

## ХИМИЯ МОРЯ

551.464(26)

### КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ — ПОКАЗАТЕЛЬ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ МОРСКИХ ВОД

М. В. Федосов и В. В. Волковинский

В процессе формирования биологической продуктивности океанических водных масс основное значение имеет первичная продукция океана, которая выражается приростом органического вещества, синтезируемого в океане главным образом фитопланктоном.

#### КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ УЧЕТ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Количественную характеристику первичной продукции в океане и морях можно получить несколькими путями.

Хорошо известен прием количественной оценки интенсивности выделения кислорода в водную толщу в результате фотосинтеза. Другой прием основан на количественном учете потребления минеральных веществ в процессе жизнедеятельности фитопланктона. Сюда относится радиоуглеродный метод оценки первичной продукции.

Возможен и непосредственный учет прироста фитопланктона в период вегетации. Последний прием трудоемкий и применяется редко, преимущественно для контроля косвенных гидрохимических методов.

Первый прием применяется в двух различных вариантах: 1) комплекс химических анализов проводят при выдерживании проб морской воды с фитопланктоном в склянках; 2) в течение всего процесса фотосинтеза анализируют морскую воду, взятую непосредственно из водной толщи.

Количественные характеристики фотосинтеза, получаемые методом «склянок», в большинстве случаев меньше величин, получаемых при втором варианте. Основная причина уменьшения интенсивности фотосинтеза — отсутствие естественной циркуляции морской воды в склянках. Фитопланктон питается диффузионным путем, поэтому требуется постоянное обновление воды около фитопланктонных организмов. Отсутствие правильного снабжения фитопланктона питательными веществами и уменьшение поступления энергии света за счет поглощения его стенками склянки (до 14%) угнетают жизнедеятельность фитопланктона в пробах морской воды, выдерживаемых в склянках (Федосов и Михайловская, 1952). В противоположность этому жизнедеятель-

ность микроорганизмов в пробах воды, помещенных в склянки, не уменьшается, напротив, стенки сосудов могут стимулировать жизнедеятельность микроорганизмов.

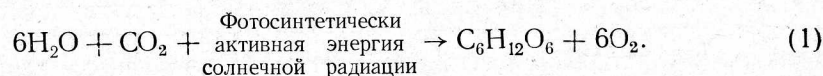
Громадное число наблюдений над содержанием кислорода в воде фотического слоя океана и морей позволяют считать, что наиболее достоверные сведения об интенсивности и результатах фотосинтетической жизнедеятельности фитопланктона в морях и океане можно получить путем тщательного анализа и обобщения первичных данных о содержании кислорода непосредственно в фотическом слое морской воды.

На основании этого мы выбрали указанный вариант метода исследования новообразования растительного органического вещества в морской воде и рассматриваем его особенности, знание которых позволяет получить достоверные результаты.

Суточный цикл фотосинтеза и распада растительного органического вещества является естественной минимальной единицей времени. За сутки можно получить исчерпывающие характеристики этих окислительно-восстановительных процессов.

#### ПЕРЕСЫЩЕНИЕ МОРСКОЙ ВОДЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ФОТОСИНТЕЗА

Пересыщение морской воды растворенным кислородом — в основном результат фотосинтеза. Величина, характеризующая его интенсивность, выражается следующей формулой:



Пересыщение морской воды кислородом может возникать и за счет физического процесса, — быстрого прогрева водной толщи фотического слоя, насыщенной кислородом. Конвективный прогрев верхних слоев фотического слоя воды в весенне-летний период может происходить быстрее, чем эвазия молекулярного кислорода из водной толщи в атмосферу в результате повышения температуры воды данного слоя (Федосов и Михайловская, 1952).

При анализе суточного изменения содержания кислорода необходимо оценивать стабильность водной толщи поверхностного фотического слоя по стабильности солености и температуры на исследуемых горизонтах.

Температура одной и той же толщи поверхностной воды в предутренние часы (минимум содержания кислорода в вегетационный период) обычно ниже, чем в послеполуденные часы (максимум содержания кислорода в вегетационный период). В то же время влияние термического состояния водной толщи на растворимость в ней молекулярного кислорода проявляется в противоположном направлении. Смещение водных слоев внутренними волнами приводит к увеличению солености и уменьшению температуры слоя, так как соленость воды с глубиной увеличивается, а температура верхнего активного слоя — часто уменьшается.

Если гребень внутренней волны поднимет в фотический слой нижележащие воды в предутренние часы, то поправка к фотосинтетическому кислородному минимуму будет с положительным знаком, а если он их поднимет в послеполуденные часы, то поправка к фотосинтетическому кислородному максимуму будет иметь отрицательный знак.

При иной стратификации океанографических показателей состояния морской воды «поправки искажения» могут иметь противоположные знаки.

Исследуя первичную продукцию вод Тихоокеанского бассейна, Иваненков (1961) пришел к выводу, что при стабильности температуры ( $0,2^\circ$ ) и солености ( $0,05\text{‰}$ ) водных слоев горизонтальное перемешивание и адвекция вод не искажают результатов расчетов фотосинтетической продукции кислорода.

Однако прием введения поправок, устраняющих искажающее влияние физических процессов на результаты расчетов фотосинтетической продукции кислорода, позволяет более широко использовать массовые данные рейсовых наблюдений за содержанием кислорода в воде фотического слоя.

В верхних слоях морской воды, пересыщенных в результате фотосинтеза растворенным молекулярным кислородом, может происходить только убыль кислорода за счет эвазии в атмосферу и переноса его в результате турбулентного перемешивания в нижележащие, менее насыщенные водные слои. Эвазия усиливается пропорционально превышению парциального давления кислорода в воде над его парциальным давлением в прилегающем к поверхности моря слое атмосферы. Чтобы исключить влияние этой убыли на количественную оценку интенсивности новообразования растительного вещества в морской воде (первичной продукции), вводят поправку на процесс эвазии кислорода в атмосферу. Величину поправки вычисляют по формуле диффузии:

$$\frac{d\Pi_{вр}}{dVр} = k_{эв}\Pi_{н}, \quad (2)$$

где  $\Pi_{н}$  — начальное пересыщение, выраженное в процентах насыщения морской воды кислородом;

$\Pi_{вр}$  — пересыщение кислородом морской воды в данное время (вр), выраженное в процентах насыщения;

$k_{эв}$  — коэффициент, определяющий скорость эвазии.

Отсюда логарифм соотношения (1) будет:

$$\log \frac{\Pi_{вр}}{\Pi_{н}} = kVр, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент эвазии, определяющий скорость выделения молекулярного кислорода из морской воды через ее толщу в атмосферу. Этот коэффициент изменяется пропорционально изменению температуры воды.

$Vр$  — время (продолжительность) рассматриваемого процесса.

Суточная величина этой поправки невелика и на величину, характеризующую интенсивность фотосинтеза за сутки, практически не влияет.

Если исследовать более длительный период фотосинтетического выделения кислорода, пересыщающего водную толщу, необходимо учитывать влияние эвазии кислорода на содержание его в пересыщенном слое морской воды.

Используя наблюдения над содержанием кислорода в морской воде на 3—4 горизонтах фотического, пересыщенного кислородом слоя моря, где непосредственная эвазия кислорода отсутствует, получают суммарную величину фотосинтетического выделения кислорода, пересыщающего морскую воду, которая значительно больше суточных изменений кислорода за счет эвазии в атмосферу и за счет турбулентного перемешивания.

Эвазия кислорода в атмосферу может возникнуть при быстром снижении атмосферного давления или при быстром повышении темпе-



ратуры поверхностной воды в море. Величина поправки за счет такой эвазии может быть вычислена по таблицам насыщения кислородом морской воды (таблица Трусдейла; Фокса).

При определении величин новообразования органического вещества фитопланктона за месяц или за вегетационный период путем суммирования суточных величин отклонения от истинных величин за счет указанных поправок невелики. При определении величин сразу за месяц или за целый период вегетации в течение данного года возможные отклонения от действительных величин существенно невелики. Дополнительными вычислениями эвазии и турбулентного перемешивания следует находить величины этих отклонений от истинной интенсивности биохимических процессов в морской воде с абсорбцией в ней и потреблением из нее молекулярного кислорода.

В вегетационный сезон, за время от восхода солнца (самого низкого его стояния за сутки) до послеполуденного периода, в фотическом слое морская вода полностью насыщена и даже пересыщена кислородом. В этих условиях кислород из атмосферы в воду не поступает.

#### **СРОКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДА В МОРСКОЙ ВОДЕ И РАСЧЕТЫ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

При наблюдении суточных колебаний величин содержания кислорода в фотическом слое морской воды в вегетационный период фитопланктона особенно важно установить время суток, когда наблюдаются экстремные величины содержания растворимого кислорода.

Определив утреннее минимальное и послеполуденное максимальное количество кислорода и соответствующее этим величинам время суток, следует определить содержание кислорода непосредственно после захода солнца, когда происходит только его потребление. Зная время восхода и захода солнца и данные о кислородном максимуме, о следующих друг за другом примерно через сутки кислородных минимумах и о содержании кислорода после захода солнца, можно дать полную количественную характеристику фотосинтезу — процессу новообразования органического вещества морского фитопланктона.

Определяя абсолютные и относительные величины указанных данных на нескольких горизонтах фотического слоя, можно установить следующие величины:

1. Интенсивность фотосинтеза и валовую, полную величину фотосинтеза (валовой продукции) за сутки.

2. Суточный прирост новообразовавшегося органического вещества.

3. Эффективную продукцию за сутки, т. е. количество новообразовавшегося растительного вещества за сутки, используемого как корм гетеротрофными планктоноядными морскими организмами.

4. Интенсивность биохимического потребления кислорода (т. е. величину БПК во времени) за отдельные периоды суток и в целом за сутки, которая характеризует интенсивность распада органического вещества в морской воде.

Расчеты обосновываются биохимической природой указанных процессов, стехиометрическими соотношениями и экспериментальными данными.

Разница в содержании кислорода между двумя последующими минимумами (из последующего вычесть предыдущий), наблюдающимися перед восходом солнца, соответствует суммарному за сутки увеличению (в начале вегетационного периода) или уменьшению (в конце его) кислорода в фотическом слое.



Если у разницы положительный знак, можно считать, что в процессе фотосинтеза количество новообразовавшегося органического вещества за сутки не было потреблено гетеротрофами, и образовался избыток растительного органического вещества.

Эту величину можно выразить формулой:

$$O_2 - O_2^{24} = \pm \Delta O_2(24h), \quad (4)$$

где  $O_2$  — содержание кислорода в предутренние часы, *мл/л*.  
 $O_2^{24}$  — содержание кислорода, наблюдаемое через 24 ч, *мл/л*.  
 $\pm \Delta O_2(24h)$  — избыток в содержании кислорода в конце суток, *мл/л* (чистая продукция).

Если известно потребление кислорода в исследуемой морской воде за сутки, то сумма абсолютной величины биохимического потребления кислорода и избытка кислорода в конце суток наблюдения будет соответствовать валовой продукции кислорода.

Биохимическое потребление кислорода, растворенного в морской воде, можно определить по убыли в содержании кислорода в воде за время от захода солнца (вернее в первые часы после наступления темноты) до предутреннего минимума содержания кислорода на следующие сутки. Если таких наблюдений нет, то следует определить суточное или пятисуточное потребление кислорода в морской воде в абсолютной темноте (зачерненные склянки). Температура воды в склянках должна быть такая же, как и в исследуемом слое.

При дальнейших расчетах следует иметь в виду, что за светлое время суток интенсивность биохимического потребления кислорода в морской воде на 10—15% меньше БПК в темное время суток (Федосов и Михайловская, 1952, Винберг, 1960).

Исследования суточного хода фотосинтеза и биохимического потребления кислорода (Федосов и Михайловская, 1952) показали, что интенсивность суммарного БПК в природной воде за светлое время суток ниже чем, в ночное время, на одну треть. Такие наблюдения имеются и у Г. Г. Винберга (1960).

Солнечный свет угнетает жизнедеятельность бактерий (Винберг, 1960).

Тогда БПК за время до послеполуденного максимума (0,7 светлого времени суток) равно 31% и величина фотосинтетического восстановления  $CO_2$  с выделением кислорода за светлое время дня (после послеполуденного максимума) достигнет 9,4% от суточной величины фотосинтеза.

Поэтому величина БПК за сутки состоит из двух величин:

$$БПК_{24} = БПК_n + БПК_d \quad (5)$$

$$БПК_n = O_2^3 - O_2^B \text{ и } БПК_d = 0,85 \cdot БПК_n \cdot \frac{n}{24-n} = 0,85(O_2^3 - O_2^B) \frac{n}{24-n} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} БПК_{24} &= (O_2^3 - O_2^B) + 0,85(O_2^3 - O_2^B) \frac{n}{24-n} = \\ &= (O_2^3 - O_2^B) \left( 1 + 0,85 \frac{n}{24-n} \right) = (O_2^3 - O_2^B) \left( \frac{24 - 0,15n}{24-n} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $O_2^3$  — содержание кислорода после захода солнца;  
 $O_2^B$  — содержание кислорода перед восходом солнца;  
 $n$  — продолжительность дня в часах.

БПК<sub>н</sub>, БПК<sub>д</sub> и БПК<sub>24</sub> — потребление кислорода соответственно за ночь, за день и за сутки.

Величина эффективного фотосинтеза за сутки, характеризующая новообразовавшееся органическое вещество фитопланктона, примерно равна сумме 60% от БПК<sub>24</sub> и избыточного накопления новообразовавшегося растительного вещества за сутки:

$$P_{\text{эф}} \approx 60\% \text{ БПК}_{24} \pm \Delta O_2(24h). \quad (8)$$

Величину 60% БПК<sub>24</sub> определяем на основании имеющихся данных о соотношении БПК<sub>д</sub> и БПК<sub>н</sub> [1, 2]. Величина  $P_{\text{эф}}$  более соответствует реальной величине новообразования растительного вещества, которое может быть кормом для морских гетеротрофных организмов. Соотношение между выделенным в морскую воду кислородом в процессе фотосинтеза и его потреблением на все виды окислительных процессов в водной среде ( $P_{O_2}/\text{БПК}_{24}$ ) и величиной наибольшего и конечного суточного прироста содержания кислорода [ $\Delta O_{2\text{max}}/\Delta O_2(24h)$ ] зависят от соответственной интенсивности этих окислительно-восстановительных процессов.

Валовая продукция за сутки может быть выражена следующей формулой:

$$P_{O_2} = \Delta O_2^{\text{min}} + \Delta O_2^{\text{max}} + \text{БПК}_{\text{д}}, \quad (9)$$

где  $\Delta O_2^{\text{min}}$  — прирост кислорода от минимума до максимума  $O_2$ ;

$\Delta O_2^{\text{max}}$  — прирост кислорода от максимума  $O_2$  до конца дня.

В вегетационный период (когда возможен эффективный фотосинтез) первые два члена уравнения всегда больше третьего члена, выражающего величину распада органического вещества в море.

При детальном анализе процессов синтеза и распада органического вещества в морской воде следует учитывать, что слагаемые алгебраической суммы, которая равна валовому количеству фотосинтезированного растительного вещества за сутки, выражают потребление и выделение кислорода отдельно в темное и светлое время суток и соответственно период до и после послеполуденного максимума фотосинтетической интенсивности. Для полярных областей океана за северными и южными полярными кругами темное время суток в вегетационный период соответствует времени нахождения солнца над горизонтом ниже  $10^\circ$ .

Биохимическое потребление кислорода за ночное время (от наступления темноты до предвосходного часа) пропорционально продолжительности ночного времени суток в данных условиях морской воды.

Биохимическое потребление кислорода за светлое время суток (от восхода до захода солнца) на 10—15% меньше интенсивности потребления кислорода в темное время суток (Федосов и Михайловская, 1952). Величина прироста содержания кислорода в морской воде от предутреннего минимума до послеполуденного максимума выражает результирующий остаток от величины выделенного кислорода в процессе фотосинтеза и биохимического потребления кислорода за часы образования кислородного максимума. Массовый эффективный фотосинтез, обуславливающий постепенный прирост пересыщения морской воды кислородом, наблюдается в океанах и морях после наступления равенства.

За 24 ч (считая от предутренних часов) количество кислорода, образованного в процессе фотосинтеза и растворяющегося в морской воде, равно или меньше суммы биохимического потребления кислорода

на все процессы окисления, происходящие за это же время при одних и тех же физико-химических условиях.

Качественно это алгебраическое равенство отражает величину суточного новообразования органического вещества и его распад в биохимических процессах окисления и может быть выражено:

$$-P_{O_2} = \text{БПК}_{24} \pm \Delta O_2(24h). \quad (10)$$

В вегетационный период фитопланктона  $\Delta O_2(24h)$  преимущественно имеет положительный знак. Однако в дни ослабления фотосинтетической деятельности морского фитопланктона величина  $\Delta O_2(24h)$  может равняться нулю или иметь отрицательный знак.

В пределах суток вегетационного периода в первой части дня  $\Delta_{\text{ч}} O_2 > \Delta_{\text{ч}} \text{БПК}$ , в результате чего формируется послеполуденный максимум содержания кислорода, абсорбированного в морской воде. Во второй, послеполуденной части дня  $\Delta_{\text{ч}} + O_2 < \Delta_{\text{ч}} \text{БПК}$  и содержание кислорода в водной толще фотического слоя уменьшается.

Часто известна только величина послеполуденного максимума содержания кислорода в морской воде по отношению к его минимальному содержанию в предутренние часы ( $\Delta O_2 \text{max}$ ), поэтому представляет интерес соотношение величины ( $\Delta O_2 \text{max}$ ) с величинами, характеризующими интенсивность и результаты процесса новообразования растительного вещества в фотическом слое морской воды.

Это соотношение зависит от продолжительности образования послеполуденного максимума содержания кислорода, считая часы от предутреннего минимума его содержания в морской воде, и от продолжительности светлого времени суток. При этом следует отметить, что еще в 1936 г. Бруевич обращал внимание, что послеполуденный максимум содержания кислорода в морской воде (умеренные широты) наступает в период от 12 до 18 ч суток. При этом было установлено, что в среднем отношение времени от предутреннего минимума содержания кислорода до его послеполуденного максимума к продолжительности светлой части суток равно 0,7 (Бруевич, 1936).

От действительного соотношения времени возникновения послеполуденного максимума содержания кислорода в морской воде от его предутреннего минимума к продолжительности светлого времени суток зависит величина коэффициента  $K$ . Вводится  $K$  при расчетах интенсивности фотосинтеза и его результатов за сутки, при расчетах, основанных на величине  $\Delta O_2 \text{max}$ .

Расчетная величина  $\text{max } O_2$  образована массовыми рейсовыми наблюдениями за содержанием кислорода в морской воде фотического слоя:

$$\Delta O_2 \text{max} = \text{max } O_2 \text{ послеполуденный} - \text{min } O_2 \text{ предутренний} \\ \text{в морской воде.} \quad (11)$$

Большой объем гидрохимических материалов, характеризующих содержание растворенного кислорода в водах фотического слоя океана во времени и пространстве, дал возможность использовать эти данные для количественной оценки процесса новообразования органического вещества в приантарктических водах. При этом были приняты во внимание и использованы приведенные выше результаты детального анализа процессов синтеза и распада органического вещества.

На основании этого анализа (как и в прежних работах М. В. Федосова) было обращено внимание на определение интенсивности эффективной первичной продукции органического вещества, которая харак-



теризует величину новообразования растительного вещества — корма морских гетеротрофных организмов. Последние являются объектами морского промысла или в свою очередь пищей промысловых организмов.

Использованные нами методы анализа и расчета величин эффективной первичной продукции органического вещества хорошо согласуются с фактическими данными гидрохимического газового режима в антарктических водах.

### ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ В АНТАРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ

В работе используются многолетние данные, собранные зарубежными и отечественными экспедициями в приантарктических районах океана.

Для получения количественных характеристик интенсивности эффективного фотосинтеза, сроков его начала, конца и продолжительности, а также распределения по площади антарктических вод были проанализированы данные океанографических экспедиций — «Метеор», 1925—1927 гг.; «Дискавери», 1925—1927; «Вильям Скорсби», 1928; наблюдения на морской биостанции на о-ве Южная Георгия в 1930; «Дискавери II», 1930—1939; наблюдения на китобойном судне «Слава-15» в 1949—1950 гг.; данные 1, 2, 3 и 4-ой морских антарктических экспедиций на дизель-электроходе «Обь» в 1955—1960 гг. Обработаны наблюдения за содержанием растворенного кислорода на станциях общим числом 1834, всего более 9000 наблюдений.

Полученные результаты показывают, что в антарктических водах вегетационный период (период эффективного фотосинтеза) начинается в сентябре — октябре и заканчивается в июне — июле.

Акваторию океана вокруг Антарктиды разбиваем на три сектора — атлантический, индоокеанский и тихоокеанский с тремя широтными поясами в каждом. На рис. 1 показаны сроки вегетационного периода в этих областях и их максимумы.

Анализируя данные рис. 1, отмечаем, что максимум эффективного фотосинтеза, сроки его начала и конца последовательно смещаются по циркумполярному течению вод Антарктики (от атлантического до тихоокеанского сектора), запаздывая на 1—2 месяца по сравнению с предыдущим сектором.

Это явление можно объяснить характером циркуляции антарктических вод. Как известно, в антарктических водах существует мощный океанический поток — антарктическое круговое течение, которое, по данным Корта (1962), занимает в общей величине водного баланса океанов от 79 до 96%, оказывая большое влияние на структуру, физические, химические и биологические свойства водных масс трех океанов, прилегающих к Антарктиде.

По Карту перенос воды антарктическим круговым течением через все поперечные сечения пограничных разрезов между секторами равен: из атлантического сектора в индийский ( $20^\circ$  в. д.) —  $215 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сек; из индийского сектора в тихоокеанский ( $150^\circ$  в. д.) —  $201 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сек; из тихоокеанского сектора в атлантический ( $75^\circ$  з. д.) —  $183 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сек.

Вследствие возникающего «дефицита» воды в атлантическом секторе (отток  $215 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сек, а приток  $183 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сек) происходит дополнительный приток прогретых водных масс из более низких широт Атлантического океана. Вероятно, в результате этого интенсивный фотосинтез в атлантическом секторе протекает в более ранние сроки, чем в индийском и тихоокеанских секторах.

Рассматривая влияние солнечной радиации на интенсивность новообразования органического вещества, следует отметить, что годовая продолжительность солнечного освещения в антарктическом районе несколько увеличивается от низких широт к берегам Антарктиды (Морской атлас, 1953). Однако это увеличение незначительно, так как малый угол падения солнечных лучей и значительная облачность на протяжении всего года в этих широтах (Лебедев, 1957) настолько снижают интенсивность освещенности водной толщи фотического слоя,

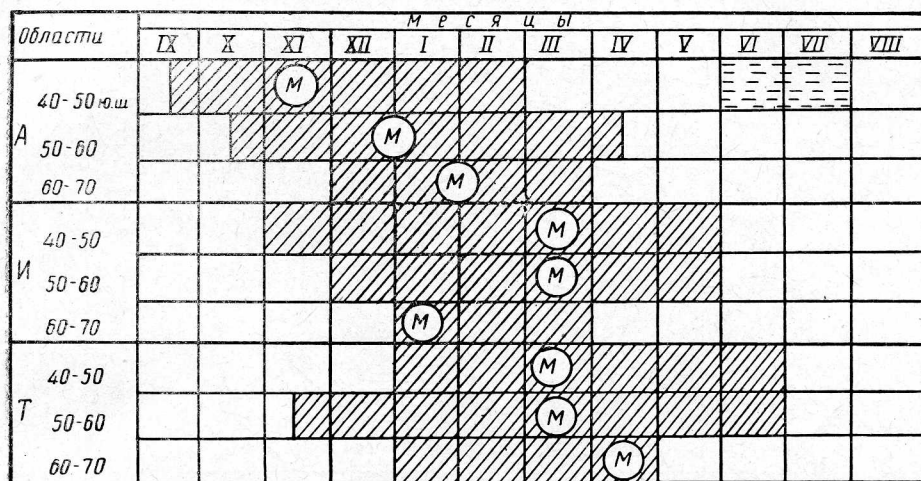


Рис. 1. Продолжительность эффективности фотосинтеза в антарктических водах.

В июне и июле — слабые вспышки фотосинтеза.

А — атлантический сектор; И — индоокеанский, Т — тихоокеанский; М — максимум фотосинтеза.

что условия для фотосинтеза в высоких широтах не благоприятнее, чем в средних и низких. Наибольшее влияние на интенсивность фотосинтеза и ее изменение оказывает термическое состояние самой водной толщи фотического слоя.

Представление о сравнительной интенсивности фотосинтеза в антарктических водах дает рис. 2. За полный вегетационный период она возрастает от высоких широт к средним и низким. Отдельные мощные вспышки фотосинтеза наблюдались в районах, примыкающих к берегам континентов, но в течение всего вегетационного периода преобладающие суммарные величины интенсивности фотосинтеза и, следовательно, интенсивности новообразования органического вещества приходятся на районы 45—55° ю. ш. (рис. 3).

Площади широтных зон всех трех секторов антарктических вод подсчитаны путем планиметрирования и даны в млн. км<sup>2</sup>.

Сектор	70—60°		60—50°		50—40°	
	Южная широта	Южная широта	Южная широта	Южная широта	Южная широта	Южная широта
Атлантический . . . . .	2,61	2,38	6,51	0,25	7,26	1,05
Индooкеанский . . . . .	3,19	3,64	9,25	0	11,30	0,08
Тихooкеанский . . . . .	6,88	0,21	9,61	0	11,64	0,17

Примечание. В каждом широтном поясе первая колонка — площадь открытой воды летом, вторая — площадь, постоянно закрытая льдом или занятая материками.

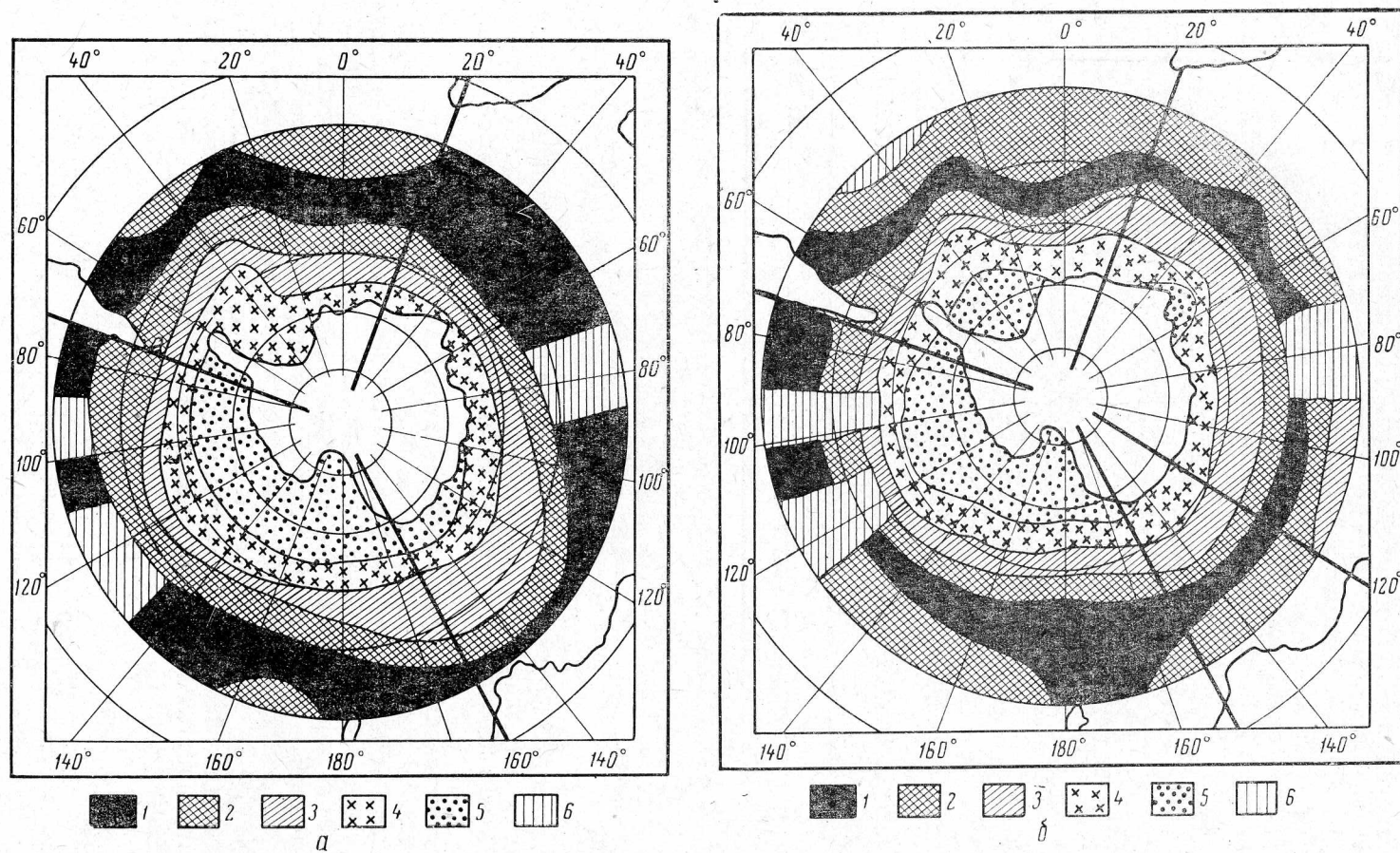


Рис. 2. Карта интенсивности фотосинтеза в антарктических водах. *a* — без поправки, *b* — с поправкой на эвазию растворенного кислорода в атмосферу путем учета повторяемости штормов:  
 1 — наибольшая, 2 — большая, 3 — средняя, 4 — малая, 5 — наименьшая, 6 — недостаточное число наблюдений.



В сумме площадь кольца открытой воды всех антарктических вод между 40 и 70° ю. ш. летом будет равна 68,25 млн. км<sup>2</sup>. Полная площадь без учета льдов и материков — 76,03 млн. км<sup>2</sup>.

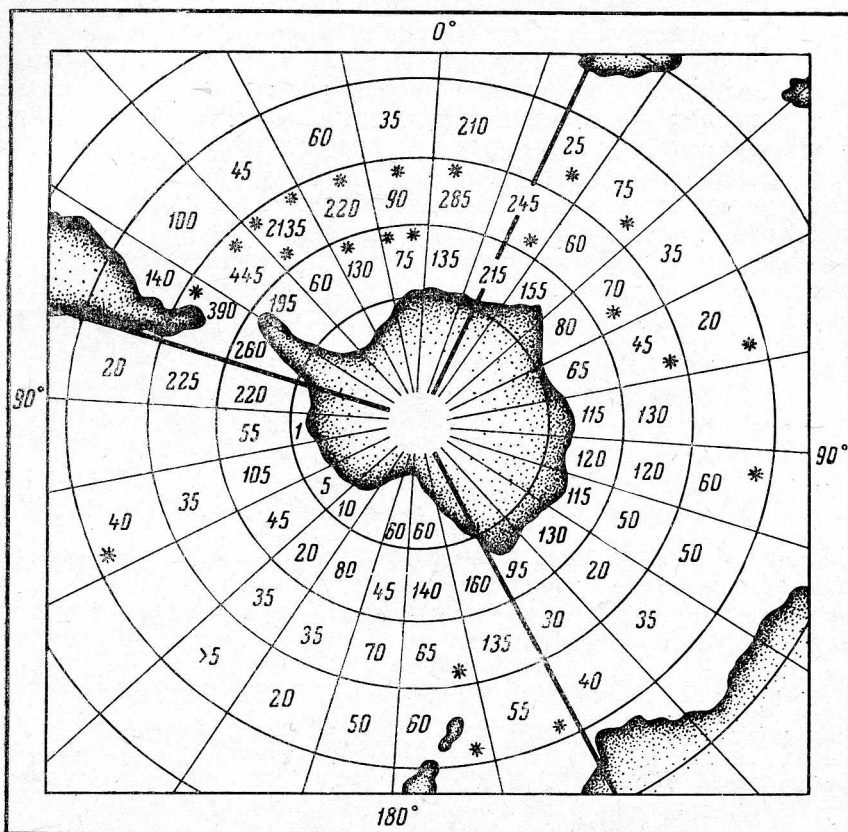


Рис. 3. Степень изученности районов и максимальные величины интенсивности фотосинтеза. Общее число наблюдений более 9000 на 1862 станциях. Цифрами показано число наблюдений; звездочкой — районы максимальных отдельных вспышек фотосинтеза.

Просуммировав число наблюдений по каждому широтному поясу и разделив на площадь открытой воды, мы получили цифры, характеризующие изученность кислородного режима (см. рис. 3).

Сектор	Южная широта					
	70—60°		60—50°		50—40°	
Атлантический . . . . .	970	372	3680	565	590	81
Индоокеанский . . . . .	975	306	655	71	350	31
Тихоокеанский* . . . . .	1005	146	600	62	250	21

Примечание. В каждом широтном поясе первая графа—общее число наблюдений; вторая—число наблюдений на 1 млн. км<sup>2</sup>.

\* Некоторые станции находятся южнее 70° ю. ш.

Наиболее изучен кислородный режим среднего пояса атлантического сектора. Внутренние пояса атлантического и индоокеанского секторов также насыщены наблюдениями, средняя величина — 133 наблюдения на 1 млн. км<sup>2</sup> при современном уровне данных.

Сравнительно мало данных приходится на внешний широтный пояс (50—40° ю. ш.) всех трех океанов.

По суточным изменениям содержания кислорода на соответствующих горизонтах при помощи коэффициентов получены осредненные величины интенсивности новообразования органического вещества в фотическом слое в период вегетации. Эти величины позволяют получить первое представление о количестве новообразованного органического вещества в исследованных водах. По имеющимся в нашем распоряжении ограниченном числе суточных и полусуточных станций с наблюдениями за содержанием кислорода в водной толще можно было получить лишь предварительную оценку интенсивности новообразования органического вещества в антарктических водах.

Для каждого из пяти различных классов сравнительной шкалы интенсивности фотосинтеза за вегетационный период (см. рис. 2), получены соответствующие этим классам величины новообразования органического вещества в  $гС/м^2$ .

Классы	Степень интенсивности
1	наибольшая 650
2	большая 350—650
3	средняя 300—350
4	малая 250—300
5	наименьшая 0—250

Отношение осредненных для широтных зон величин интенсивности новообразования органического вещества в период вегетации к соответствующим площадям чистой воды дает количество ежегодно образующегося в результате фотосинтеза органического вещества в млрд.  $т$  С:

Сектор	Южная широта		
	70—60°	60—50°	50—40°
Атлантический . . . . .	0,63	3,33	4,35
Индийский . . . . .	0,66	2,59	5,29
Тихоокеанский . . . . .	1,16	2,00	2,75

Общая величина новообразующегося растительного вещества в фотическом слое на площади открытой воды в  $68 \cdot 10^6 км^2$  в среднем может быть выражена величиной в 22,75 млрд.  $т$  за годовой вегетационный цикл.

Для восточного берега Южной Америки и пролива Дрейка получены высокие цифры первичной продукции порядка  $600—1000 гС/м^2$  в год и более. У берегов Африки также наблюдается большая интенсивность новообразования органического вещества. Район низкой продуктивности со значениями  $50 гС/м^2$  в год и менее обнаружен во внутреннем широтном поясе тихоокеанского сектора.

В антарктической зоне наибольший слой воды, пересыщенной кислородом, во время фотосинтеза наблюдается в тихоокеанском секторе (до 60—80 м). В то же время этот слой имеет самые низкие суммарные значения выделяемого в процессе фотосинтеза кислорода на единицу объема ( $л/м^3$ ). Это говорит о том, что в силу некоторых причин происходит «размывание» продуктов фотосинтеза в глубину. Это может быть вызвано интенсивным перемешиванием фотического слоя в результате штормов. Наибольшая продолжительность штормов и приходится на значительную часть тихоокеанского сектора Антарктики (Морской атлас, 1953).

Максимум фотосинтеза, наблюдающийся в северных морях примерно на 20—25 м, в антарктических водах находится в большинстве случаев в поверхностных слоях.

Но глубина затухания эффективного фотосинтеза в антарктических водах так же, как и в северных морях, находится примерно на 50 м (кроме тихоокеанского сектора).

Рассматривая изменения в интенсивности новообразования органического вещества во времени и анализируя отношение числа станций со значениями растворенного кислорода больше 100% насыщения к общему числу станций, время с 1925 по 1959 г. можно разделить на периоды:

1) 1925—1929 гг. — большое число станций (52%) со значениями растворенного кислорода выше 100% насыщения;

2) 1930—1939 гг. — у 18% станций отмечено пересыщение кислородом.

3) 1949—1950, 1955—1960 гг. — пересыщение, подобное 1-му периоду, отмечено у 65% станций.

В 1-м (1925—1929) и 3-м (1949—1950, 1955—1960 гг.) периодах были сходные условия синтеза и потребления кислорода. Редкие и незначительные величины пересыщения морских вод кислородом, а следовательно, и слабый фотосинтез в 1930—1939 гг. (во 2-й период) нельзя объяснить погрешностями в наблюдениях, в этот период слабый фотосинтез обусловлен существовавшими тогда океанологическими условиями.

### ВЫВОДЫ

1. Количественную оценку первичной кормовой базы гетеротрофных морских организмов можно дать на основании исследования первичной продуктивности океанических вод.

2. Количественный учет первичной продукции в водах океана проводится различными методами, взаимно контролирующими друг друга, что позволяет получать наиболее достоверные результаты исследований. Наиболее достоверные результаты о новообразовании органического вещества получаются при анализе и обобщении массовых наблюдений за содержанием кислорода в морской воде в естественных условиях.

3. Наблюдаемая величина пересыщения воды растворенным кислородом в фотическом слое океана количественно соответствует находящемуся к этому времени новообразованному органическому веществу фитопланктона.

4. На основании анализа большого числа наблюдений суточных изменений содержания кислорода в морской воде фотического слоя рекомендованы оптимальные сроки наблюдений в море и установлено их значение для достоверной оценки первичной продукции морских вод.

5. Распределение новообразованного органического вещества в приантарктических водах подчинено следующим закономерностям.

Максимум эффективного фотосинтеза, сроки его начала и конца последовательно смещаются по циркумполярному кольцу вод Антарктики по часовой стрелке от атлантического сектора через индоокеанский (через 2 месяца) до тихоокеанского (через 1—2 месяца).

Весьма интенсивный фотосинтез наблюдается у кромки тающих льдов.

Максимум эффективного фотосинтеза, находящийся в северных морях на глубине около 25 м, в антарктических водах находится в основном в поверхностных слоях, а глубина затухания эффективного фотосинтеза так же, как и в северных морях, приходится на глубину около 50 м.

Период с 1930 по 1939 г. (экспедиция Дискавери — II) характери-



зается малым числом станций с незначительными величинами эффективного фотосинтеза в противоположность периодам 1925—1929 и 1949—1960 гг., имеющим один порядок больших значений числа станций с величинами растворенного кислорода выше 100%.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бруевич С. В. Определение продукции органического вещества в море. Сб. «Акад. В. И. Вернадскому к 50-летию научн. и педагогической деятельности». Изд-во АН СССР, 1936.
- Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Изд-во АН СССР, 1960.
- Гидрологические, гидрохимические, геологические и биологические исследования на д/э «Обь», 1955—1956 гг. Гидрометеоздат. Л., 1958.
- Иваненков В. Н. Первичная продукция Берингова моря. Тр. ин-та океанологии, Т. LI, 1961.
- Корт В. Г. Водобмен между океанами. «Океанология», № 4. Изд-во АН СССР, 1962.
- Лебедев В. А. Антарктика. Географгиз, 1957.
- Морской атлас. Т. 2. Изд-во Главного штаба ВМС. 1953.
- Наблюдения на к/с «Слава-15». Тр. ГОИН. Вып. 24 (36). ГМИ, 1954.
- Назаров В. С. Льды антарктических вод. «Океанология», № 6, 1962. Изд-во АН СССР.
- Советская антарктическая экспедиция. Вторая морская экспедиция на д/э «Обь». Тр. ААНИИ. Т. 5. Л., 1959.
- Третья морская экспедиция на д/э «Обь», 1957—1958 гг. Материалы наблюдений. Тр. советской антарктической экспедиции. Т. 22, ААНИИ. Изд-во «Морской транспорт». Л., 1961.
- Тр. советской антарктической экспедиции. Т. 20. 4-й и 5-й рейсы на д/э «Обь». 1958—1960 гг. Научные результаты и материалы наблюдений. Л., 1962.
- Федосов М. В. и Михайловская З. И. Некоторые детали кислородного метода определения продукции органического вещества в водоемах. Доклады ВНИРО. Вып. I. Пищепромиздат, 1952.
- Харвей Х. В. Биохимия и физика моря. Изд-во АН СССР, 1933.
- Discovery Reports vol. I, III, IV, XV, XXI, XXII, XXIV. Cambridge at the University Press. 1941 г.
- Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition «Meteor» 1925—1927. Band III, IX Berlin und Leipzig 1933.