

А.В.Костылева<sup>1</sup>, С.А.Мошаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южное отделение Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Геленджик

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Москва

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСЧЕТОВ  
КАЖУЩЕГОСЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОДУКЦИОННО-ДЕСТРУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ  
(НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ)**

Кажущееся потребление кислорода (*apparent oxygen utilization, AOU*) – это параметр, зависящий от концентрации кислорода *in situ*, температуры и солености воды и показывающий отклонение концентрации растворенного кислорода от 100 %-го насыщения, что, в свою очередь, демонстрирует доминирование в точке измерения процессов деструкции органического вещества (окисление) или продукции (фотосинтез). Цель данной статьи – показать перспективу использования этого параметра в качестве индикатора продукционно-деструкционных процессов на примере черноморских вод. Приведена схема расчета, показана временная и пространственная изменчивость *AOU*. Продемонстрирована синхронность изменения *AOU* и хлорофилла «а» в пространстве и времени.

Простота, дешевизна и высокая скорость определения величин *AOU* дает возможность получения частых и регулярных данных о преобладании продукционных или деструкционных процессов в исследуемой акватории без подключения более дорогостоящих и трудоемких гидробиологических методов, что может быть использовано при мониторинге происходящих в экосистеме процессов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** хлорофилл «а», кажущееся потребление кислорода, продукционно-деструкционные процессы, Черное море

Первичная продукция лежит в основе всей трофической структуры сообщества живых организмов. Все механизмы экосистемы приводятся в движение энергией, поставляемой фотосинтезом. Первичная продукция, которая создается автотрофными растительными организмами посредством фотосинтеза, утилизируется при протекании обратных процессов деструкции органического вещества (ОВ). Деструкция ОВ осуществляется под действием гетеротрофных микроорганизмов и при потреблении ОВ животными. В процессе деструкции ОВ происходит распад крупных органических частиц на более мелкие с дальнейшим переходом ОВ в минеральную форму. Таким образом, в результате продукционно-деструкционных процессов осуществляется круговорот вещества и энергии.

Согласно уравнению фотосинтеза, образование первичной продукции сопровождается выделением кислорода. При обратном процессе деструкции ОВ кислород, напротив, поглощается. Однако концентрация кислорода, измеренная *in situ*, не может быть использована в качестве меры продукционно-деструкционных процессов по причине разной растворимости газа в зависимости от температуры и солености водных масс.

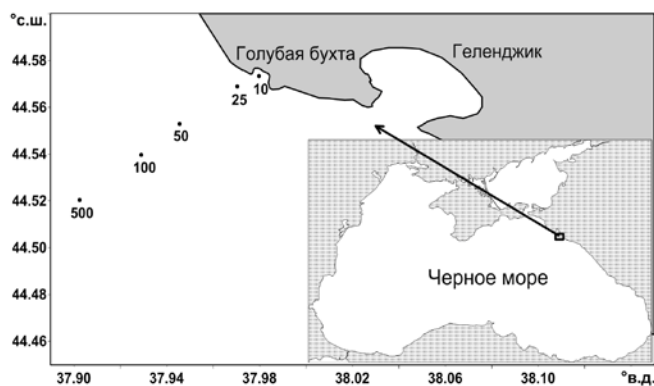
© А.В.Костылева, С.А.Мошаров, 2017

С середины прошлого века для оценки деструкции ОВ (или дыхания) стал применяться такой параметр, как «кажущееся потребление кислорода», обычно обозначаемый  $AOU$  (*apparent oxygen utilization*). Кажущееся потребление кислорода – это разница между концентрацией кислорода в состоянии равновесия с атмосферой при температуре и солености *in situ* и фактической измеренной концентрацией кислорода [1]. Если  $AOU = 0$ , это означает, что содержание кислорода в водной массе такое же, какое было бы на поверхности при тех же температуре и солености. Если  $AOU < 0$ , то содержание кислорода больше, чем в водах, находящихся в равновесии с атмосферой. Подобного рода избыток кислорода связывают с преобладанием продукционных процессов над деструкционными. Когда в водной массе  $AOU > 0$ , то, напротив, деструкционные процессы преобладают над продукционными, в результате чего истощение кислорода протекает быстрее, чем его выделение [2].

Простота, дешевизна и высокая скорость определения величин  $AOU$  дают возможность получения частой и регулярной информации о преобладании продукционных или деструкционных процессов в исследуемой акватории без подключения более дорогостоящих и трудоемких гидробиологических методов. Однако использование  $AOU$  в качестве оценки интенсивности продукционно-деструкционных процессов применялось преимущественно зарубежными исследователями в океанических водах [3 – 8] и заключалось в расчете  $AOU$  в водном столбе. В отечественную практику, за исключением единичных исследований [9, 10], использование  $AOU$  еще прочно не вошло. Цель данной работы – показать перспективы применения  $AOU$  в комплексе с измерением хлорофилла «а» на примере мониторингового исследования прибрежного района северо-восточной части Черного моря.

**Материалы и методы.** Исследования выполнялись в северо-восточной части Черного моря (Голубая бухта, г.Геленджик) в 2012 и 2016 гг. С 4 апреля по 26 ноября 2012 г. изучение сезонной динамики концентрации хлорофилла «а», величин  $AOU$  и ряда гидрохимических параметров (минеральный фосфор, силикаты, нитраты, нитриты и аммонийный азот) проводилось в поверхностном слое воды в точке с глубиной 10 м. 25 августа 2016 г.

исследовалась пространственная изменчивость указанных выше параметров на пяти-мильном разрезе, на станциях с глубинами 10; 25; 50; 100 и 500 м (рис. 1). Пробы воды отбирались с помощью батометров: на станциях с глубинами 50; 100 и 500 м – на четырех горизонтах в пределах слоя воды 0 – 50 м; на станции с глубиной



Р и с . 1 . Пятимильный разрез на траверзе Голубой бухты (г.Геленджик). Цифрами для каждой станции указана глубина.

25 м – на трех горизонтах в слое воды от поверхности до дна; на станции с глубиной 10 м – в поверхностном слое.

Во всех пробах по стандартным методикам [11] определялись гидрохимические параметры: растворенный кислород, минеральный фосфор, силикаты, нитраты, нитриты и аммонийный азот, а также концентрация хлорофилла «а» и доля феофитина, для определения которых использовался стандартный флюориметрический метод [12].

Каждое потребление кислорода определялось как разница между расчетной ( $[O_2]_{sat}$ ) концентрацией кислорода в состоянии равновесия с атмосферой при температуре и солености *in situ* и фактической измеренной концентрацией кислорода ( $[O_2]_{in situ}$ ):

$$AOU = [O_2]_{sat} - [O_2]_{in situ},$$

где  $[O_2]_{sat}$  – концентрация, соответствующая 100 % насыщению воды кислородом и рассчитываемая как:

$$[O_2]_{sat} = \frac{[O_2]_{in situ}}{[O_2]_{\%}} \cdot 100\%.$$

Процентное содержание кислорода в воде ( $[O_2]_{\%}$ ) при известных значениях солености, температуры и концентрации кислорода *in situ* рассчитывается по формуле [13]:

$$[O_2]_{\%} = \frac{[O_2]_{in situ} / 44,65}{e^{a+b}} \cdot 100\%,$$

где  $a = -173,4292 + 249,6339/x + 143,3483 \ln(x) - 21,8492x$ ;  $b = S_{in situ}(-0,033096 + 0,014259x - 0,0017x^2)$ ;  $x = (T_{in situ} + 273,16)/100$ ;  $T_{in situ}$  – температура, °C;  $S_{in situ}$  – соленость, psu.

*AOU* обычно выражается в  $\mu\text{M}$ . Таким образом, расчет *AOU* предполагает, что: (1) все поверхностные водные массы находятся в равновесии с атмосферой (имеют 100 % степень насыщения кислородом) перед погружением на глубину; (2) парциальное давление  $O_2$  атмосферы не изменяется с того времени, как водная масса последний раз была на поверхности; (3) также не изменяются температура и соленость *in situ*. Если *AOU* больше нуля, то принято считать, что в водах преобладают деструкционные процессы, если меньше, то продукционные [2].

**Результаты и обсуждение.** Потребность одноклеточных водорослей в биогенных элементах зачастую не всегда проявляется в прямой зависимости прироста биомассы фитопланктона от концентрации биогенных веществ. Это происходит по причине разрозненности во времени процессов потребления биогенных веществ водорослями и прироста биомассы фитопланктона. Тем не менее, использование *AOU* может быть перспективным для оценки протекающих биологических процессов, поскольку потребление/выделение кислорода происходит одновременно с расщеплением/созданием *ОВ*.

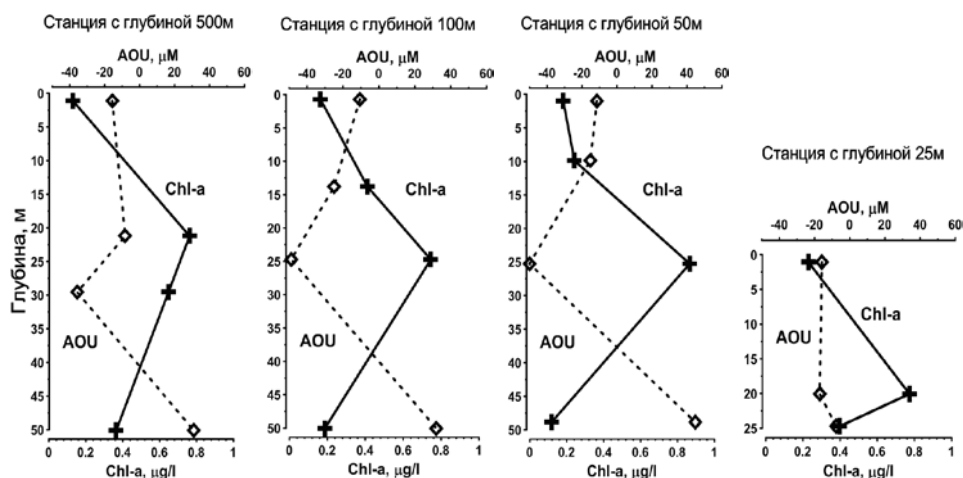
В отличие от океана, специфика черноморских вод предполагает значительно более резкое уменьшение кислорода с глубиной и полный переход к анаэробным условиям на глубине 100 – 250 м. Поэтому распределение *AOU* в аэробном слое Черного моря будет иметь более контрастный характер, чем

в океане. По нашим наблюдениям, значения *AOU* в среднем варьируют от – 80 до 70  $\mu\text{M}$  в верхнем 50 м слое в зависимости от глубины отбора пробы, сезона и удаленности от берега. Минимальные значения *AOU* на поверхности характерны для станции с глубиной 10 м, т.е. для самой близкой к берегу, что можно объяснить поступлением биогенных элементов с берега и продукцией макрофитобентосных сообществ в условиях небольшой глубины.

На рис.2 показано вертикальное распределение величин *AOU* и хлорофилла «а» на исследуемом 5-мильном разрезе 25 августа 2016 г. Концентрация хлорофилла «а» изменялась от 0,12 до 0,86  $\mu\text{g/l}$ . В свою очередь *AOU* изменялся от – 50,06 до 30,97  $\mu\text{M}$ . Связь *AOU* в водном столбе с хлорофиллом «а», на наш взгляд, очень важна. Как видно из рис.2, на станциях с глубинами 25, 50 и 100 м хлорофилл «а» и *AOU* изменялись по глубине синхронно, но в противофазе. Иначе говоря, при увеличении содержания хлорофилла «а» наблюдалось снижение значений *AOU*. Концентрация хлорофилла «а» в определенной степени может служить мерой развития фитопланктонного сообщества, т.е. уровня его продукционной активности.

В слое 20 – 30 м наблюдались минимальные величины *AOU* и максимальные концентрации хлорофилла «а». Значительное увеличение концентрации хлорофилла «а» (основного фитопигмента, обеспечивающего процессы фотосинтеза) могло определять большое количество кислорода в этом слое, выделившегося в процессе фотосинтеза. Именно это, по-видимому, обусловило низкие величины *AOU*. При этом поглощение кислорода в процессе утилизации *ОВ* бактериями и другими планктонными организмами, вероятно, происходило с невысокой скоростью.

Следует отметить, что скорость деструкции *ОВ* может значительно различаться в разные периоды и в разных районах. Это необходимо учитывать при изучении сезонной динамики *AOU* и оценке продукционно-деструкционных процессов в водоемах по величине *AOU*. По скорости разложения *ОВ* принято делить на лабильное, полулабильное и рефракторное [14]. Реактивное или лабильное *ОВ* легко утилизируется бактериями и заново продуцируется в течение нескольких минут или дней. Т.н. полулабильное *ОВ*



Р и с . 2 . Вертикальное распределение *AOU* и хлорофилла «а» 25 августа 2016 г.

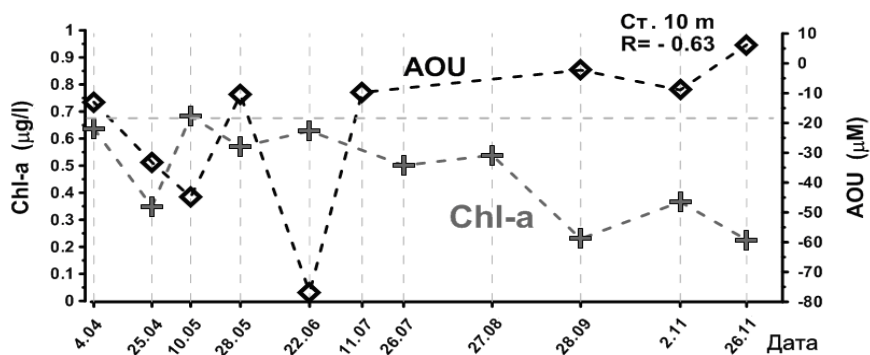


Рис. 3. Сезонная динамика *AOU* и хлорофилла «а» на поверхности, станция с глубиной 10 м, 2012 г.

оборачивается в течение недель или сезонов и играет важную роль в питании бактерий и регенерации биогенных элементов. Устойчивое к бактериальному разложению *OB* – рефракторное *OB* – может сохраняться в воде без изменений от нескольких лет до тысячелетий [14]. Таким образом, накопленное за период весеннего цветения и разлагающееся на протяжении лета и осени полулабильное *OB* может увеличивать *AOU* даже при условии осеннего цветения фитопланктона.

В течение 2012 г. в ходе мониторинговых съемок были проведены параллельные измерения *AOU* и хлорофилла «а» в поверхностном слое водной толщи на станции с глубиной 10 м (рис.3). Хлорофилл «а» в поверхностном горизонте изменялся за этот период от 0,23 до 0,68 µg/l. Максимальные концентрации хлорофилла «а» были отмечены 4 апреля и 10 мая. Затем в период до конца года наблюдалось снижение содержания хлорофилла «а» до 0,2 µg/l. Значения *AOU* варьировали в течение года от – 76,87 до 6,24 µM. Минимальная величина *AOU* (– 76,8 µM) была получена 22 июня. С конца июня по конец ноября происходило небольшое постепенное увеличение *AOU*, и максимальной отметки *AOU* (> 0) достигло 26 ноября. По-видимому, в конце вегетационного сезона при снижении биомассы и продуктивности фитопланктона возрастала доля деструкционных процессов. Следует отметить значительную вариабельность величины *AOU* (изменение почти в 8 раз) в апреле – июне. В большинстве случаев динамика *AOU* и хлорофилла «а» была противофазной – снижение концентрации хлорофилла «а» сопровождалось увеличением *AOU*.

**Закключение.** Проведенные исследования показали, что в определенные периоды года существует обратная связь между величинами параметра *AOU* (отражающего соотношение продукционно-деструкционных процессов) и концентрации хлорофилла «а» (являющегося показателем биомассы фитопланктона). *AOU* служит показателем состояния экосистем, демонстрируя локальное преобладание продукционных или деструкционных процессов в конкретный период. Использование *AOU* может быть перспективным для оценки протекающих биологических процессов, поскольку, в отличие от основных биогенных элементов, потребление/выделение кислорода, согласно уравнению деструкции *OB*, происходит одновременно с расщеплением/созданием *OB*. Синхронные противофазные изменения *AOU* вместе с хло-

рофиллом «а» в водном столбе и наличие определенного сезонного тренда *AOU* демонстрируют целесообразность использования *AOU* не только при изучении пространственных, но и временных изменений в экосистеме, что делает этот параметр особо полезным при мониторинговых наблюдениях. Простота, дешевизна и высокая скорость определения величин *AOU* дают возможность получения частых и регулярных данных о преобладании продукционных или деструкционных процессов в исследуемой акватории без подключения более дорогостоящих и трудоемких гидробиологических методов. Использование *AOU* позволит прогнозировать дальнейшие изменения в экосистеме, что может быть использовано при планировании дополнительных мониторинговых отборов проб с целью более детального изучения экосистемных процессов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00503 мол\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A.* The influence of organisms on the composition of seawater / *The Sea* / M.N. Hill (ed).– NY: Intersc., 1963.– 2.– P.26-77.
2. *Libes S.* Introduction to Marine Biogeochemistry. 2<sup>nd</sup> edition.– San Diego: Academic Press, 2009.– 909 p.
3. *Richey J.E., Devol A.H., Wofsy S.C., Victoria R., Riberio M.N.G.* Biogenic gases and the oxidation and reduction of carbon in Amazon River and floodplain waters // *Limnol. Oceanogr.*– 1988.– 33(4).– P.551-561.
4. *Ogura N.* The relation between dissolved organic carbon and apparent oxygen utilization in the Western North Pacific // *Deep-Sea Res.*– 1970.– 17.– P.221-231.
5. *Tanoue E.* Vertical distribution of dissolved organic carbon in the North Pacific as determined by the high-temperature catalytic oxidation method // *Earth and Planetary Science Letters.*– 1992.– 111(1).– P.201-216.
6. *Guo L., Coleman C.H. Jr., Santschi P.H.* The distribution of colloidal and dissolved organic carbon in the Gulf of Mexico // *Marine Chemistry.*– 1994.– 45.– P.105-119.
7. *Doval M.D., Hansell D.A.* Organic carbon and apparent oxygen utilization in the western South Pacific and the central Indian Oceans // *Marine Chemistry.*– 2000.– 68.– P.249-264.
8. *Yamashita Y., Tanoue E.* Production of bio-refractory fluorescent dissolved organic matter in the ocean interior // *Nature Geoscience.*– 2008.– 1.– P.579-582.
9. *Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Звалинский В.И., Сергеев А.Ф.* Карбонатная система Амурского залива (Японское море) в условиях гипоксии // *Океанология.*– 2011.– 51(2).– С.246-257.
10. *Колтунов А.М., Тищенко П.Я., Звалинский В.И., Чичкин Р.В., Лобанов В.Б., Некрасов Д.А.* Карбонатная система Амурского лимана и прилегающих морских акваторий // *Океанология.*– 2009.– 49(5).– С.694-706.
11. *Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана* / Ред. Сапожников В.В.– М.: Изд-во ВНИРО, 2003.– 202 с.
12. *Holm-Hansen O., Riemann B.* Chlorophyll-a determination: improvements in methodology // *Oikos.*– 1978.– 30.– P.438-447.

13. *Weiss R.F.* The solubility of nitrogen, oxygen, and argon in water and seawater // *Deep-Sea Res.*– 1970.– 17.– P.721-735.
14. *Ducklow H.W., Hansell D.A., Morgan J.A.* Dissolved organic carbon and nitrogen in the Western Black Sea // *Marine Chemistry.*– 2007.– 105.– P.140-150.

Материал поступил в редакцию 05.12.2016 г.  
После доработки 01.03.2017 г.

A.V.Kostyleva, S.A.Mosharov

**PROSPECTS OF USE OF APPARENT OXYGEN UTILIZATION  
CALCULATION FOR ESTIMATION OF PRODUCTION AND DESTRUCTION  
PROCESSES IN WATER ECOSYSTEMS  
(BY EXAMPLE OF THE NORTH-EASTERN BLACK SEA)**

Apparent oxygen utilization (AOU) is a parameter that depends on *in situ* oxygen concentration, water temperature and salinity. It shows difference between the observed dissolved oxygen concentration and the concentration that corresponds to 100% oxygen saturation. In turn, it indicates whether the processes of organic matter destruction (oxidation) or production (photosynthesis) are prevailing in the studied site at the moment. This paper aims to demonstrate the prospect of use of this parameter as a production/destruction indicator by example of the north-eastern Black Sea. The calculation algorithm is provided and temporal and spatial variability of AOU is demonstrated, as well as synchronicity of spatio-temporal changes of AOU and chlorophyll *a*.

Simplicity, low price and high speed of the AOU values determination grant a possibility to gather samples frequently and regularly, acquiring the information on prevalence of production or destruction processes in the studied water area without a need for more expensive and laborious hydrobiological methods, which can give an advantage in monitoring of ecosystem processes.

**KEYWORDS:** chlorophyll *a*, apparent oxygen utilization, production and destruction processes, the Black Sea