

<https://doi.org/10.3176/biol.1983.4.06>

УДК 574.524+577.472

Айни ЛИНДПЕРЕ, Хенно СТАРАСТ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ТРОФИИ ТЕРМИЧЕСКИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕР ПО КИСЛОРОДУ

Кислород — важный показатель озерных вод. Во время весенней циркуляции водная масса озера обогащается кислородом. В условиях термической стратификации доступ кислорода из поверхностного слоя в гипolimнион прерывается. При разложении органического вещества (ОВ) концентрация кислорода в воде постепенно уменьшается. Чем больше оседает органического материала из эпилимниона, тем быстрее возникает дефицит кислорода в гипolimнионе. Известно, что главный источник ОВ стратифицированных летом озер малой цветности — фитопланктон. Таким образом, скорость поглощения кислорода в гипolimнионе должна бы быть функцией количества фитопланктона. Так как убыток ОВ тем больше, чем толще гипolimнион, то глубина — важный показатель трофии озера.

Для определения трофического состояния термически стратифицированных озер по их кислородному режиму используют индекс кислорода, предложенный У. У. Уолкером (Walker, 1979). Индекс основывается на тесной связи ($r^2=0,89$) между арифметическим средним трех индексов трофии (по хлорофиллу, прозрачности и общему фосфору), с одной стороны, и гипolimниальным дефицитом кислорода с учетом средней глубины озера, с другой.

По нашим сведениям, У. У. Уолкер не опубликовал метод определения дефицита кислорода. Для проведения измерений и вычисления индекса трофии нами составлена нижеприведенная инструкция. По этой инструкции определены индексы кислорода озер Эстонии мезотрофного, эвтрофного и гипертрофного уровней. Наблюдения были проведены с 1981 по 1982 гг. на 20 малоцветных (цветность до 40° по бихромат-кобальтовой шкале) озерах во время летней стратификации.

Так как обследованные нами озера недостаточно глубоки (максимальная глубина 8—27; средняя 3,4—8,5 м), то дефицит кислорода вычисляли не всегда для площади водной поверхности гипolimниона, а иногда и для площади слоя, лежащего ниже слоя максимального скачка температуры и глубины двукратной прозрачности. Этот слой — либо металимниальный, либо гипolimниальный для различных озер. Некоторое предполагаемое проникновение кислорода в слои воды, лежащие ниже слоя максимального скачка температуры, существенно не исказит результатов определения дефицита кислорода. Об этом свидетельствует умеренное среднеквадратичное отклонение индекса кислорода $S=2,20$. Иногда кислород проникает в слои воды ниже области двукратной прозрачности в количестве, не допускающем вычисления его дефицита. В таких случаях дефицит кислорода вычисляют для поверхности слоя, лежащего еще ниже.

Следует учесть, что вычисление дефицита кислорода возможно лишь при наличии данных об объеме и площади метровых слоев воды.

Измерения, проводимые на озерах

В самом глубоком месте озера определяют температуру воды и концентрацию кислорода. Измерения начинают на глубине 0,5 м от поверхности и продолжают с метровыми интервалами по вертикали во всей толще воды. Последнее измерение проводят на глубине 0,5—1 м от дна озера. Чтобы не перемешать слои воды, ее прозрачность определяют в последнюю очередь.

Измерения растворенного кислорода, температуры и прозрачности воды проводят не менее трех раз во время летней термической стратификации. Все измерения следует проводить в то время, когда концентрация кислорода в глубине последнего измеряемого слоя воды не ниже 0,5 мг/л.

Первое измерение проводят весной в начале термической стратификации озера, когда градиент температуры в слое металимниального скачка достигает 1°С на 1 м или выше. В озерах Эстонии термическая стратификация происходит в большинстве случаев в первой половине мая, во время резкого увеличения температуры воздуха.

Наблюдения начинают с гипертрофных озер, так как скорость поглощения кислорода в гиполимнионе этих озер наибольшая. Через 3—4 дня измерения на них повторяют. Третье определение температуры воды, концентрации растворенного кислорода и прозрачности воды этих озер проводят через 5—8 дней после начала термической стратификации. Предполагаемый промежуток времени между первым и вторым, а также между вторым и третьим измерениями на эвтрофных озерах 1—2 недели, на мезотрофных 2—3 недели.

Следует иметь в виду, что в период летней термической стратификации, особенно на первом ее этапе, вертикальные температурные зоны не всегда устойчивы. При сильных ветрах слой металимниального скачка опускается на значительные глубины. При штормовых ветрах иногда перемешивается водная масса мелководных озер. В таком случае она обогащается кислородом, и наблюдения следует начать с самого начала.

Оборудование. 1. Концентрацию растворенного кислорода и температуру воды определяли амперометрически переносным термооксиметром типа УТ-801, изготовленным в Тартуском государственном университете. 2. Прозрачность воды определяли по диску Секки (диаметр диска 30 см). 3. Место наибольшей глубины озера устанавливали при помощи лота.

Вычисление результатов измерения

Ареальный относительный дефицит кислорода (D) вычисляется по уравнению

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n v(c_1 - c_2)}{sT},$$

где D выражается в г O_2/m^2 в сутки. По трем измерениям стратификации кислорода вычисляют два значения дефицита кислорода: в промежутки времени от первого до второго и от второго до третьего измерения. Если проводилось четыре или больше измерений стратификации кислорода, то значения дефицита кислорода вычисляют также по периодам между третьим и четвертым измерениями и т. д. Выписывают три значащие цифры дефицита кислорода, последнюю цифру округляют; n — число подсчитываемых метровых слоев воды. За точки отсчета принимают центры метровых слоев воды. В центрах слоев проводят

измерения температуры воды и концентрации растворенного кислорода. Первым метровым слоем (n_1) считается слой воды, для определения которого служит следующий комплекс-критерий: верхняя площадь искомого слоя находится ниже того слоя, в котором градиент температуры воды оказывается максимальным, и достигает или превышает 1° на 1 м; центр искомого слоя находится ниже двукратной прозрачности воды; так как для вычисления дефицита кислорода требуется два измерения концентрации кислорода с определенным промежутком времени, то первым подсчитываемым метровым слоем для обоих измерений следует считать нижележащий слой. Если $c_2 \geq c_1$, то сначала подсчитывают следующий, непосредственно нижележащий, метровый слой. Вторым подсчитывают метровый слой воды, центр которого находится на 1 м ниже первого, третьим — слой, центр которого на 2 м ниже первого и т. д. Последним подсчитывают метровый слой (n), центр которого находится в 0,5—1,0 м от дна озера;

- v — объем метрового слоя воды, m^3 ;
 c_1, c_2 — концентрации кислорода в метровом слое во время двух последовательных наблюдений, $г O_2/m^3$;
 T — промежуток времени между двумя последовательными наблюдениями, в сутках;
 s — площадь первого подсчитываемого метрового слоя воды, m^2 .

Индекс трофии по кислороду (I_0) вычисляется согласно формуле (Walker, 1979):

$$I_0 = 175 + 49 \log D - 223 \log \bar{z} + 100 (\log \bar{z})^2,$$

где D — относительный ареальный дефицит кислорода, $г O_2/m^2$ в сутки;

\bar{z} — средняя глубина озера, м.

Индекс вычисляют по каждому значению дефицита кислорода. Расхождение величин двух индексов, как правило, должно оставаться ниже 10 баллов. Если разница между двумя индексами оказывается выше 10 баллов или равна им, то производят дополнительное (четвертое) измерение на озере и вычисляют дополнительный (третий) индекс. Если три расхождения между всеми тремя индексами попарно превышают 10 баллов или равны 10 баллам, то результаты измерений считают слишком ошибочными, и ими не следует пользоваться в дальнейшем. Если теперь одно или два расхождения между тремя индексами попарно превышают 10 баллов или равны им, аномальность результатов следует оценивать по Государственному стандарту Союза ССР (Правила оценки аномальности результатов наблюдений. ГОСТ 11.002-73, 1973). Методы оценки аномальности результатов рассматриваются ниже.

Для оценки трофического состояния озера вычисляют арифметическое среднее исходных индексов кислорода. Индекс трофии по кислороду выписывают с учетом стандартного отклонения в виде двух значащих цифр, последнюю цифру округляют. Стандартное отклонение индекса кислорода $S = 2,20$, достоверность индекса ± 5 баллов при уровне значимости 0,05.

Оценка аномальности исходных индексов кислорода. При составлении предписания для оценки аномальности исходных индексов кислорода за основу были приняты критерии оценки аномальности результатов наблюдений, установленные вышеуказанным государственным стандартом.

1. При неизвестном генеральном стандартном отклонении для упорядоченной выборки исходных индексов $I_1 \leq I_2 \leq I_3$ подсчитывают выбороч-

ное среднее $\bar{I} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_i$ и выборочное стандартное отклонение

$$S = \left\{ 0,5 \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2 \right\}^{1/2}.$$

Чтобы оценить принадлежность I_1 или I_3 к данной нормальной совокупности и принять решение об исключении или оставлении $I_1(I_3)$ в составе выборки, находят отношение

$$U_1 = \frac{\bar{I} - I_1}{S} \quad \text{или} \quad U_3 = \frac{I_3 - \bar{I}}{S}.$$

Результат сравнивают с величиной 1,15. Если $U_1 \geq 1,15$, то подозреваемый в аномальности I_1 аномален и следует его исключить, в противном случае его считают нормальным и не исключают. Оценка I_3 производится аналогично.

2. Надо иметь в виду, что результаты обработки наблюдений будут тем точнее, чем больше информации будет использовано. В случае, если объем результатов наблюдений достаточно большой, для вычисления генерального стандартного отклонения индекса кислорода следует пользоваться «Критериями оценки аномальности результатов наблюдений при известном генеральном среднеквадратическом отклонении и неизвестном генеральном среднем α » (Правила оценки аномальности результатов наблюдений. ГОСТ 11.002-73, 1973).

Пример. Вычисление индекса трофии по кислороду для озера Лаватси.

1. Результаты измерений температуры воды, концентрации растворенного кислорода и прозрачности воды излагают в виде таблицы.

2. По данным таблицы выясняют первый подсчитываемый метровый слой воды, исходя из вышеприведенных критериев. При первом измерении этим слоем считается слой воды, центр которого находится на глубине 5,5, при втором — на глубине 6,5 и при третьем — 5,5 м. Для вычисления дефицита кислорода между первым и вторым, а в данном примере также между вторым и третьим измерениями, первым подсчитывают слой воды, центр которого находится на глубине 6,5 м.

Результаты измерений температуры, концентрации растворенного кислорода и прозрачности воды в озере Лаватси

Глубина, м	I измерение 13/V 1982		II измерение 20/V 1982		III измерение 26/V 1982	
	t°	O ₂ , мг/л	t°	O ₂ , мг/л	t°	O ₂ , мг/л
0,5	11,3	12,0	11,5	12,6	13,0	13,0
1,5	11,5	11,8	11,3	13,2	13,3	13,2
2,5	11,0	12,0	11,4	13,0	13,3	13,0
3,5	9,8	12,4	10,8	13,0	13,3	13,0
4,5	7,7	12,2	9,7	14,4	9,8	16,8
5,5	7,6	10,6	8,5	12,6	8,9	14,0
6,5	6,7	9,8	7,6	8,9	7,8	8,2
7,5	6,6	9,1	7,3	7,5	7,0	6,8
8,5	6,4	8,7	6,7	7,0	6,8	5,4
9,5	6,1	8,1	6,7	6,3	6,5	4,7
10,5	6,1	7,4	6,5	5,7	6,3	4,2
11,5	6,0	6,4	6,5	5,3	6,3	3,6
12,5	5,7	6,1	6,5	4,5	6,3	3,2
13,5	5,7	5,9	6,5	4,2	6,2	2,9

Примечание. Толщина слоя воды в озере 14,4 м. Значения прозрачности воды во время первого измерения 2,6, во время второго — 2,5 и во время третьего — 2,0 м.

3. Ареальный относительный дефицит кислорода для обеих пар измерений вычисляюг для площади 36 800 м², лежащей на глубине 6,0 м. Подставив величины объемов метровых слоев воды и соответствующие концентрации кислорода первого и второго наблюдений в формулу D , получим:

$$\begin{aligned} 6-7 \text{ м } v(c_1-c_2) &= 34\,400(9,8-8,9) = 30\,960 \\ 7-8 \text{ м } v(c_1-c_2) &= 29\,500(9,1-7,5) = 47\,200 \\ 13-14 \text{ м } v(c_1-c_2) &= 5\,100(5,9-4,2) = 8\,670 \\ \hline \Sigma &= 218\,670 \end{aligned}$$

Промежуток времени между первым и вторым наблюдениями равен 7 суткам. Таким образом,

$$D_1 = \frac{218\,670}{36\,800 \cdot 7} = 0,849 \text{ г/м}^2 \text{ в сутки.}$$

Аналогично вычисляют $D_2 = 0,808$.

4. Исходные индексы кислорода вычисляют по величинам D_1 и D_2 с учетом средней глубины ($\bar{z} = 6,9$ м) озера. Подставив значения D_1 в формулу I_0 получим:

$$I_1 = 175 + 49 \log 0,849 - 223 \log 6,9 - 100 (\log 6,9)^2 = 54,6.$$

Аналогично по величине D_2 вычисляют $I_2 = 53,7$. Оценка аномальности исходных индексов

$$I_1 - I_2 = 54,6 - 53,7 < 10$$

Результаты считают нормальными. Дополнительное измерение не является обязательным. Арифметическое среднее исходных индексов:

$$I_0 = \frac{54,6 + 53,7}{2} = 54,1.$$

Таким образом, индекс трофии по кислороду для озера Лаватси $I_0 = 54 \pm 2$.

Индексы трофии по кислороду обследованных нами озер Эстонии колеблются от 40 до 112 баллов.

ЛИТЕРАТУРА

Правила оценки аномальности результатов наблюдений. ГОСТ 11.002-73. М., 1973.
Walker, W. W. Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lakes. — Water Res., 1979, 15, 1463—1470.

Институт зоологии и ботаники
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
18/III 1983

Aini LINDPERE, Henno STARAST

TERMILISELT STRATIFITSEERUNUD JÄRVEDE TROOFSUSINDEKSI MÄÄRAMINE HAPNIKUSISALDUSE JÄRGI

Artiklis on esitatud fütoplanktoonsete mesotroofsete, eutroofsete ja hüpertroofsete termiliselt stratifitseerunud heledaveeliste väikejärvede troofsuse hapnikuindeksi määramise meetod. Indeks on arvatud W. W. Walkeri (1979) võrrandi järgi. Lähteandmeteks on järve keskmine sügavus ja hapniku neeldumise kiirus e. hapnikudefitsiit kahekordsest vee läbipaistvusest sügavamal, temperatuuri hüppekihi all asuvas veekihis.

Aini LINDPERE, Henno STARAST

DETERMINATION OF OXYGEN-BASED TROPHIC STATE INDEX IN THERMALLY STRATIFIED LAKES

The determination and calculation of the areal rates of dissolved oxygen depletion below the thermocline in thermally stratified small lakes is presented. The trophic state index in this study is based upon the areal oxygen depletion rate and the mean depth of the lake. It is calculated from the equation by W. W. Walker (1979). The standard error is ± 2.2 index units.

Using the proposed method, the trophic state indices were determined for 20 shallow (mean depths ranging between 3.4 and 8.5 m) weakly coloured lakes of mesotrophic, eutrophic and hypertrophic types in Estonia.