

Г. ВИНБЕРГ

**ОБ ИЗМЕРЕНИИ СКОРОСТИ ОБМЕНА КИСЛОРОДА МЕЖДУ ВОДОЕМОМ И АТМОСФЕРОЙ**

(Представлено академиком В. И. Вернадским 1 I 1940)

Газовое равновесие между атмосферой и гидросферой нарушается главным образом в результате жизнедеятельности населяющих воду организмов. В водоемах замедленного стока (озера, водохранилища, пруды) весьма обычны случаи, когда в продолжение длительного времени, например на протяжении всего вегетационного периода, содержание кислорода в поверхностных слоях сильно отклоняется в ту или иную сторону от 100% насыщения. В достаточно глубоких водоемах неравновесное содержание кислорода в поверхностных слоях при некоторых условиях может обуславливаться быстрыми изменениями температуры воздуха. Этот легко учитываемый фактор вызывает лишь кратковременные отклонения от равновесия. Длительное пересыщение поверхностных слоев воды кислородом свидетельствует о преобладании в водоеме процессов синтеза органических веществ из минеральных (первичная продукция), что, как известно, сопровождается освобождением кислорода, над процессами разрушения их (деструкция), которые при доступе кислорода в конечном итоге всегда приводят к окислению за счет потребления молекулярного кислорода. Скорость обмена кислорода между водой и воздухом пропорциональна разности между суммарными величинами первичной продукции и деструкции в водоеме, т. е. пропорциональна «чистой» продукции за рассматриваемый период.

Количественные исследования обмена кислорода между атмосферой и природными водоемами проводились только при изучении реэрации самоочищающихся рек (<sup>1</sup>). Использованный в этих работах метод неприменим к стоячим водам. Мы сделали попытку разработать соответствующий метод, основываясь на следующих соображениях.

Наблюдения за изменением содержания кислорода в темное время суток, когда фотосинтез отсутствует, дают суммарный итог потребления кислорода в водоеме и обмена с атмосферой. Известно, что скорость, с которой устанавливается равновесие между раствором атмосферных газов в воде и воздухом, практически пропорциональна разности между парциальными давлениями газа, например кислорода, в атмосфере и воде (<sup>2,3</sup>). Заменив парциальное давление кислорода концентрацией его, имеем:

$$\frac{d(C_t - C)}{dt} = -K(C_t - C), \quad (1)$$

где  $C$  — концентрация кислорода в абсолютных единицах, соответствующая при данных условиях насыщению,  $C_t$  — концентрация его в момент времени  $t$ ,  $K$  — константа, представляющая отвлеченное число, в каждом

данных условиях зависящее только от выбранного промежутка времени. Величина  $K$  характеризует скорость процесса при данных условиях и указывает, какую долю от наличной разности парциальных давлений газа в воздухе и воде составляет уменьшение этой разности в единицу времени.

Если концентрация кислорода в воде выражена в процентах насыщения, то

$$\frac{d \frac{C_t - C}{C} 100}{dt} = -K \frac{C_t - C}{C} 100. \quad (1a)$$

Скорость потребления кислорода в водоеме на протяжении малых промежутков времени (ночь) можно считать постоянной, т. е. при неизменных прочих условиях

$$\frac{dC_t}{dt} = \frac{d(C_t - C)}{dt} = -q \quad \text{или} \quad \frac{d \frac{C_t - C}{C} 100}{dt} = -q \frac{100}{C}. \quad (2)$$

Величина  $q$  выражает скорость потребления кислорода и зависит не только от выбранного промежутка времени, но также и от единиц измерения  $C$ .

При одновременном течении обоих процессов, если концентрация  $O_2$  выражена в процентах насыщения:

$$\frac{d \frac{C_t - C}{C} 100}{dt} = -K \frac{C_t - C}{C} 100 - q \frac{100}{C}. \quad (3)$$

Точно так же и при других способах выражения концентрации кислорода приходим к дифференциальным линейным уравнениям типа

$$\frac{d\delta}{dt} = -K\delta - \lambda, \quad (4)$$

где  $\delta$  и  $\lambda$  получают разные значения в зависимости от единиц измерения и способов выражения скорости обмена с атмосферой.

Из уравнения (4) находим зависимость содержания кислорода в воде от времени:

$$\delta_t = -\frac{\lambda}{K} + \left( \delta_0 + \frac{\lambda}{K} \right) e^{-K(t-t_0)}. \quad (5)$$

Эмпирически получив значение  $\delta_t$  для нескольких моментов времени, возможно вычислить значения констант  $K$  и  $\lambda$ . Иначе можно приближенно определить величины  $K$  и  $\lambda$ , пользуясь уравнением (4). В этом случае по эмпирически полученной кривой зависимости  $\delta$  от времени находят одним из существующих способов для нескольких точек значения  $\frac{d\delta}{dt}$  и соответствующие им величины  $\delta$ . В случае, если зависимость между полученными таким путем величинами действительно может быть выражена прямой, как это ожидается теоретически [уравнение (4)], находят одним из общепринятых способов соответствующие коэффициенты, т. е. значения  $K$  и  $\lambda$ .

Сказанное справедливо при постоянстве всех прочих условий, в частности температуры. На практике во время наблюдений температура не остается вполне постоянной. Возникающие вследствие этого погрешности возможно уменьшить, переписав уравнение (3) в виде

$$\frac{d(C_t - C)}{dt} = -K'(c - 100) - q, \quad (6)$$

где  $K' = \frac{KC}{100}$ ,  $c = \frac{C_t}{C} 100$ , т. е. концентрация  $O_2$  в % насыщения.

$K'$  уже не является отвлеченным числом и численно равно количеству кислорода, обмениваемому с атмосферой при 99 или 101% насыщения, выраженному в тех же единицах, что и  $C$  (мг/л, см<sup>3</sup>/л).

В условиях не вполне постоянной температуры уравнение (6) должно давать более правильные результаты благодаря тому, что  $K$  и  $C$  изменяются в противоположные стороны при изменении температуры. Обычно, вслед за Стритером<sup>(1)</sup> принимается даже, что произведение их (а значит, и  $K'$ ) в широком интервале температур остается постоянным<sup>(4, 5, 6)</sup>. Однако позднейшие наблюдения Стритера<sup>(7)</sup> указывают на возрастание  $K'$  с температурой, которое, понятно, идет с меньшей скоростью, чем возрастание  $K$ .

В качестве первой попытки применения описанного метода в июле 1938 г. были проведены 11 ночных серий наблюдений над содержанием кислорода в воде Черного озера в Косине. Определения содержания  $O_2$  с 8 час. вечера до 3 или 4 час. утра производились каждый час в поверхностном слое воды на глубине 1,2 м, а также на поверхности воды в жестяном баке (диаметр 75 см, высота 70 см), устанавливавшемся в озеро в месте наблюдения. Уровень воды в баке был на 10 см ниже уровня воды озера. Наблюдения в баке имели целью устранить влияние перемешивания с нижележащими лишенными кислорода слоями, что имело большое значение в условиях Черного озера, в котором во время наблюдения имела место исключительно резкая вертикальная термическая и химическая стратификация. Пересыщенные кислородом поверхностные слои уже на глубине 2—3 м сменялись водой, совершенно лишенной кислорода. Сопоставление результатов наблюдений показало, что в тех случаях, когда за ночь не устанавливалось равенство температур на поверхности воды и на глубине 1 м, т. е. когда в озере отсутствовали условия, способствующие значительному перемешиванию, изменение содержания  $O_2$  в поверхностных слоях воды озера и в баке были практически тождественны. Это позволило для вычислений использовать наблюдения за изменением содержания  $O_2$  в воде бака\*.

Результаты определения  $O_2$  в разные часы были нанесены на график. По сглаженным от руки кривым найдены значения  $C_t$ , затем, учитывая температуру в момент наблюдения и среднее за ночь атмосферное давление, были вычислены величины  $(C_t - C)$  и содержание кислорода в процентах для каждого из моментов наблюдений. По формуле Стирлинга были найдены соответствующие значения  $\frac{d(C_t - C)}{dt}$  и полученные величины для всех наблюдений нанесены на один график, показывающий зависимость их от  $(c - 100)$ . Эмпирические данные отчетливо расположились по прямой, показав справедливость и достаточность предпосылок, на основании которых было получено уравнение (6). С помощью метода наименьших квадратов были найдены соответствующие коэффициенты уравнения прямой, т. е.  $K'$  и  $q$ , которые оказались равными (в мг  $O_2$  за час на 1 л):

$$K' = 0,00559, \quad q = 0,192.$$

Зная глубину слоя воды, участвовавшего в обмене кислорода с атмосферой (глубина воды в баке 60 см), нетрудно вычислить, какое количество кислорода переходит из воды в атмосферу при любом содержании кислорода в поверхностной воде. Так, при 120% насыщения через 1 м<sup>2</sup> поверхности озера (при условии отсутствия значительного перемешивания!)

\* Полученные данные, ход вычислений и более детальное обсуждение вопроса будут напечатаны в «Трудах Лимнологической станции в Косине», вып. 23.

в сутки выходит 1,61 г O<sub>2</sub>, при 160% 3,22 г O<sub>2</sub> и т. д. Весьма интересно, что эти цифры очень близки по абсолютным величинам к скорости ре-аэрации рек при соответствующих дефицитах кислорода [по данным, собранным в сводке Мара (8)]. При неизменных условиях перемешивания количество кислорода, обмениваемое с атмосферой через 1 м<sup>2</sup> поверхности за сутки, определяется средним суточным процентом насыщения кислородом поверхностных слоев воды. В случае Черного озера средний суточный процент насыщения был близок к 140%, а следовательно, с 1 м<sup>2</sup> поверхности Черного озера в июле 1938 г. за сутки переходило в атмосферу около 2,5 г кислорода.

Помножив  $q$  на 24, получаем среднее суточное потребление кислорода за период наблюдений на 1 л воды, равное 4,61 мг O<sub>2</sub>. Эту величину интересно сравнить с соответствующей величиной, полученной иным методом. Одновременно с описанными наблюдениями на Черном озере производились определения скорости потребления и освобождения кислорода в воде описанным нами ранее методом (9), с помощью установки на сутки в озеро затемненных и светлых, заполненных водой склянок. Пять определений скорости потребления кислорода с помощью этого «метода склянок» дали следующие результаты (в мг на 1 л O<sub>2</sub> за сутки): 4,48 (2—3 VII), 4,58 (7—8 VII), 1,45 (14—15 VII; невероятная и, повидимому, ошибочная величина), 4,42 (20—21 VII) и 4,99 (26—27 VII). Таким образом оба независимых метода дали практически тождественные величины.

По разности содержания кислорода в светлых склянках до и после экспозиции на разных глубинах возможно вычислить преобладание освобождения кислорода над потреблением его, что должно соответствовать в среднем количеству кислорода, переходящему за сутки в атмосферу. Исходя из данных, полученных «методом склянок», эта величина для отдельных наблюдений равнялась (в г O<sub>2</sub> на 1 м<sup>2</sup> за сутки): -1,04, +2,74, +1,23, +2,63, +2,61. Нельзя не видеть большой близости этих величин к результату приведенных выше вычислений, приведших к величине +2,5 г O<sub>2</sub> на 1 м<sup>2</sup> за сутки. Такое совпадение результатов обоих методов указывает, что получаемые с их помощью величины в условиях Черного озера близко соответствуют истинным.

Рассмотрение условий, влияющих на скорость обмена кислорода с атмосферой, приводит нас к мнению, что описанное ранее (10) расхождение результатов определения первичной продукции «методом склянок» с результатами вычислений по суточному ходу растворенного кислорода может зависеть от ускорения обмена с атмосферой в ночное время вследствие установления частичной гомотермии, что благоприятствует перемешиванию.

Описанный метод определения скорости потребления кислорода водой и скорости обмена с атмосферой может быть применен не только к стоячим водоемам. В частности, он может получить широкое практическое применение при изучении самоочищения рек в тех отрезках русла, где достаточно выражены суточные колебания содержания растворенного кислорода.

Лимнологическая станция в Косине  
Москва

Поступило  
14 I 1940

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА]

- <sup>1</sup> Г. В. Стритер и др., Вопросы загрязнения и самоочищения водоемов (1937). <sup>2</sup> А. С. Селиванов, Записки Болшевской биол. ст., 9 (1936). <sup>3</sup> Г. Ю. Верещагин, Гидрохим. матер., VI (1930). <sup>4</sup> С. Н. Строганов и Н. Н. Корольков, Биологическая очистка сточных вод (1934). <sup>5</sup> Н. М. Попова в сб. «Пути развития очистки сточных вод» (1937). <sup>6</sup> М. И. Лапшин и С. Н. Строганов, Химия и микробиология питьевых и сточных вод (1938). <sup>7</sup> Н. W. Streeter, Sewage Work J., 8 (1936). <sup>8</sup> G. Maier, Techn. Gemeindebl., 32 (1929). <sup>9</sup> Г. Винберг, Тр. лимнол. ст. в Косине, 19 (1934); 20 (1935); 21 (1937); 22 (1939). <sup>10</sup> Г. Винберг и Л. И. Яровицина, Тр. Лимнол. ст. в Косине, 22 (1939).