициентом формы озер, проверенная на независимом материале наблюдений за кислородным режимом озер.

Ключевые слова: скорость потребления кислорода; гипolimнион; аноксия; первичная продукция; коэффициент формы озера.

Yu. S. Datsenko. ESTIMATION OF THE CRITICAL VALUE OF A WATER BODY'S PRIMARY PRODUCTION FOR ANOXIC ZONE EMERGENCE

Calculation of the minimum oxygen concentration in the hypolimnion of lakes based on the balance approach was used to estimate the level of production processes corresponding to the emergence of anoxia in the hypolimnion. Data from regular monitoring of the dissolved oxygen regime in 16 lakes and reservoirs of the world were processed to obtain the linear regression relationships of annual primary production values at which anoxia may appear in the hypolimnion of a lake. An inverse linear dependence of the critical primary production on the lake's shape factor was established and tested using data from independent observations of the oxygen regime in lakes.

Keywords: oxygen consumption rate; hypolimnion; anoxia; primary production; the shape factor of a lake.

Содержание и распределение в воде водоема растворенного кислорода в каждый отдельный момент времени интегрально отражает особенности тесно взаимосвязанных гидродинамических и биохимических процессов. Поэтому относительно легко измеряемое содержание растворенного кислорода в воде служит важной информацией при оценке состояния экосистемы и процессов эвтрофирования водоема.

Изменчивость содержания кислорода по вертикали резко усиливается в стратифицированных водоемах, когда в результате вертикального плотностного расслоения ограничивается процесс массообмена между слоями. Возникающая вертикальная стратификация концентрации кислорода может служить эффективным индикатором продуктивности, а следовательно, трофического состояния

экосистемы. Эта особенность режима кислорода в водоемах обусловила давний и глубокий интерес лимнологов к характеристикам его вертикального распределения.

В глубинных слоях содержание кислорода с течением времени постоянно уменьшается в результате его расходования на окисление поступающего сюда в процессе седиментации органического вещества. Поскольку скорость потребления кислорода в гипolimнионе (ПКГ) зависит от количества поступающего в этот слой органического вещества, следовательно, от интенсивности продукционных процессов в водоеме, то она может служить индикатором трофического состояния водоема. Информативность такого показателя зависит от степени стратифицированности водоема, которая представляется функцией главным образом динамических и морфометрических характеристик водоема. Впервые критерии оценки трофического состояния водоемов по скорости ПКГ были предложены Д. Э. Хатчинсоном [Hutchinson, 1938].

Определение величины ПКГ в водоемах, основанное на измерении концентрации кислорода в гипolimнионе через определенные промежутки времени, включает несколько предположений: 1) потребление кислорода в гипolimнионе происходит линейно, т. е. не зависит от концентрации самого кислорода, 2) толщина гипolimниона остается постоянной в течение периода измерений, 3) обмен кислородом с эпилимнионом, а также горизонтальная адвекция кислорода отсутствуют. Обоснованность первого предположения была подтверждена Р. Корнетом и Ф. Риглером путем специальных исследований в озерах [Cornett, Rigler, 1979]. Изменение концентрации кислорода в гипolimнионе уменьшалось линейно, при этом величина потребления кислорода в водной толще не обнаружила связи с величиной концентрации кислорода во всем диапазоне наблюдаемых концентраций вплоть до концентрации 0,3 мг/л. При меньших концентрациях процессы становятся анаэробными и линейность нарушается. В реальности толщина гипolimниона, особенно в относительно неглубоких водоемах, может варьировать в течение вегетационного периода значительно, так же как и подпитка кислородом из вышележащих слоев в результате эрозии термоклина, однако считается, что вклад этих факторов в общий процесс ПКГ невелик, и они не учитываются. Предположение о линейности процессов ПКГ позволило С. Чапра и Р. Канале предложить простую модель для его расчета в озе-

рах с учетом обмена кислородом между слоями [Chapra, Canale, 1991].

Изменение запаса растворенного кислорода в гипolimнионе может быть выражено так:

$$V_h \frac{dC_h}{dt} = E''(C_e - C_h) - V_h D_v, \quad (1)$$

где V_h , C_h и C_e – объем гипolimниона и концентрация кислорода в гипolimнионе и эпилимнионе соответственно, D_v – объемная скорость потребления кислорода (только под влиянием окисления), E'' – коэффициент объемной вертикальной диффузии, который может быть рассчитан из уравнения теплового баланса водоема в предположении о постоянстве температуры эпилимниона в период стратификации

$$E'' = \frac{V_h \ln \frac{T_{h,o} - \bar{T}_e}{T_{h,t} - \bar{T}_e}}{t_s}, \quad (2)$$

где $T_{h,o}$, $T_{h,t}$ – начальная и конечная за период стратификации (t_s) температура воды в гипolimнионе, \bar{T}_e – средняя за период стратификации температура воды в эпилимнионе.

Если концентрацию кислорода в эпилимнионе принять постоянной для расчетного периода \bar{C}_e , решение уравнения (1) может быть записано следующим образом:

$$C_{h,t} = C_{h,0} \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right) + \left(\bar{C}_e - \frac{V_h D_v}{E''}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right)\right]. \quad (3)$$

Это уравнение можно переписать для расчета скорости объемного потребления растворенного O_2 :

$$D_v = -\frac{E''}{V_h} \cdot \frac{C_{h,t} - C_{h,0} \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right) - \bar{C}_e \left(1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right)\right)}{1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right)}. \quad (4)$$

Зависимость дефицита O_2 от продуктивности водоемов исследовалась многими лимнологами, но хотя механизм возникновения дефицита хорошо изучен, при расчетах практически всегда приходится делать следующее допущение. Предполагается, что скорость развития дефицита O_2 в эвтрофном озере определяется в основном величиной его продуктивности и зависит от толщины гипolimниона, т. к. дефицит кислорода есть результат гетеротрофной ассимиляции органического вещества, которое оседает из трофогенной зоны эпилимниона.

Таблица 1. Результаты расчетов критических величин первичной продукции (ПП), соответствующей анаэробным условиям в гипolimнионе озер

Название водоема	Средняя глубина, м	Коэффициент формы	Зависимость для C_{min}	ПП, гС/ (м ² год) при $C_{min} = 0$
оз. Бива (Япония)	41,0	0,39	-0,065ПП + 10,31	158,6
оз. Окутаме (Япония)	44,4	0,31	-0,007ПП + 6,44	920,0
оз. Сува (Япония)	4,7	0,65	-0,013ПП + 11,01	846,9
оз. Кизаки (Япония)	17,9	0,61	-0,079ПП + 8,55	108,2
оз. Огавара (Япония)	11,2	0,45	-0,012ПП + 8,58	715,0
оз. Цюрихское (Швейцария)	51,0	0,38	-0,014ПП + 8,30	592,9
оз. Лунзер (Австрия)	20,0	0,59	-0,066ПП + 11,92	180,6
оз. Маларен (Швеция)	11,9	0,20	-0,018ПП + 10,32	611,0
оз. Венерн (Швеция)	27,0	0,25	-0,12ПП + 10,80	900,0
оз. Аммер (Германия)	38,1	0,46	-0,015ПП + 11,24	749,3
оз. Штернбергер (Германия)	53,2	0,42	-0,062ПП + 11,70	188,7
оз. Боденское (Швейцария)	90,0	0,36	-0,034ПП + 11,0	304,0
вдхр. Можайское (Россия)	7,6	0,39	-0,020ПП + 9,47	473,5
оз. Аннески (Франция)	41,5	0,64	-0,042ПП + 9,98	237,6
оз. Вашингтон (США)	32,9	0,50	-0,021ПП + 11,33	539,5
вдхр. Диллон (США)	24,1	0,34	-0,010ПП + 7,42	742,0

В первом приближении эта зависимость линейна и может быть представлена следующим образом:

$$D_a = \theta \cdot \alpha \cdot ПП, \quad (5)$$

где D_a – средняя скорость потребления O_2 в столбе под 1 м²; θ – коэффициент, характеризующий долю ОВ, которая окисляется в трофогенном слое, $\alpha = 0,029$ – коэффициент, характеризующий затраты на окисление единицы массы органических соединений, $ПП$ – величина годовой первичной продукции водоема. Таким образом, в этой модели пренебрегается притоком аллохтонного органического вещества.

Средняя скорость потребления O_2 в столбе под 1 м² связана с объемной скоростью потребления следующим образом:

$$D_a = z_h D_v \beta, \quad (6)$$

где z_h – средняя толщина гипolimниона и $\beta = 0,1$ – эмпирический коэффициент.

Тогда уравнения (3) и (5) могут быть объединены в одно для определения минимальной концентрации O_2 в гипolimнионе за период летней стратификации:

$$C_{min} = C_{h,0} \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t_s\right) + \left(\bar{C}_e - \frac{V \theta \alpha ПП}{E'' z_h \beta}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t_s\right)\right). \quad (7)$$

Эта модель позволяет получить зависимость величины минимальной концентрации

кислорода за период стратификации от средней за этот период величины первичной продукции. Приравнивая левую часть уравнения (7) к нулю, можно оценить уровень первичной продукции озера, при котором в гипolimнионе возникнут анаэробные условия. Данные мониторинга термического и кислородного режима водоемов мира позволяют рассчитать условия появления зон аноксии в гипolimнионе.

Для расчета использовались данные наблюдений в 16 водоемах мира, выбранных по опубликованной информации об озерах в справочном издании Международного комитета по охране озер [ILEC..., 1987]. 13 из этих водоемов представляют собой типичные озера умеренного климатического пояса, 3 – водохранилища. В водоемах путем анализа опубликованных графиков и таблиц, характеризующих вертикальное распределение температуры и содержания растворенного кислорода в течение вегетационного периода, были выделены зоны эпи- и гипolimниона. Затем концентрации кислорода внутри этих слоев осреднялись, а для эпимлиниона проводилось осреднение также и по времени (за вегетационный период). По полученным зависимостям минимальных значений концентрации кислорода в гипolimнионе от величины первичной продукции (ПП) озер установлены критические значения ПП, при которых в гипolimнионе возникает аноксия. Результаты проведенных расчетов и соответствующие линейные зависимости концентраций кислорода в гипolimнионе от величины ПП показаны в таблице 1.

Таблица 2. Оценка аноксии в озерах

Водоем	ПП фактическая, гС/ (м ² год)	ПП расчетная, гС/ (м ² год)	Наличие аноксии	Коэффициент формы	H _{ср} , м
оз. Глубокое (Россия)	882	888	Есть	0,29	9,3
оз. Плещеево (Россия)	615	541	Есть	0,46	11,2
оз. Виллстон (США)	70	950	Нет	0,26	43,3
вдхр. Ла Гранд (Канада)	600	1150	Нет	0,16	21,8

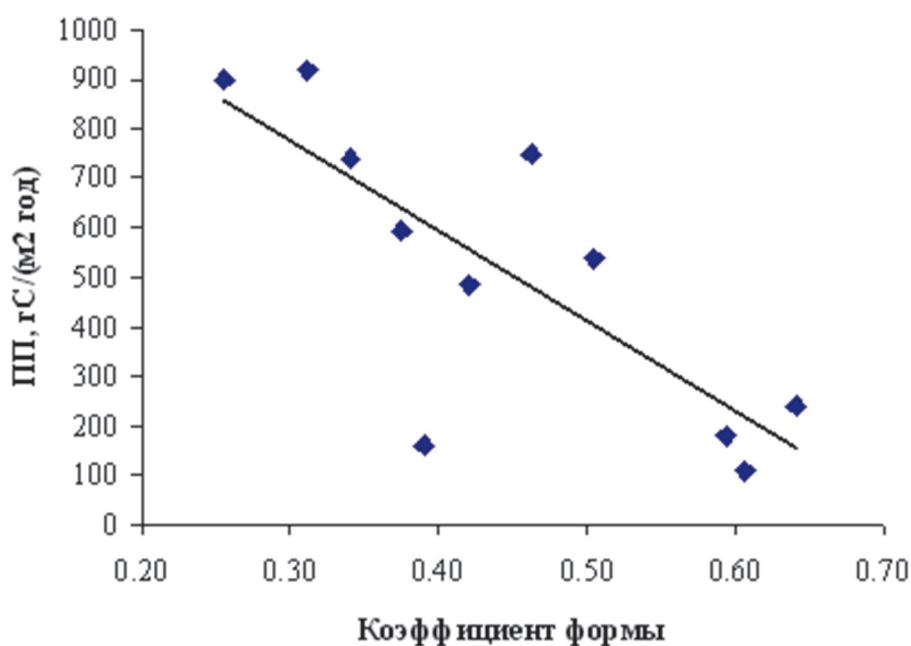
Однако изменение концентрации кислорода в гипolimнионе зависит также от условий вертикального обмена в озере, в результате которого воды гипolimниона подпитываются богатыми кислородом водами эпилимниона. Интенсивность этого обмена определяется условиями вертикальной плотностной стратификации, которая в свою очередь тесно связана с морфометрическими характеристиками озера – средней и максимальной глубиной. Таким образом, анаэробные условия в гипolimнионе являются функцией первичной продукции и формы чаши водоема.

Используя полученные нами критические значения величины ПП, можно эмпирически оценить влияние морфометрических характеристик на возникновение анаэробных зон в гипolimнионе. Форма чаши и глубина озера определяют интенсивность вертикального перемешивания водной массы озера, которая оценивается в расчетной формуле коэффициентом диффузии кислорода из эпилимниона в гипolimнион. В качестве показателя, характеризующего морфометрические характеристики озер, нами использовался коэффициент

формы, равный отношению средней глубины озера к максимальной. Однако в глубоких озерах большой объем гипolimниона способствует снижению роли окисления органического вещества, поступающего из трофогенного эпилимниона, в потреблении кислорода, что и приводит к завышению критической величины ПП по использованной для ее расчетов модели. Напротив, расчетные значения ПП в мелководных водоемах, где влияние вертикального перемешивания на подпитку гипolimниона кислородом становится доминирующим, занижаются. Учитывая эти особенности, из расчетов были исключены одно глубокое озеро – Боденское – и два относительно мелководных озера – Маларен (Швеция) и Огавара (Япония). Кроме того, исключены были водохранилища, для которых расчет коэффициента формы по соотношению глубин не имеет смысла.

Сопоставление значений коэффициента формы с оцененными по модели величинами критической продукции позволило получить линейную зависимость (рис.).

Эта связь показывает, что чем ниже значение коэффициента формы озера, т. е. чем



Зависимость критической величины первичной продукции от коэффициента формы озера

ближе форма озера к конусу, тем меньше работы ветра нужно затратить для его перемешивания и тем больше должна быть ПП озера, чтобы в гипolimнионе возникли анаэробные условия. Для диапазона средних глубин озер от 15 до 60 м зависимость характеризуется высоким достоверным коэффициентом корреляции (0,78).

Для верификации полученной зависимости применены данные о распределении кислорода и появлении зон аноксии в некоторых озерах, которые не использовались при получении вышеприведенной зависимости. Результаты этой проверки представлены в таблице 2.

Представленные в таблице оценки показывают, что при значениях ПП, близких или превышающих расчетные (оз. Плещеево), в водоеме наблюдается устойчивая аноксия. При фактической продуктивности водоема, далекой от расчетной, аноксия отсутствует. Например, в оз. Виллистон следует ожидать, что вероятность возникновения аноксии крайне мала, т. к. фактическая ПП более чем на порядок ниже расчетной.

Таким образом, эту простую линейную зависимость можно использовать для ориентировочной оценки уровня продуктивности водоема, при котором весьма вероятно возникновение анаэробных условий в гипolimнионе. Можно предположить, что проведенный анализ влияния морфометрических характеристик и продукционных процессов водоема на

появление анаэробных зон в водоеме справедливо также и для водохранилищ. Однако, учитывая значительную специфику динамического режима водохранилищ по сравнению с озерами, а также резко отличающиеся от озерных формы котловин водохранилищ, для подтверждения подобного предположения необходимы специальные исследования с использованием данных о гидротермическом и кислородном режиме водохранилищ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-05-06108).

Литература

Chapra S. C., Canale R. P. Long-term phenomenological model of phosphorus and oxygen in stratified lakes // *Water Research*. 1991. Vol. 25 (6). P. 707–715.

Cornett R. J., Rigler F. H. Hypolimnetic oxygen deficits: their prediction and interpretation // *Science*. 1979. Vol. 205 (3). P. 580–581.

Hutchinson G. E. On the relation between the oxygen deficit and the productivity and typology of lakes // *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 1938. Vol. 36. P. 336–355.

ILEC (International Lake Environmental Committee) (1987–1989). *Data Book of World Lake Environments. A Survey of the State of World Lakes*. Japan. Vol. 1, 2, 3, 4, 5.

Поступила в редакцию 22.06.2016

References

Chapra S. C., Canale R. P. Long-term phenomenological model of phosphorus and oxygen in stratified lakes. *Water Research*. 1991. Vol. 25 (6). P. 707–715.

Cornett R. J., Rigler F. H. Hypolimnetic oxygen deficits: their prediction and interpretation. *Science*. 1979. Vol. 205 (3). P. 580–581.

Hutchinson G. E. On the relation between the oxygen deficit and the productivity and typology of

lakes. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 1938. Vol. 36. P. 336–355.

ILEC (International Lake Environmental Committee) (1987–1989). *Data Book of World Lake Environments. A Survey of the State of World Lakes*. Japan. Vol. 1, 2, 3, 4, 5.

Received June 22, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Даценко Юрий Сергеевич

старший научный сотрудник, к. г. н., доцент
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра гидрологии суши
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: yuri0548@mail.ru
тел.: (495) 9395470, 89035909326

CONTRIBUTOR:

Datsenko, Yuri

M. V. Lomonosov Moscow State University
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: yuri0548@mail.ru
tel.: (495) 9395470, +79035909326