

42

ТРУДЫ  
ЛИМНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ  
В КОСИНЕ

22

PROCEEDINGS OF THE KOSSINO LIMNOLOGICAL  
STATION OF THE HYDROMETEOROLOGICAL SERVICE OF USSR

22225



## СУТОЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОЛИЧЕСТВА РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА КАК МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ВОДОЕМОВ

Г. Г. Винберг и Л. И. Яровицина

Понимание и овладение совокупностью процессов, определяющих в конечном итоге продуктивность водоема, возможно только на основе количественного изучения отдельных сторон этого сложного явления. В частности необходимо найти методы для измерения суммарной величины первичной продукции и суммарной величины деструкции (Г. Винберг—7) по отношению ко всему водоему в целом.

В предыдущих работах мы уже излагали результаты сделанной нами попытки в этом направлении. Однако применявшийся метод, основанный на регистрации скорости поглощения и выделения кислорода в установленных в озере склянках, естественно, не является универсальным и полученные результаты должны быть дополнены и проверены путем сопоставления с данными, полученными иными путями. Кроме того, с помощью использованного в предыдущих работах метода, в лучшем случае, может быть измерена величина деструкции и первичной продукции водной массы (планктона), а не всего водоема в целом, так как им не учитывается фотосинтетическая деятельность макрофитов, так же, как и вообще результаты жизнедеятельности всего прибрежного и донного населения.

Один из возможных подходов к количественному изучению интересующего нас вопроса — это использование в качестве основы для вычислений суточных колебаний количества растворенного в воде кислорода, на что еще в 1924 г. обратил внимание А. Пюттер (3).

В основе подобных расчетов лежит допущение, что на протяжении суток изменяется только скорость обогащения воды кислородом, в результате фотосинтетической деятельности растений, а скорость убыли кислорода, вследствие процессов поглощения его и газообмена с атмосферой, остается постоянной.

Приняв это допущение и располагая несколькими наблюдениями, произведенными в разное время суток, возможно рассчитать количество кислорода, выделенного за время наблюдения. Как минимум необходимо располагать двумя наблюдениями, сделанными в темное время суток. Если количество кислорода, найденное во время первого ночного наблюдения, обозначить  $O_2^1$  и количество кислорода во время второго ночного наблюдения  $O_2^2$  то скорость изменения количества кислорода ( $\Delta O_2$ ) выразится:

$$\Delta O_2 = \frac{O_2^1 - O_2^2}{t' - t''}$$

Если  $O_2$  выражен в мг, а время в часах, то  $\Delta O_2$  означает изменение концентрации кислорода в мг за час, в условиях отсутствия фотосинтеза. Очевидно, что за  $m$  часов будет поглощено  $\Delta O_2 \cdot m$  миллиграммов кислорода.

Зная  $\Delta O_2$ , легко получить количество кислорода, выделенное за любой промежуток времени. Действительно, если первоначальное количество кислорода и количество кислорода по истечении времени  $t$

не отличаются, то очевидно, что количество кислорода, выделенное за этот промежуток времени, равно убыли его, т. е.

$$PO_2^m = \Delta O_2 \cdot m,$$

где  $PO_2^m$  означает количество кислорода, выделенное за время  $m$ . Если же количества кислорода во время первого наблюдения ( $O_2^0$ ) и количество кислорода по истечении времени  $m$  ( $O_2^m$ ) разнятся, то, очевидно, что за это время количество выделенного кислорода отличалось от убыли его на величину разности между содержанием кислорода во время начального и конечного наблюдения. В этом случае:

$$PO_2^m = \Delta O_2 \cdot m + (O_2^m - O_2^0),$$

или, когда промежуток времени между первым и вторым наблюдением равняется 24 часам и  $\Delta O_2$  выражена в мг за час, то количество мг кислорода, выделенное за сутки (суточная первичная продукция), будет:

$$PO_2^{24} = O_2 \cdot 24 + (O_2^{24} - O_2^0).$$

На рис. 1 для пояснения изложенные расчеты представлены графически.

Приведенная формула имеет ряд преимуществ перед методом А. Пюттера, предложившего систему двух уравнений:

$$py - px = a; (24 - p)x = a,$$

где  $x$  — количество поглощаемого  $O_2$  в некотором объеме воды в час;  $y$  — количество выделяемого  $O_2$  в том же объеме в час;  $p$  — число дневных часов и  $a$  — разность между содержанием  $O_2$  в определенном слое воды вечером и утром.

Примеров использования предложенного способа А. Пюттер не приводит, но считает, что он может быть применен тогда, когда возможно пренебречь теми количествами кислорода, которые в результате перемешивания переходят в соседние слои. Быть может, приближающиеся к этому условия можно наблюдать в некоторых случаях, например, как думает А. Пюттер, на относительно больших глубинах в море при значительной прозрачности, но для огромного большинства пресноводных озер, с относительно малой прозрачностью и резкой стратификацией кислорода, предложенный А. Пюттером способ вычисления не может быть непосредственно использован. Предложение А. Пюттера трудно применимо также и потому, что для расчетов необходимо знать число «темных» и «светлых» часов, определить которые, не говоря уже об искусственности всего построения, практически крайне затруднительно, поскольку зависимость интенсивности фотосинтеза от силы света в разных случаях заведомо будет различна и в частности будет отличаться на разных глубинах. Нетрудно видеть, что предложенный А. Пюттером способ вычисления представляет собой частный случай нашей формулы.

Действительно, по А. Пюттеру

$$py - px = (24 - p)x$$

или

$$py = 24x$$

Заметив, что  $py = PO_2^{24}$  и  $x = \Delta O_2$ , получаем:

$$PO_2^{24} = \Delta O_2 \cdot 24;$$

следовательно, формула А. Пюттера пригодна только для тех случаев, когда начальное и конечное количество кислорода равны и  $O_2^{24} - O_2^0 = 0$ .

Недавно С. Бруевичем (1) для тех же целей была предложена несколько отличная формула, примененная им на Каспийском море. В наших обозначениях формула С. Бруевича имеет вид:

$$PO_2^{24} = 0.85 \Delta O_2 \cdot n + (O_2^{\max} - O_2^{\min}),$$

где  $n$  — число дневных часов и  $(O_2^{\max} - O_2^{\min})$  — разность между максимальным содержанием кислорода вечером и минимальным утром. Для наглядного пояснения отношения метода расчета С. Бруевича к предлагаемому нами на рис. 1 показано графическое выражение соответствующих величин.

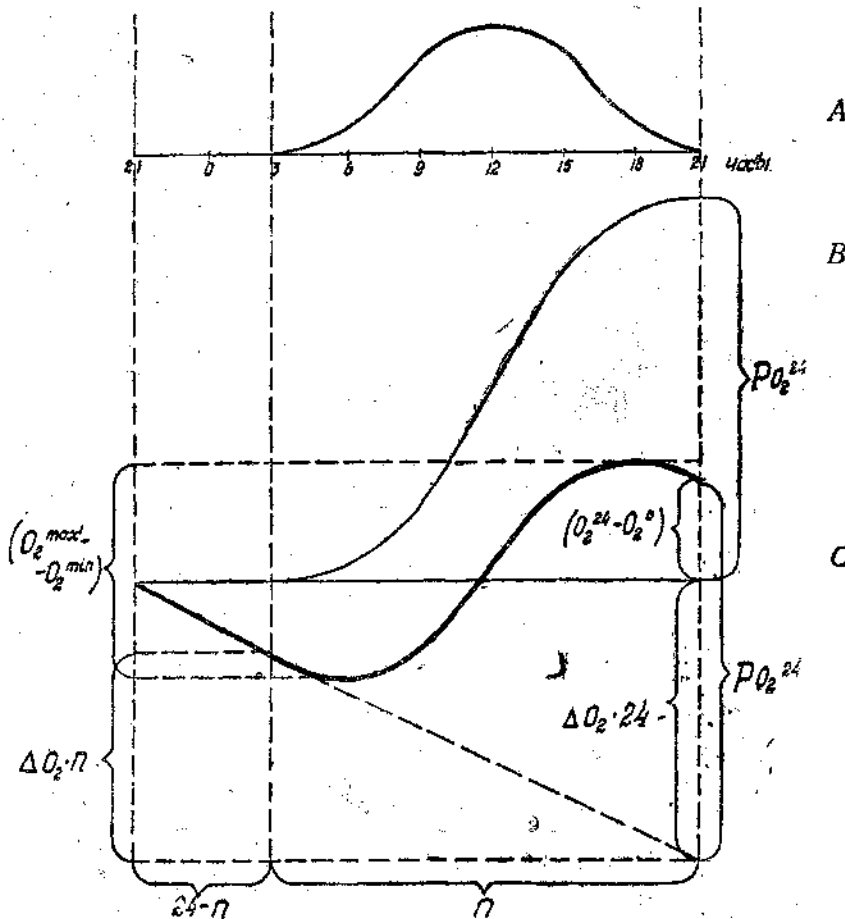


Рис. 1. Построение кривой суточных колебаний кислорода в водоемах. А — изменение интенсивности в течение суток, В — количество выделенного кислорода (интеграл кривой А), С — содержание кислорода в воде. На абсциссе время в часах, на ординате количество кислорода в условных единицах.

Fig. 1. The construction of the curve of diurnal fluctuations of oxygen in water. A — variations in intensity throughout the 24 hours, B — amount of liberated oxygen (an integral of the A — curve), C — oxygen content in water. Along the abscissa the time (in hours) is plotted. Along the ordinate the amount of oxygen (in arbitrary units)

Значительно более сложная формула С. Бруевича в отличие от нашей содержит эмпирический коэффициент (0,85), может быть использована только для вычислений количества выделенного

кислорода за полные сутки, вводит чисто условную продолжительность дня ( $n$ ) и требует наблюдений во время минимального и максимального содержания кислорода в воде, что практически весьма затруднительно. Очевидно, что применение формулы С. Бруевича оправдано лишь в тех случаях, когда по каким либо соображениям желательно вводить в вычисления величину  $(O_2^{\max} - O_2^{\min})$ , что согласно С. Бруевичу имеет место при работе на море.

При применении на практике расчетов по суточным колебаниям  $O_2$  необходимо считаться с тем, что в пресных, относительно мелких водоемах с резкой стратификацией кислорода, переход кислорода в соседние слои вследствие перемешивания имеет настолько большое значение, что суточный ход изменения кислорода в каждом данном слое часто имеет совершенно незакономерный характер и не может служить основой для вычислений.

Однако это затруднение может быть легко обойдено, если базироваться не на суточных колебаниях содержания кислорода в том или ином слое воды, а на суточных колебаниях общего количества кислорода, заключенного во всем столбе воды или водоеме в целом. Действительно, в этом случае перераспределение кислорода между слоями воды ни в какой степени не будет сказываться на результате, поскольку от такого перераспределения общее количество его, заключенное в столбе воды, не изменится. В дальнейшем все вычисления относятся не к содержанию  $O_2$  на какой-либо глубине, а к общему количеству кислорода в столбе воды сечением  $1 \text{ дм}^2$ .

Летом 1936 г. с целью проверки на практике приложимости изложенного способа вычислений мы провели на Белом озере в Косине серию наблюдений.

#### МЕТОДИКА

Пробы для определения  $O_2$  (по Винклеру) брались в строго определенном месте озера с установленного на якорях на глубине 7 м плота. Для уменьшения погрешностей, которые в условиях крайне резкой стратификации кислорода в Белом озере (рис. 2) могут возникнуть при взятии проб батометром, пробы брались путем насасывания ртом воды, в 2,5-литровую склянку с помощью широкой резиновой трубки, конец которой опускался на нужную глубину. Из склянки сифоном отбирались две пробы для определения  $O_2$ . Таким образом, все приведенные в таблицах

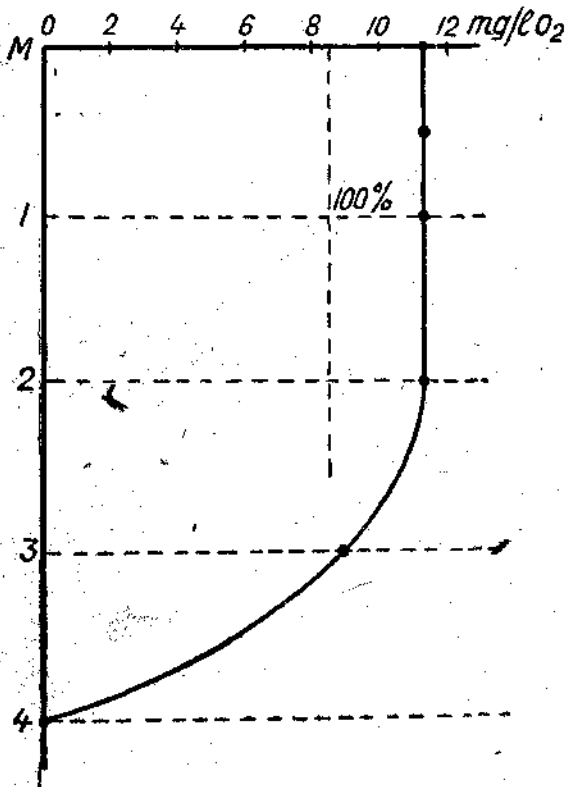


Рис. 2. Пример распределения кислорода в Белом озере во время летней стагнации (по наблюдениям в 17 ч. 4.VIII 1936).

Fig. 2. An example of oxygen distribution in the lake Beloie during Summer stagnation (observations at 17 h. August 4 th 1936).

Таблица I.

Результаты наблюдений над содержанием кислорода (мг/л) в  
Oxygen content (mg/l) in the Belois lake  
Наблюдение I Observation I 1-2 июля (July)

Глуб. в м Depth in m	t° воды		O <sub>2</sub>						В склянках in flasks		
	7 h	17 h	7 h 00	11 h 50	16 h 50	21 h 30	2 h 50	6 h 40	A	B	A-B
0	21.1	—	7.75	8.26	8.48	8.26	7.93	7.97	2.76	1.28	+1.48
0,5	—	—	7.88	(8.18)	8.47	8.04	7.85	7.91	2.29	1.02	+1.27
1	20.9	—	8.10	8.10	8.41	8.10	7.70	7.71	1.54	1.14	+0.40
2	20.8	—	7.79	7.93	8.22	8.01	7.74	7.77	1.02	1.12	-0.10
3	20.7	—	7.78	7.75	8.19	7.92	7.45	7.45	(0.30)	(0.46)	-0.16
4	19.9	—	4.33	7.74	8.09	7.45	6.80	6.31	0.32	0.85	-0.53
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			319	356	372	356	337	333	46,3	41,2	+5,1

Общее количество O<sub>2</sub> под 1 дм<sup>2</sup>  
Total quantity O<sub>2</sub> under 1 dm<sup>2</sup>

Наблюдение II Observation II 7-8 июля (July)

Глуб. в м Depth in m	t° воды		O <sub>2</sub>						В склянках in flasks		
	7h	17h	7h 10	11h50	17h10	21h30	3h10	7h10	A	B	A-B
0	24.4	24.6	10.32	10.69	11.49	10.65	10.35	10.59	2.07	0.77	+1.30
0,5	—	—	10.46	11.09	11.45	10.77	10.33	10.30	1.30	0.59	+0.71
1	—	24.4	10.69	10.62	11.58	10.93	10.53	10.53	(0.82)	1.01	(+0.30)
2	24.0	24.4	9.55	10.12	(10.20)	10.85	10.24	10.19	0.33	1.05	-0.72
3	21.5	21.1	6.31	6.31	6.30	6.60	5.94	5.59	0.07	0.79	-0.72
4	—	19.7	1.53	1.62	2.47	2.42	1.81	0.97	0.10	0.66	-0.56
5	—	—	0	0	0	0	0	0	—	—	—
			332	343	363	361	337	323	22,8	37,5	-14,7

Общее количество O<sub>2</sub> под 1 дм<sup>2</sup>  
Total quantity O<sub>2</sub> under 1 dm<sup>2</sup>

Наблюдение III Observatin III 14-15 июля (July)

Глуб. в м Depth in m	t° воды		O <sub>2</sub>						В склянках in flasks		
	7h	17h	7h00	12h00	17h00	21h50	3h10	7h20	A	B	A-B
0	23.7	24.9	8.66	9.57	9.52	9.10	9.10	8.90	1.69	0.32	+1.37
0,5	—	24.9	8.64	9.07	9.70	9.05	9.10	8.90	1.50	0.17	+1.33
1	—	24.8	8.87	9.05	9.50	9.24	8.92	8.82	1.16	0.34	+0.82
2	23.5	24.8	8.45	8.54	9.39	9.07	8.90	8.90	0.77	0.26	+0.51
3	23.0	23.4	7.43	7.60	8.10	7.54	7.47	7.20	0.97	0.41	+0.56
4	20.4	18.2	0.72	0.81	1.08	2.10	2.59	0.72	0.52	0.72	-0.20
5	—	—	0	0	0	0	0	0	—	—	—
			298	307	329	325	305	301	43,0	18,1	+24,9

Общее количество O<sub>2</sub> под 1 дм<sup>2</sup>  
Total quantity O<sub>2</sub> under 1 dm<sup>2</sup>

Table I

воде Белого озера в разное время дня (1936)  
water at different times of the day (1936)

Наблюдение IV Observation IV

25-27 июля (July)

Глуб. в м Depth in m	t° воды		O <sub>2</sub>						В склянках in flasks								
	7h	17h	7h10	12h00	17h00	21h50	24h00	7h10	A	B	A-B						
0	25.0	26.3	9.22	10.09	11.42	10.47	9.98	10.01	3.27	0.75	+2.52						
0.5	—	26.3	9.48	10.01	10.78	10.46	10.00	10.08	2.37	1.03	+1.34						
1	—	26.3	9.08	10.10	10.74	10.43	9.91	9.96	1.33	0.60	+0.73						
2	24.8	—	8.90	9.19	9.65	10.46	9.67	9.96	0.71	0.22	+0.49						
3	23.8	23.6	5.83	5.73	7.24	7.42	7.18	6.18	0	0.37	-0.37						
4	21.2	23.3	0.14	0.59	0.71	0.30	(0.33)	0.36	0	0.14	-0.14						
5	—	—	0	0	0	0	0	0	0	—	—						
									288	306	339	338	321	316	37.2	18.8	+18.4
Общее количество O <sub>2</sub> под 1 дм <sup>2</sup> Total quantity O <sub>2</sub> under 1 dm <sup>2</sup>																	

Наблюдение V Observation V

1-2 августа (August)

Глуб. в м Depth in m	t° воды		O <sub>2</sub>						В склянках in flasks								
	7h	17h	7h	11h50	17h00	22h00	3h00	7h00	A	B	A-B						
0	25.8	27.1	(18.22)	12.19	12.26	12.30	11.31	11.32	4.54	(1.22)	+3.32						
0.5	—	—	10.88	12.20	13.07	12.31	11.20	11.17	2.53	1.22	+1.31						
1	—	27.0	(11.02)	11.96	13.23	12.32	11.18	11.22	2.17	(1.22)	+0.95						
2	25.8	26.8	11.31	11.59	12.64	11.41	11.23	11.31	1.16	1.23	-0.07						
3	25.7	25.5	7.76	7.50	8.93	8.32	8.19	7.48	0.31	0.50	-0.19						
4	20.6	20.7	0.70	0.32	0.31	0.27	0.24	0.49	0.00	0.70	-0.70						
5	—	—	0	0	0	0	0	0	—	—	—						
									363	375	414	384	362	357	54.9	42.6	+12.3
Общее количество O <sub>2</sub> под 1 дм <sup>2</sup> Total quantity O <sub>2</sub> under 1 dm <sup>2</sup>																	

Наблюдение VI Observation VI

4-5 августа (August)

Глуб. в м Depth in m	t° воды		O <sub>2</sub>						В склянках in flasks								
	7h	17h	7h10	11h50	16h50	21h50	3h30	7h00	A	B	A-B						
0	24.8	25.7	9.92	10.84	11.35	11.25	10.29	9.85	2.95	1.41	+1.54						
0.5	—	—	9.93	10.38	11.66	(11.16)	10.08	9.95	3.41	1.41	+2.00						
1	—	—	10.14	10.36	11.34	11.08	10.16	10.00	2.30	1.40	+0.90						
2	24.8	—	10.04	10.17	11.24	10.86	10.32	10.08	1.04	1.14	-0.10						
3	24.8	25.1	9.66	10.17	8.62	8.38	(7.97)	7.52	0.21	0.87	-0.66						
4	20.9	21.0	0.17	0.28	0.33	0.46	0.50	0.51	0.00	0.17	-0.17						
5	—	—	0	0	0	0	0	0	—	—	—						
									349	363	374	364	340	330	54.2	42.9	+11.3
Общее количество O <sub>2</sub> под 1 дм <sup>2</sup> Total quantity O <sub>2</sub> under 1 dm <sup>2</sup>																	

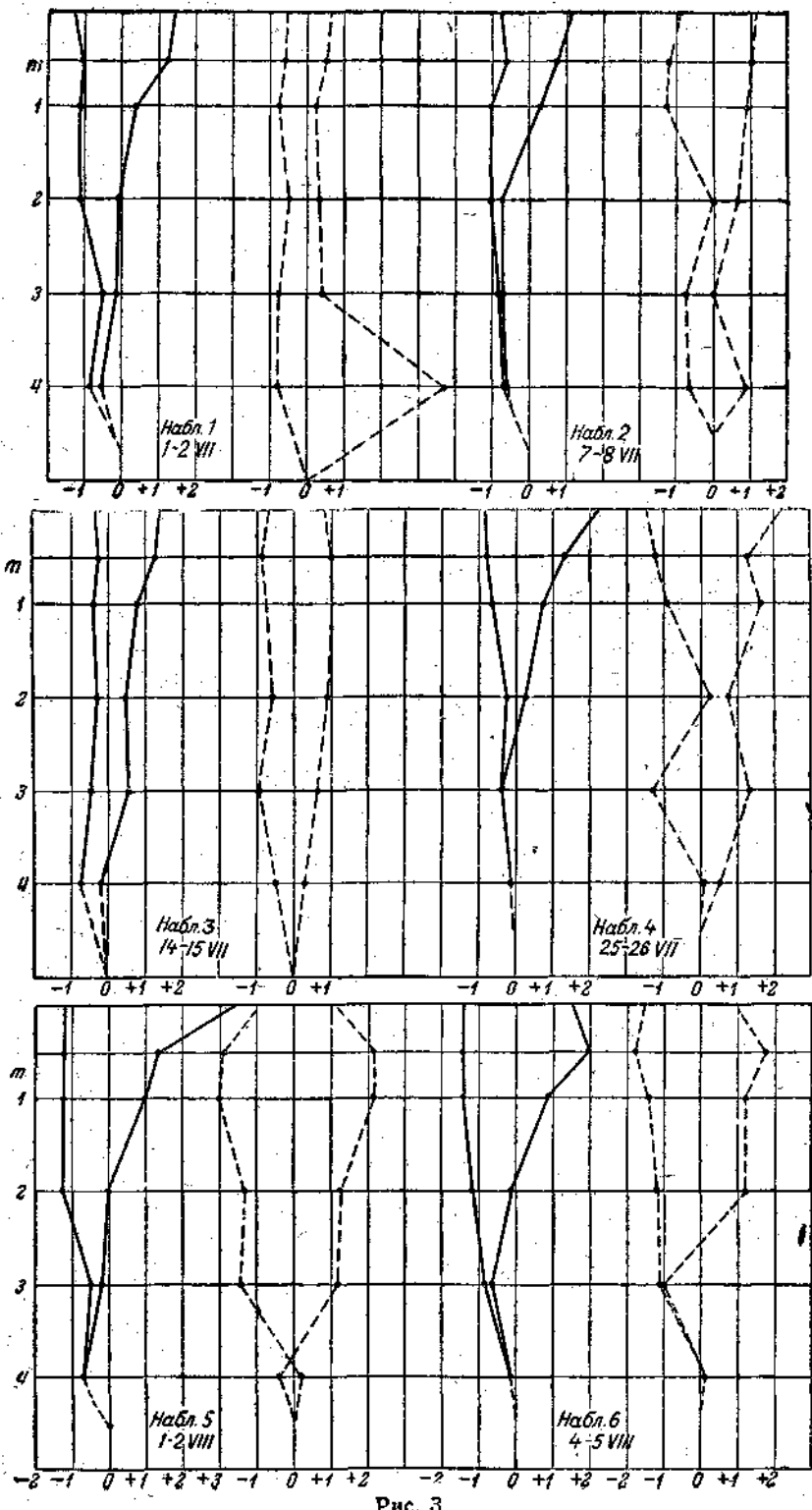


Рис. 3



Рис. 3. Суточные колебания содержания кислорода в Белом озере на разных глубинах в сопоставлении с величиной поглощения и выделения  $O_2$  в установленных на ту же глубину склянках. Для каждой даты наблюдений на правой фигуре изображены результаты определения  $O_2$  непосредственно в воде озера, на левой изменение содержания кислорода за время суточной экспозиции склянок. В первом случае за нуль принято максимальное содержание  $O_2$  (в 17 ч.), влево от нуля отложена разность с содержанием кислорода утром того же дня (7 ч.) и вправо разность с содержанием кислорода утром следующего дня. В левой фигуре за нуль принято содержание кислорода в момент заполнения склянок. Правая кривая — изменение содержания кислорода в светлых, левая в затемненных склянках.

Fig. 3. Diurnal variations in oxygen content in lake Beloit at different depths as compared with the amount of  $O_2$  absorbed and liberated in flasks, placed at the same depths. For each date of observations the results of determination of  $O_2$  in the lake water itself are represented in the right figure. The maximum  $O_2$  content (at 5 p. m.) has been accepted for zero in this case; to the left from zero the difference in  $O_2$  between the content at 5 p. m. and at 7 a. m. of the same day is plotted; to the right — the difference in  $O_2$  between the content at 5 p. m. and at morning of the next day. The variation in oxygen content throughout the 24-hour exposition of flasks is shown in the right hand side figure.  $O_2$  content at the moment of the filling flasks has been accepted for zero. The left curves — variation of  $O_2$  content in clear flasks, the left — in darkened ones.

величины представляют собой средние из двух определений. На протяжении суток производилось 6 наблюдений примерно в следующие часы (астрономическое время): в 7, 12, 17, 22 (начало темноты) и в 3 часа (конец темноты) и 7 часов следующего дня (точное время указано в таблицах). Время, указанное в таблицах, соответствует середине промежутка времени, в течение которого отбирались образцы (обычно 45 мин.). В дальнейшем все величины выражены в мг  $O_2$  под 1  $dm^2$  поверхности.

Утром, одновременно с взятием первой серии проб, в том же месте озера устанавливались на сутки светлые и затемненные склянки с помощью уже описанных нами ранее приспособлений (Винберг и Иванова — 6).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты всех проведенных нами суточных серий наблюдений приведены в табл. I. Все наблюдения были сделаны в относительно ясную погоду без сильных ветров и дождей. Общие метеорологические условия в дни наблюдений охарактеризованы в табл. II.

Таблица II

Table II

Общие метеорологические условия в дни наблюдений ( $t^{\circ}$  воды приведена по двум утренним наблюдениям)

General meteorological conditions in the days of observation

Дата Date	Средняя $t^{\circ}$ воды $t^{\circ}$ of Water	Сила ветра в м/сек. Wind m/sek				Облачность по 10-балльной шкале (Cloudiness)				Примечание
		7h	13h	21h	7h	7h	13h	21h	7h	
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1—2.VII	18,3	3,4	3,9	0	0	2	5	2	3	Гроза 13 ч. и дождь. Дождь 7 ч. 15.VII
7—8.VII	20,5	0	2,3	0	3,3	5	10	10	3	
14—15.VII	26,3	0	3,5	1,7	2,5	2	4	6	6	
25—26.VII	27,5	1,2	2,4	1,4	1,4	9	6	5	4	
1—2.VIII	26,5	4,0	3,3	3,9	2,0	4	0	2	0	
4—5.VIII	22,0	3,1	4,2	0	0	10	0	1	1	

На рис. 3 изображены отклонения содержания кислорода по отдельным слоям в 7 час. утра (начало и конец наблюдений) от количества его в соответствующем слое в 17 час., когда, как будет ясно из дальнейшего, общее количество растворенного в воде кислорода максимально. На том же рисунке приведено графическое изображение изменения содержания кислорода в светлых и затемненных склянках за время суточной экспозиции.

Из сравнения кривых непосредственно виден размах суточных колебаний по отдельным слоям. Оказалось, что во всех содержащих кислород слоях воды (до 4 м) суточные колебания кислорода имеют примерно тот же размах. При этом в поверхностных слоях воды размах суточных колебаний в озере значительно меньше, чем интенсивность фотосинтеза, измеряемая с помощью установленных в соответствующем слое склянок (разность содержания кислорода в светлой и затемненной склянке после суточной экспозиции в озере), в то время

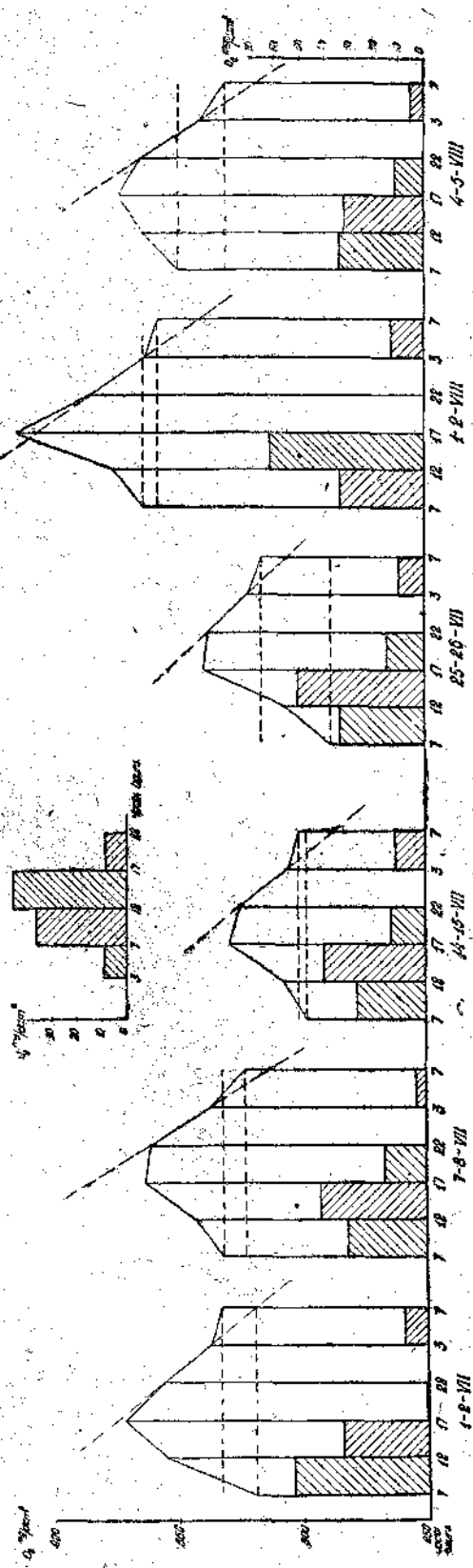


Рис. 4. Количество кислорода в мг под 1 дм<sup>2</sup> поверхности в разное время суток (шкала слева), количество кислорода, выделенное за отдельные периоды суток (шкала справа), вычисленное по формуле  $PO_2^m = \Delta O_2 \cdot m + (O_2^m - O_2^0)$  и средние величины для всех шести наблюдений.

Fig. 4. Amount of oxygen in mg under 1 square dm<sup>2</sup> of surface at different times of the day (A), amount of oxygen liberated in separate periods of the day (B), calculated from the formula:  $PO_2^m = \Delta O_2 \cdot m + (O_2^m - O_2^0)$  and average values of all six observations.

как в более глубоких слоях воды они значительно превосходят их. Этот факт демонстрирует большую роль перемешивания даже при относительно слабом ветре.

В результате усиливающегося времени перемешивания нижняя граница богатых кислородом слоев в некоторых случаях несколько опускается, что и может вызвать резкое увеличение содержания кислорода на глубине 4 м, особенно ясно выраженное I. VII.

В связи с этим у нас возникло опасение, не происходит ли в подобных случаях в пограничном слое, в котором имеет место перемешивание воды, богатой кислородом, с бескислородными слоями, резкого увеличения потребления кислорода вследствие быстрого окисления продуктов анаэробного обмена, накопления которых должно происходить в бескислородных слоях воды. Очевидно, что в том случае, если это явление действительно имеет место, оно наряду с потреблением кислорода на процессы дыхания планктона и отдачей его в атмосферу окажет влияние на общее количество поглощаемого за сутки кислорода.

Для проверки этого предположения нами был осуществлен следующий простой эксперимент. Батометром была взята вода с глубины 5,5 м с исходным содержанием  $O_2 = 0,13$  мг/л и с глубины 9 м совершенно лишенная кислорода. С помощью пипетки, конец которой опускался до дна склянки, 50 см<sup>3</sup> воды с каждой глубины были помещены в 4 склянки, вместимостью около 140 см<sup>3</sup>, предварительно заполненные поверхностной водой Белого озера, содержащей 8,38 мг  $O_2$ . При этом избыток воды вытеснялся. После закупоривания стеклянной пробкой и перемешивания половина склянок была оставлена на сутки в термостате при 22°, а половина использована для определения начального содержания кислорода.

Как оказалось, в результате прибавления бескислородной воды количество поглощенного за сутки кислорода не увеличилось, но и не уменьшилось. Если принять во внимание, что в склянках со смешанной водой исходное количество кислорода сообразно с объемом вытесненной воды было почти на  $\frac{1}{4}$  меньше, то полученные результаты можно рассматривать как доказательство некоторого усиления окисления в результате перемешивания. Понятно, что одного наблюдения недостаточно для понимания этого сложного явления, но во всяком случае результаты его доказывают, что в условиях Белого озера нет столь бурного поглощения кислорода при перемешивании на границе богатых кислородом слоев воды с лишенной кислорода водой мета- и гипоглимниона, как мы первоначально опасались.

Общие количества кислорода под  $dm^2$  поверхности, вычисленные для каждой серии наблюдений, приведены в соответствующих строках табл. I и графически изображены на рис. 4.

Суточные изменения в растворенном кислороде вполне отчетливо и закономерно проявляются в изменении общего количества кислорода, заключенного в столбе воды. Как и следовало ожидать по литературным данным (Г. Верещагин—4, Н. Kurasige—2, R. Wiethan—5 и др.), максимальное количество кислорода в воде приходится на 17 час. Весьма интересно, что в промежутке времени от 3 до 7 часов интенсивность фотосинтеза еще не достаточна для того, чтобы компенсировать убыль кислорода, количество которого в озере за это время продолжает уменьшаться.

Полученные величины позволяют вычислить  $\Delta O_2$  и  $PO_2$  для каждой серии наблюдений. Прежде всего обращает на себя внимание, что вычисленные количества кислорода, потребленного и удаленного за сутки, для всех 6 серий весьма близки и колеблются в пределах от 84 до 108 мг на 1  $dm^2$  поверхности, т. е. наибольшие отклонения от средней не превосходят 12%. В среднем для всех 6 серий наблюдений первичная продукция, выраженная в кислороде, равна 97 мг на 1  $dm^2$ . Колебания  $PO_2$  несколько больше, чем колебания  $O_2$ , но также невелики. Наибольшие отклонения отличаются от средней всего на 15%.

Наш материал слишком малочислен для того, чтобы было возможно обсуждать зависимость величин  $\Delta O_2$  и  $PO_2$  от метеорологических условий (сила ветра, освещенность) и другие возникающие вопросы. Все же, несмотря на незначительность размаха колебаний и малочисленность наших наблюдений, проявляется отчетливая корреляция между величиной  $\Delta O_2$  и разностью начального и конечного количества кислорода ( $O_2^{24} - O_2^0$ ).

Из рис. 5 видно, что между  $\Delta O_2$  и  $(O_2^{24} - O_2^0)$  намечается положительная корреляция. Насколько реальна эта зависимость, существование которой, впрочем, весьма вероятно, могут показать только дальнейшие более обширные наблюдения.

Для нас представляло большой интерес сравнить результаты вычислений со скоростью поглощения и выделения  $O_2$  в устанавливавшихся в озере склянках. Как нам уже приходилось неоднократно описывать, зная содержание кислорода в воде, заключенной в светлую и темную банку до и после суточной экспозиции в озере, можно легко получить «интенсивность фотосинтеза» (А) и «интенсивность дыхания» (В) на данной глубине. Располагая серией измерений величин А и В на разных глубинах,

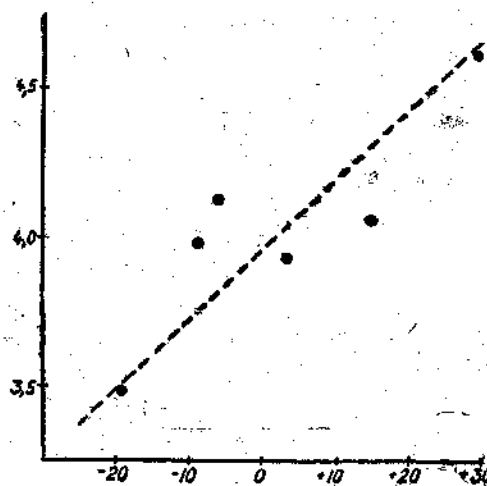


Рис. 5

легко получить и общий результат дыхания и фотосинтеза во всем столбе воды, выраженные в количестве миллиграммов  $O_2$ , выделяемого (продукция планктона —  $\Sigma A$ ) и поглощаемого кислорода (деструкция планктона —  $\Sigma B$ ) за сутки под 1  $dm^2$  поверхности.

Установки, ставившиеся параллельно с наблюдениями над суточными колебаниями  $O_2$ , дали нам возможность определить  $\Sigma A$  и  $\Sigma B$  для каждой серии наблюдений. Эти величины приведены в последней строке таблицы I и в таблице III.

В среднем  $\Sigma A = 43,1$  мг  $O_2$ , а  $\Sigma B = 33,5$  мг в сутки под 1  $dm^2$ .

Таким образом, как  $\Sigma A$ , так и  $\Sigma B$  оказались значительно меньшими величинами, чем  $PO_2$  и  $\Delta O_2^{24}$ . Напомним, что  $\Sigma A$  отражает только величину первичной продукции планктона, в то время, как на величине  $PO_2$  может сказаться и фотосинтетическая деятельность прибрежной и донной флоры. Впрочем, в нашем случае это влияние вряд ли могло сказаться в месте взятия проб, расположенном на глубине 7 м в средней части озера. Нельзя думать, что столь заметная разница целиком объясняется влиянием фотосинтетической деятельности макрофитов и в частности зарослей элодеи. В связи с этим напомним, что многие доводы, приведенные в наших предыдущих сообщениях, заставляют нас признать, что по отношению к Белому озеру применявшийся нами метод, связанный с экспозицией склянок в озере, по отношению к фотосинтезу (первичной продукции) дает недалекие от истинных величины. Таким образом, выяснение причин обнаруженного расхождения остается делом дальнейших исследований.

Еще более значительна разница между  $\Sigma B$  и  $\Delta O_2^{24}$ . И здесь  $\Sigma B$  отражает только процессы деструкции планктона, в то время как на величине  $\Delta O_2^{24}$  сказываются процессы деструкции в прибрежной и донной области, поглощение кислорода при перемешивании с лишенными кислорода слоями и выход кислорода в атмосферу. Несомненно, что выход в атмосферу имеет при этом основное значение. Для количественного измерения его у нас нет необходимых данных. Поэтому мы

не беремся решить, объясняется ли полученное различие между  $\Sigma B$  и  $\Delta O_2^{24}$  только этими причинами или же оно зависит также и от несовершенства применявшихся методов.

Описанные результаты наших наблюдений, основной целью которых было проверить возможность использования суточных колебаний содержания кислорода для расчета величины первичной продукции в водоеме, являются весьма обнадеживающими. Несомненно, что при правильной организации дальнейших исследований, с помощью этого метода могут быть получены ценные данные. Наблюдавшаяся нами относительно малая изменчивость вычисленных величин позволяет думать, что даже единичные наблюдения над суточными колебаниями, проведенные надлежащим образом, могут достаточно ярко отобразить специфические черты данного водоема. Понятно, что получение более надежных данных возможно только при условии такой организации работ, которая бы обеспечила накопление достаточно большого материала, допускающего статистическую обработку.

Таблица III.

Table III.

Сводная таблица результатов  
Summary of results

Наблюдения Observations	$O_2^{24} - O_2^0$	$\Delta O_2^{24}$	$PO_2^{24}$	$\Sigma A$	$\Sigma B$
1	+14	99	85	46	41
2	- 9	95	104	22	37
3	+ 3	93	90	43	18
4	+28	112	84	37	19
5	- 6	102	108	55	43
6	-19	83	102	54	43
Среднее Average	-	97,3	95,5	43,1	33,5

Вполне возможно, без всякого влияния на результат вычислений, существенно сократить количество наблюдений в течение суток по сравнению с производившимися нами. Действительно, если время определения начального содержания  $O_2$  приходится на темное время суток, то необходимы только 3 серии наблюдений в сутки; если же наблюдения производятся несколько дней подряд, что весьма желательно, то на сутки приходится только две серии: после захода и перед восходом солнца. В этом случае существенно упрощаются и вычисления, так как  $O_2^0 = O_2^{24}$ . Приближенные величины можно получить, располагая только двумя ночными сериями определений содержания кислорода. Без существенной погрешности это можно допустить в тех случаях, когда возможно принять, что по истечении суток количество содержащегося в озере кислорода равно начальному.

Имеющиеся в литературе наблюдения над суточными изменениями содержания  $O_2$  в большинстве случаев не могут быть использованы для вычислений, подобных приведенным выше, во-первых, потому, что они обычно ограничены наблюдениями в каком-либо одном произвольно

выбранном слое воды и не дают возможности вычислить общее количество кислорода во всем столбе воды, и во-вторых, потому, что лишь весьма редко подобные материалы включают в себя больше одного определения, сделанного в темное время суток, что, как выяснено выше, необходимо для использования их предложенным способом.

#### ВЫВОДЫ

1. Предложен способ расчета общей величины убыли и обогащения кислородом озера за сутки, основывающейся на суточных колебаниях общего количества кислорода в столбе воды. Это дает возможность количественно характеризовать величину первичной продукции.

2. Проведено шесть серий наблюдений в июле—августе 1936 г. на Белом озере в Косине, показавших практическую применимость предложенного метода расчета.

3. Вычислены величины убыли ( $\Delta O_2^{24}$ ) и обогащения кислородом ( $PO_2$ ) в течение суток Белого озера в Косине. В среднем  $\Delta O_2^{24}=97,3$  и  $PO_2=95,5$  мг  $O_2$  в сутки на 1 дм<sup>2</sup> поверхности, или примерно 2,5 мг  $O_2$  на литр. Показана значительная устойчивость этих величин (наибольшие отклонения — 15%).

4. Проведено сравнение получаемых этим методом величин первичной продукции с величинами первичной продукции планктона, полученными путем регистрации изменений содержания кислорода в установленных в озеро склянках, которые в данном случае оказались примерно в 2 раза меньшими, чем вычисленные по суточным колебаниям  $O_2$ .