

УДК 551.464.38

ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ КИСЛОРОДА, КАЖУЩЕГОСЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА И ХЛОРОФИЛЛА-А В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В 2012 ГОДУ

© 2022 г. А. В. Костылева¹*, С. А. Мошаров¹, О. И. Подымов²¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Южное отделение института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

*e-mail: ventis-ire@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 26.07.2021 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

Представлены результаты анализа изменчивости концентрации растворенного кислорода, хлорофилла-а (хл “а”) и величин кажущегося потребления кислорода (АОУ) на 5-ти мильном разрезе, перпендикулярно береговой линии Голубой бухты (г. Геленджик), в 2012 г. с апреля по ноябрь включительно. Показано, что максимум содержания кислорода в период исследования в большинстве случаев наблюдается в слое термоклина или непосредственно под ним, а минимальные значения АОУ (отрицательные величины, отражающие максимальное фотосинтетическое выделение кислорода) – над термоклином. Максимум содержания хл “а” чаще всего находится на глубине 10–20 м, т.е. весной и летом большей частью располагается в пределах термоклина, а осенью – над ним. Показано, что в верхнем слое воды содержание кислорода в большей степени определяется растворимостью газа в водной среде при данной температуре и солености. Биологические процессы выделения и потребления кислорода (продукции и деструкции органического вещества) оказывают меньшее влияние на его сезонную динамику в верхнем слое. В слое воды под термоклином АОУ может служить показателем деструкционных процессов.

Ключевые слова: Черное море, сезонная динамика, растворенный кислород, хлорофилл-а, сезонный термоклин, продукционно-деструкционные процессы

DOI: 10.31857/S0030157422050100

ВВЕДЕНИЕ

Черное море относится к одному из самых изученных районов Мирового океана. Этим оно обязано уникальностью своей природы. В конце девятнадцатого века стало известно, что глубоководная часть Черного моря не содержит кислород [2]. С тех пор значительная часть гидрохимических исследований была посвящена зоне контакта аэробных и анаэробных вод [16, 17, 21, 33, 40]. Однако исследованию поведения кислорода в аэробной зоне, мощность которой составляет всего лишь 100–200 м, отведено незаслуженно мало внимания. За все время изучения можно насчитать лишь несколько работ, описывающих сезонную динамику растворенного кислорода в деятельном слое Черного моря [3, 4, 15, 28, 39], особенно в постэвтрофикационный период [32]. А ведь именно продукция кислорода одноклеточными водорослями обеспечивает основное биоразнообразие аэробной части черноморских вод, создавая возможность дыхания многочисленных групп аэробных организмов.

Согласно уравнению фотосинтеза, новообразование органического вещества (первичная продукция) сопровождается выделением кислорода. При деструкции органического вещества 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. С середины прошлого века для оценки деструкции органического вещества (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 [34]. 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 потребление кислорода протекает быстрее, чем его выделение [30]. В отечественной практике применялся параметр под названием “дефицит кислорода” (ДК). По сути AOU и ДК – это одно и то же, только с другим знаком [13], что, по-видимому, связано с некорректным переводом изначального определения, данного Редфилдом. Особенности распределения AOU в деятельном слое Черного моря, уделялось внимание еще меньше, чем растворенному кислороду. Немногочисленные статьи с упоминанием AOU рассматривают этот параметр преимущественно в афотическом слое, в частности на аэробно-анаэробном интервале [29, 31, 37].

Концентрация хлорофилла-а (хл “а”) часто характеризует обилие фитопланктона и его потенциальную продукционную способность [11, 35]. К тому же концентрация хл “а”, наравне с насыщением кислорода, выраженным в процентах, выступает одним из ключевых параметров при изучении процессов эвтрофикации [8], например, при расчете индекса трофности вод (TRIX) [18, 28].

Вертикальная термохалинная структура вод Черного моря включает в себя верхний квазиоднородный слой (ВКС), сезонный термоклин, холодный промежуточный слой (ХПС) и постоянный галоклин [5] с медленным увеличением температуры и солёности до дна. Сезонный термоклин – слой, характеризующийся большим вертикальным градиентом температуры [1]. Образование термоклина обусловлено весенним прогревом поверхностных водных масс. Термоклин начинает формироваться в марте–апреле, и сохраняется вплоть до декабря. Верхняя граница термоклина определяется глубиной ВКС, нижняя – верхней границей ХПС [5]. К середине зимы в результате конвективного перемешивания сезонный термоклин исчезает. Развитие фитопланктона и появление кислородного максимума в теплое время года тесно связано с формированием в Черном море сезонного термоклина. Наличие термической стратификации препятствует поступлению биогенных элементов из более глубоких водных слоев, лимитируя развитие одноклеточных водорослей [7, 14].

Таким образом, глубина залегания термоклина, динамика растворенного кислорода, AOU и хл “а” – связанные между собой параметры. Однако комплексное сопоставление сезонной изменчивости этих показателей в эвфотическом слое ранее не проводилось.

Целями проведенного исследования являлось: (1) – изучение сезонной динамики и особенностей вертикального распределения кислорода, AOU и связей этих параметров с содержанием хл “а” как показателем уровня развития фитопланктона, продуцирующего кислород в процессе фотосинтеза; (2) – исследование влияния развития сезонного термоклина на изменчивость величины AOU , концентраций кислорода и хл “а” в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в северо-восточной части Черного моря на траверзе Голубой бухты в районе Геленджика. Отбор проб морской воды проводился 4 апреля, 25 апреля, 10 мая, 28 мая, 22 июня, 11 июля, 26 июля, 27 августа, 28 сентября, 2 ноября и 26 ноября 2012 г. Пятиметровый разрез включал в себя станции на глубинах 10, 25, 50, 80–200 и 500 метров (ст. “10 м”, “25 м”, “50 м”, “100 м”, и “500 м”, соответственно). На станции “10 м” отбор проб проводился только с поверхности, на станции “25 м” – на горизонтах 0, 10 и 25 м; на станции “50 м” – на горизонтах 0, 10, 25, 50 м. На “100 м” и “500 м” пробы отбирались с горизонтов 0, 10, 25, 50, 70 м. Расстояния между станциями составляли 0.5–1 морских мили (рис. 1).

Отбор проб проводили 5-ти литровыми батометрами Нискина комплекса “Rosette”. Определение температуры и солёности выполняли при помощи STD-зонда SBE-19. В каждой пробе было определено содержание растворенного кислорода и хл “а”. Содержание растворенного кислорода определяли методом Винклера [19]. Концентрацию хл “а” в морской воде определяли экстракционным флуориметрическим методом [26] с использованием флуориметра МЕГА-25 (МГУ им. М.В. Ломоносова). Пробы воды (0.5 л) были отфильтрованы через стекловолоконистые фильтры Whatman GF/F при разрежении не более 0.3 атм. Фильтры подсушивали и помещали в 90% водный раствор ацетона для экстракции хл “а”. Пробы выдерживали в темноте 24 часа при температуре 4°C. Флуоресценцию экстрактов определяли до и после подкисления 1 М HCl для коррекции концентрации хлорофилла “а” с учетом феофитина. Расчет концентрации хл “а” и феофитина по данным флуоресценции проводили согласно стандартной методике [23]. Флуориметр был откалиброван с использованием аутентичного хлорофильного стандарта производства Sigma Chemical Co (USA).

Кажущееся потребление кислорода (AOU , μM) определяли как разницу между концентрацией кислорода в состоянии равновесия с атмосферой при температуре и солёности *in situ* ($[O_2]_{\text{sat}}$) и фак-

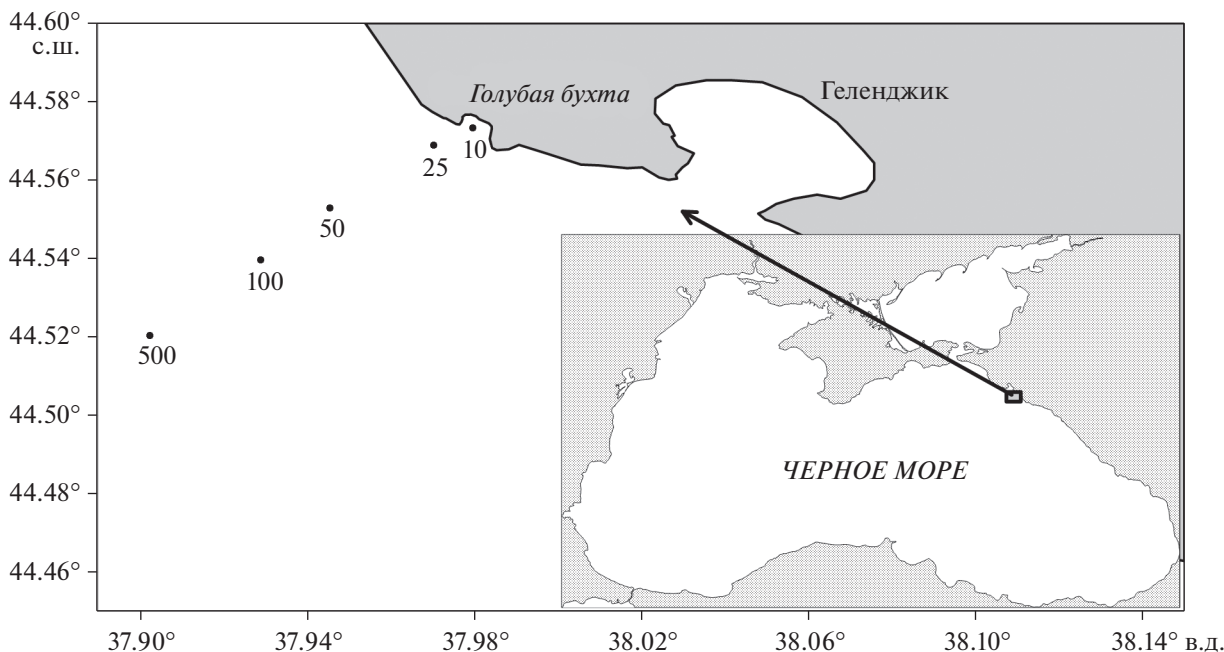


Рис. 1. Станции отбора проб на шельфе и континентальном склоне в районе Голубой бухты, г. Геленджик, 2012 г.

тической измеренной концентрацией кислорода ($[O_2]_{in situ}$) по формуле:

$$AOU = [O_2]_{sat} - [O_2]_{in situ}. \quad (1)$$

Параметр $[O_2]_{sat}$, соответствующий 100%-му насыщению воды кислородом, рассчитывается по формуле:

$$[O_2]_{sat} = \frac{[O_2]_{in situ}}{[O_2]_{\%}} \times 100\%. \quad (2)$$

Процентное содержание кислорода в воде ($[O_2]_{\%}$), при известных значениях солёности, температуры и концентрации кислорода *in situ* рассчитывается по формуле [38]:

$$[O_2]_{\%} = \frac{[O_2]_{in situ} / 44.65}{e^{a+b}} \times 100\%, \quad (3)$$

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 ($^{\circ}C$),

$S_{in situ}$ — солёность.

Границы термоклина были определены по [5]: верхняя граница сезонного термоклина соответствует годовому циклу изменчивости толщины ВКС. Глубина ВКС была определена по резкому изменению вертикальных профилей температуры и солёности [27]. Принято считать, что нижняя граница термоклина соответствует верхней границе ХПС и соответствует изотерме

$8^{\circ}C$ [5]. Однако в результате климатических изменений, тенденция потепления ХПС ($\sim 0.05^{\circ}C/год$) более чем вдвое превысила тенденцию в предыдущем десятилетии. Температура ХПС стала приближаться к температуре более глубоких водных масс ($\sim 9^{\circ}C$), что приводит к постепенному исчезновению ХПС [36]. Тем не менее 2012 год был аномально холодным, вследствие чего за нижнюю границу термоклина был принят слой воды с температурой, равной $8^{\circ}C$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена сезонная динамика температуры (а), кислорода (б), АОУ (в) и хл “а” (г), в 50 м слое водной толщи на станции с глубиной 50 м с 4 апреля по 26 ноября 2012 г. Станция с глубиной 50 м была выбрана в качестве примера, отражающего типичное поведение исследуемых параметров на разрезе.

Распределение температуры. На распределение температуры на разрезе значительно повлияла экстремально холодная зима 2011–2012 гг. Четвертого апреля на станциях с глубинами 50, 100 и 500 м наблюдался равномерно перемешанный слой со средней температурой порядка $7.4^{\circ}C$ (рис. 2а). В районе исследования ВКС начал формироваться в начале апреля, и, с некоторыми колебаниями, увеличивался по толщине вплоть до ноября. Среднегодовая толщина ВКС по всем исследуемым станциям составила 16.5 м. Минимальная толщина ВКС (1–3 м) наблюдалась 4 апреля, максимальная (34 м) в конце ноября. Выраженный

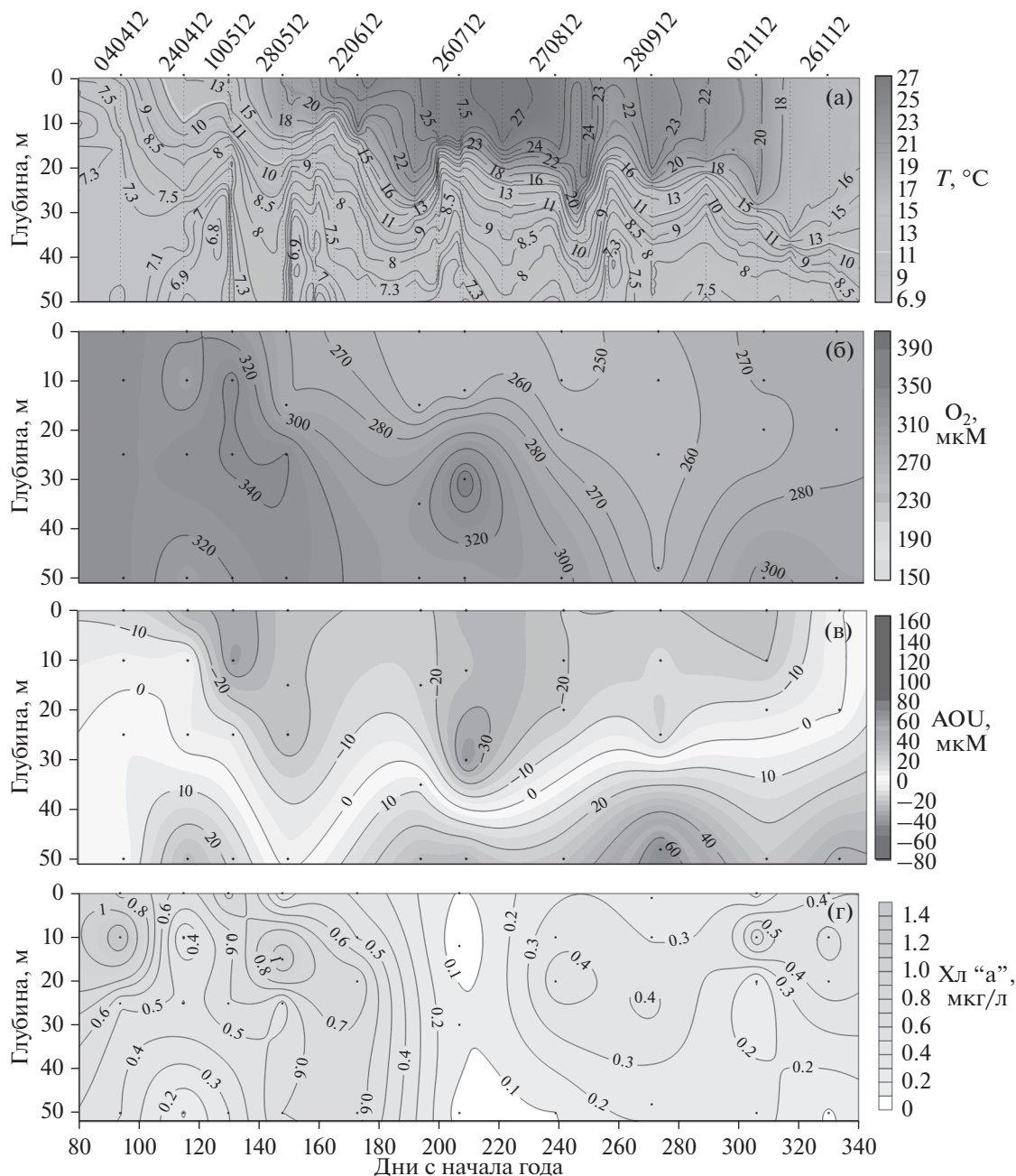


Рис. 2. Сезонная динамика температуры (а), концентрации кислорода (б), АОУ (в) и концентрации хлорофилла “а” (г) в 50 м слое водной толщи на станции с глубиной 50 м в период с 4 апреля по 26 ноября 2012 г.

термоклин появился в конце апреля и просуществовал до конца всего периода наблюдений. Из-за холодной зимы толщина термоклина в 2012 году была небольшой, в среднем около 15 метров. Минимальная температура в верхних 50 м за исследуемый период составила 6.75°C (10 мая, глубина 50 м, станция с глубиной 500 м), максимальная — 27.23°C (26 июля, поверхность, станция с глубиной 500 м). Четко проявляется область повышенных температур в июне—августе, распространяю-

щаяся в мелководной зоне практически до дна, а на глубоководных участках — до ~ 25 м.

Распределение растворенного кислорода и АОУ

Концентрация кислорода в течение года варьировала в верхнем 50 м слое от 240 до $351 \mu\text{M}$ при среднем значении на разрезе $290 \mu\text{M}$ (рис. 2б). Изменение содержания растворенного кислорода в течение года имело следующие особенности. Вес-

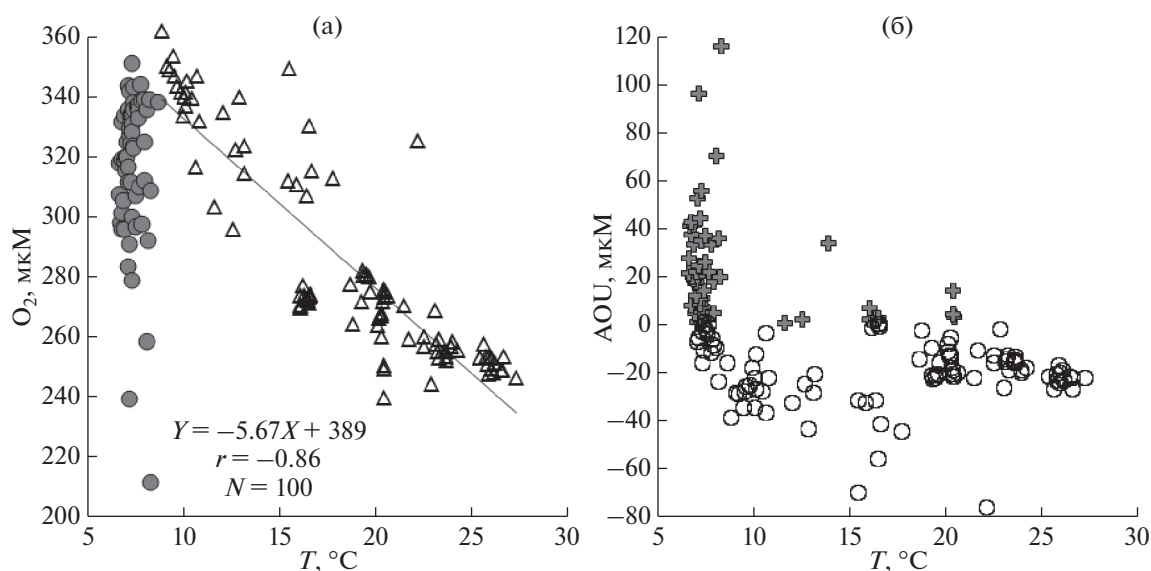


Рис. 3. Зависимость концентрации кислорода (а) и величины АОУ (б) от температуры воды в верхнем 50-метровом слое водной толщи на разрезе в период с 4 апреля по 26 ноября 2012 г.: темные кружки – диапазон температуры воды $6.6-8.5^{\circ}\text{C}$, светлые треугольники – диапазон температуры воды $8.8-27.2^{\circ}\text{C}$, темные крестики – положительные значения АОУ, светлые кружки – отрицательные значения АОУ. Приведена линия регрессии для точек в диапазоне температур $8.8-27.2^{\circ}\text{C}$.

ной до середины мая наблюдалась высокая концентрация кислорода (более $320 \mu\text{M}$) во всем верхнем 50-метровом слое. В летний период в слое 0–30 м содержание кислорода было ниже $260 \mu\text{M}$, но сохранялось на высоком уровне ($\sim 316 \mu\text{M}$) в слое 30–70 м (рис. 26). Осенью концентрация кислорода в верхнем 20-метровом слое незначительно повышалась, достигая $270 \mu\text{M}$ к концу ноября.

Как известно, растворимость газов в значительной степени зависит от температуры. Поэтому, увеличение концентрации кислорода в воде с июля по ноябрь связано, по-видимому, с остыванием поверхностных вод, которое способствует повышению растворимости кислорода. Максимум содержания кислорода наблюдался в апреле, когда температура верхнего слоя воды была минимальной для исследуемого периода. При этом обратная зависимость концентрации кислорода от температуры в верхнем 30-метровом слое водной толщи проявлялась на всех станциях с апреля по ноябрь в диапазоне температур от 8.5°C до 27°C ($r = -0.86$, $n = 100$) (рис. 3а). При более низких температурах ($6.6-8.5^{\circ}\text{C}$), которые наблюдались в апреле во всей толще, а в последующие сезоны – под слоем термоклина (на глубинах более 25–50 м) концентрация кислорода практически не зависела от температуры (рис. 3а).

Сезонная динамика АОУ представлена на рисунке 2в. Величина АОУ в течение года менялась от (-76.9) (22 июня на станции “10 м” на поверхности) до $69.6 \mu\text{M}$ (28 сентября на станции “50 м” на горизонте 50 м). Нижняя граница зоны отри-

цательных значений АОУ, по-видимому, отражающих фотосинтетическое выделение кислорода, варьировала от 10 до 50 м в период с 4 апреля по 26 ноября 2012 г. В основном, отрицательные значения АОУ наблюдались в слое 0–30 м. Более низкие значения в этом слое наблюдались в апреле и ноябре, наименьшая величина – 26 июля, и совпадала с максимальной температурой в слое. В этот период (26 июля) средняя для верхнего 30 м слоя величина АОУ достигала минимальных значений для станций с глубинами 25, 50, 100 и 500 м и составляла соответственно -34.9 , -18.4 , -14.0 , $-14.2 \mu\text{M}$. В течение ноября значения АОУ снизились до минимальных величин во всем анализируемом слое водной толщи.

Величины АОУ варьировали значительно: от 150 до $-16 \mu\text{M}$ при температуре воды в диапазоне $6.6-8.5^{\circ}\text{C}$ и от -76.9 до $13 \mu\text{M}$ в температурном диапазоне $8.5-27.2^{\circ}\text{C}$ (рис. 3б). При этом корреляционная зависимость величин АОУ от температуры воды отсутствовала. Следует отметить, что минимальные величины АОУ и максимальные концентрации кислорода в воде в течение всего года наблюдались на ст. “10 м”, наиболее близкой к берегу. Основная часть положительных значений АОУ была отмечена при температуре воды менее 8.3°C . В ноябре положительные значения АОУ наблюдались во всей толще воды и при более высокой температуре, что может быть связано с влиянием разложения полулабильного органического вещества [24, 41], накопленного в эвфотическом слое за период вегетации.

Распределение хлорофилл “а”

На всем разрезе в течение года в верхнем 50-метровом слое концентрация хл “а” изменялась в пределах от 0.01 до 1.39 мкг/л (рис. 2г). Самые высокие значения хл “а” были отмечены в начале апреля и конце июня. Четвертого апреля на станции “50 м” концентрация хл “а” на горизонте 10 м достигла своей максимальной годовой величины и составила 1.39 мкг/л. При этом содержание хл “а” увеличивалось по направлению от удаленных от берега станций к прибрежным. Снижение содержания хл “а” по сравнению с началом месяца наблюдалось 25 апреля, и максимальное содержание хл “а” на разрезе не превышало 0.60 мкг/л, а минимум составил 0.01 мкг/л. В период формирования термоклина с начала мая по конец июня происходило увеличение содержания хл “а” в верхнем 50 м слое. Значительная концентрация хл “а” была отмечена 28 мая (до 1.20 мкг/л). Шестого июля в районе Голубой бухты произошло наводнение с масштабным поверхностным стоком [12]. Однако, несмотря на значительный вынос биогенных элементов, который мог стимулировать существенную продукционную активность фитопланктона и увеличение его биомассы, увеличение содержания хл “а” в этом районе в последующие дни не наблюдалось. Наоборот, произошло уменьшение содержания хл “а” сразу после наводнения. Содержание хл “а” 26 июля в верхнем 50 м слое на станциях “50 м”, “100 м” и “500 м” не поднималось выше 0.10 мкг/л. Только на ближних к берегу станциях (т.е. тех, которые наибольшее время были подвержены аномально мощному для этого сезона речному выносу) были обнаружены высокие значения хл “а” (0.50 мкг/л на поверхности и 0.92 мкг/л в придонном слое). Постепенное увеличение концентрации хл “а” происходило с конца сентября по конец ноября. Максимальная величина хл “а” была отмечена 2 ноября на горизонте 20 м на станции “500 м” (0.76 мкг/л). Таким образом, сезонная динамика хл “а” носила “волнообразный” характер, заключающийся в чередовании периодов с низким и высоким его содержанием.

Самые высокие концентрации хл “а” от весны и до конца лета наблюдались на прибрежных станциях (станции “10 м” и “25 м”). Однако тенденция изменилась в осенний период: концентрация хл “а”, напротив, возросла на удаленных от берега станциях “100 м” и “500 м”. По-видимому, это связано с осенним перемешиванием водных масс, что приводит к подъему вод, богатых биогенными элементами, которые в свою очередь стимулируют развитие одноклеточных водорослей и, соответственно, рост их биомассы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности сезонной динамики и вертикального распределения растворенного кислорода, АОУ и хл “а”

Умеренно низкая (отрицательная) величина АОУ при максимальной концентрации хл “а” 4 апреля позволяет сделать предположение, что в этот период наблюдался этап деградации “цветения” фитопланктона, при котором развитие сообщества фитопланктона переходит из стационарной в терминальную фазу (фаза угасания). Когда отмирание старых клеток начинает превосходить образование новых, синтез кислорода сокращается, а количество хл “а”, взвешенного и растворенного органического углерода еще по-прежнему велико [22, 25]. В таком случае может наблюдаться рост АОУ, поскольку деструкция органического вещества начинает протекать более интенсивно, чем продукция. Через две недели (25 апреля) концентрация хл “а” также снизилась. В мае–июне за повышением величин АОУ последовало существенное увеличение концентрации хл “а” в верхнем слое (рис. 2). В такой период количество новых образующихся клеток значительно превышает количество отмирающих, а, значит, выделившийся кислород в меньшей степени расходуется на окисление органического вещества. По мере увеличения биомассы увеличивается количество как взвешенного, так и растворенного органического вещества. Взвешенное вещество накапливается за счет живых и неуспевших осесть мертвых клеток, растворенное — как за счет прижизненного естественного выделения органического вещества клетками фитопланктона, так и в результате лизиса мертвых клеток. Возрастание массы органического вещества в воде увеличивает расходование кислорода на окисление.

Постепенное увеличение АОУ с июля по ноябрь может указывать на расходование кислорода в течение позднелетнего и осеннего периода. Потребление кислорода может происходить в результате разложения полулабильного органического вещества [24, 41], синтезированного в весенне-летний период фотосинтетической активности.

Распределение АОУ по глубине характеризуется формированием положительных, либо отрицательных экстремумов, образно выражаясь, — “ядер” положительных или отрицательных величин (рис. 2в). “Ядра” максимальных величин АОУ наблюдаются в большинстве случаев на глубине около 10 м на станциях с глубинами 50, 100 и 500 м, что может быть разницей между поверхностным слоем с высокой первичной продукцией и слоем максимума хл “а”, где может наблюдаться вторичный максимум продукции [6, 7, 9]. Максимальные величины АОУ, полученные на придон-

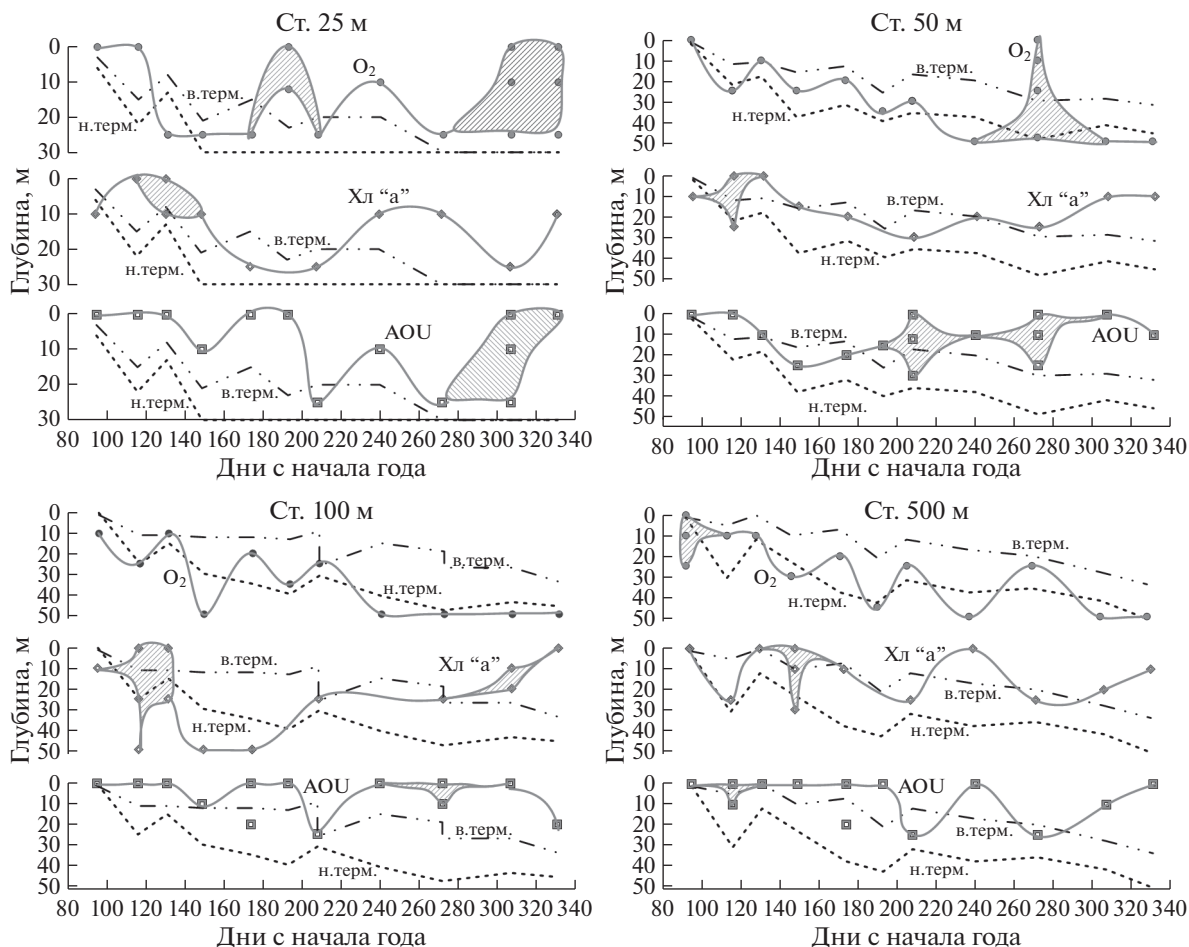


Рис. 4. Сезонные изменения глубин максимальных концентраций кислорода и хл-“а” и минимальной величины АОУ на станциях с глубинами 25, 50, 100 и 500 м. Глубина нижней границы термоклина (н. терм.) показана штриховой линией, глубина верхней границы термоклина (в. терм.) – штрихпунктирной с двумя точками. Заштрихованные объекты обозначают области, на которых было более одного горизонта с практически одинаковыми значениями, близкими к экстремальному.

ных горизонтах, на станции с глубиной 25 м могут отражать процессы деструкции мертвого органического вещества (детрита), оседающего на дно.

Чтобы дать оценку особенностям вертикального распределения кислорода, АОУ и хл “а” относительно положения сезонного термоклина, из полученных данных были выбраны максимальные величины концентраций хл “а” и кислорода, а также – минимальные для АОУ для каждой экспедиции и для каждой станции в течение года. Также были определены границы залегания термоклина. Эти значения представлены на рис. 4. Рисунок 4 демонстрирует, что минимальные величины АОУ (отрицательные значения, отражающие максимальное фотосинтетическое выделение кислорода) большей частью наблюдались над термоклином, преимущественно на поверхности. Согласно исследованиям вертикального распределения первичной продукции, для Черного моря характерно наличие подповерхностного максимума на глубине 5–10 м, что предположительно

связано с оптимальной для фотосинтеза освещенностью в этих слоях [6]. Важно отметить, что при этом глубина хлорофилльного максимума чаще всего находится ниже горизонта максимума первичной продукции, в слое 10–25 м [6, 7, 20]. Рисунок 4 также довольно четко демонстрирует наличие глубинных хлорофилльных максимумов (ГХМ) [10]. Считается, что в Черном море положение и интенсивность ГХМ может зависеть от глубины зимней конвекции и от освещенности (эффекта самозатемнения в частности) [35]. На станции с глубиной 100 и 500 м ГХМ наблюдался 25 апреля, 28 мая, 22 июня (преимущественно на глубине 50 м). На станции с глубиной 50 м в этот период ГХМ не было. Как уже было отмечено, во время и после формирования термоклина, максимум кислорода образуется чаще всего в термоклине или непосредственно под ним, что связано с понижением температуры и, как следствие, с большей растворимостью газа. Таким образом, максимум кислорода характерен

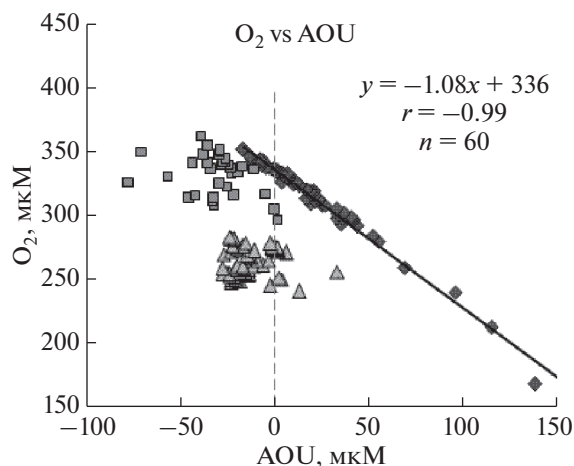


Рис. 5. Зависимость концентрации кислорода в воде от величины АОУ. Ромбы – глубины более 25 м (4 апреля–10 мая) и глубины более 50 м для остальных дат. Квадраты – поверхность (4 апреля), слой 0–10 м (25 апреля–10 мая) и слой 10–25 м (28 мая–26 июля). Треугольники – слой 0–10 м (28 мая–26 июля) и слой 0–25 м (27 августа–26 ноября).

для слоев 10–30 м в период с апреля по май включительно и 20–50 м – с июня по ноябрь.

Сравнение величин концентрации кислорода и АОУ

Концентрация кислорода в верхнем слое моря зависит не только от растворимости кислорода в воде, но и от интенсивности биологических процессов, связанных с потреблением (микробное разложение органического вещества) и выделением кислорода (первичная продукция). Преобладание биологического потребления кислорода выражается в положительных величинах АОУ, а доминирующее влияние фотосинтеза – в отрицательных значениях АОУ. Очевидно, что изменение интенсивности этих биологических процессов определяет вариабельность величин АОУ, что должно оказывать влияние на общую концентрацию кислорода в воде на соответствующих горизонтах.

Мы проанализировали сопряженность изменений концентрации кислорода и величин АОУ (рис. 5). Весь массив данных определенно можно разделить на три группы. Первая группа данных (точки в виде ромбов на рис. 5) характеризует пробы из водных слоев ниже термоклина (с глубин более 25 м для весеннего периода 4 апреля–10 мая и для глубин более 50 м для остальных дат). Как видно из рисунка, для этих вод наблюдается сильная обратная связь концентрации кислорода в воде с величиной АОУ ($r = -0.99$, $n = 60$). Увеличение положительных значений АОУ при уменьшении концентрации кислорода обусловлено, по-видимому, возрастанием деструктивных процессов (микробиологического окисле-

ния) в этом слое водной толщи, куда поступает оседающее органическое вещество из верхнего продукционного слоя. При этом очевидно, что в этой дисфотической зоне фотосинтетическое выделение кислорода происходит не столь интенсивно, поэтому наблюдается столь ярко выраженная корреляция.

Вторая обособленная группа точек (квадраты) на рис. 5 расположена в зоне отрицательных значений АОУ и высоких концентраций кислорода. При этом связь этих параметров была достаточно слабой, хотя тенденция увеличения концентрации кислорода с уменьшением отрицательных значений АОУ прослеживается. Величина отрицательных значений АОУ с большой долей вероятности может быть объяснена интенсивностью фотосинтетических процессов фитопланктона, связанных с выделением кислорода. Таким образом, при ускорении продукционных процессов увеличивается выделение кислорода, что отражается на величине отрицательных значений АОУ и на концентрации кислорода в воде в соответствующей точке водной толщи. Эти точки характеризуют пробы из верхнего слоя водной толщи в весенне-летний период (поверхность 4 апреля, верхний 10 м слой 25 апреля–10 мая, подповерхностный слой 10–25 м 28 мая–26 июля) что представляет собой пространственно-временной оптимум для фотосинтетической активности фитопланктона.

Третья группа точек на рис. 5 (треугольники) обозначает пробы из верхнего 10 м слоя воды в весенне-летний период (28 мая–26 июля) и верхнего 25 м слоя в летне-осенний период (27 августа–26 ноября). Эти периоды характеризуются сезонным снижением активности фитопланктона. В этих пробах значения АОУ были отрицательными, но небольшими по модулю и в узком диапазоне, что, по-видимому, отражает более низкую фотосинтетическую активность фитопланктона (и более низкое выделение кислорода), чем в предыдущей группе точек. Точки третьей группы образуют на рис. 5 плотное скопление, что отражает низкую вариабельность значений как АОУ, так и концентрации кислорода, т.е. определенное постоянство условий потребления и выделения кислорода в летне-осенний период.

Сравнение величин АОУ и концентрации хлорофилла “а”

Если рассматривать отрицательную величину АОУ как показатель фотосинтетического выделения кислорода, т.е. продукционной активности фитопланктона, то необходимо проанализировать связь этих величин с показателем обилия одноклеточных водорослей – концентрацией хл “а”. Хл “а” – это пигмент фитопланктона, непосредственно участвующий в процессе фотосинтеза,

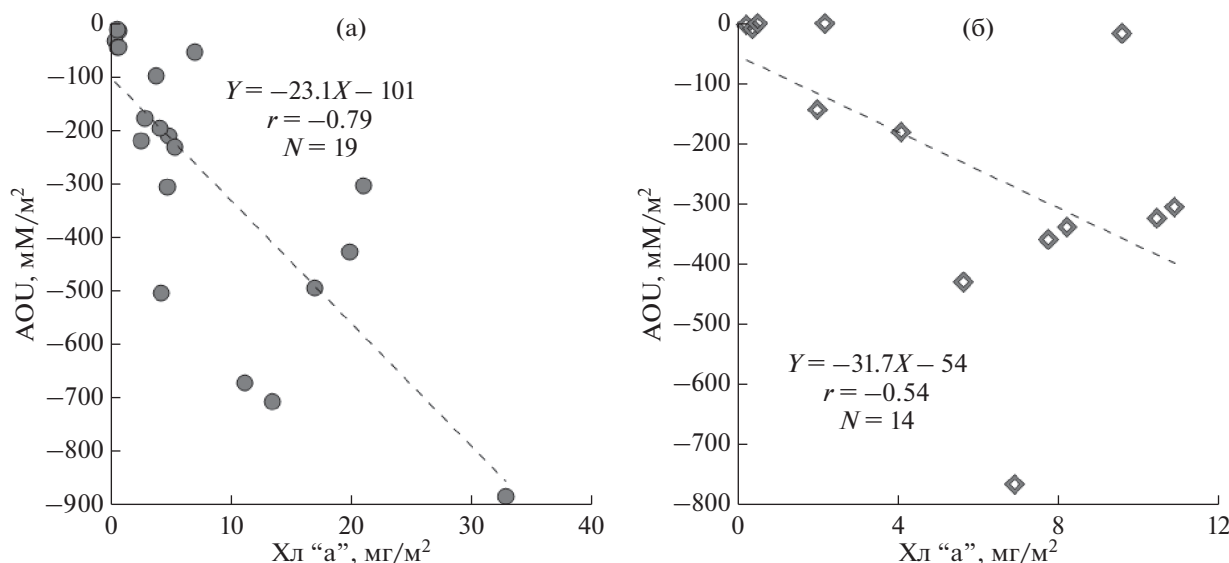


Рис. 6. Зависимость интегральной величины АОУ от интегрального содержания хлорофилла "а" в верхнем слое водной толщи в весенний (а) и осенний (б) периоды.

при котором происходит выделение кислорода. Как известно, количественные характеристики фотосинтетической активности водорослей (ассимиляция углерода и выделение кислорода) зависят, главным образом, от интенсивности света, концентрации хл "а" и содержания основных биогенных элементов.

Следует отметить, что сравнение величины АОУ и концентрации хл "а" в соответствующих пробах некорректно, т.к. они отражают процессы разных временных масштабов. Если отрицательная величина АОУ характеризует интенсивность фотосинтетического выделения кислорода для достаточно короткого периода, предшествующего моменту измерений, то концентрация хл "а", измеренная в пробе воды, характеризует результат более длительного периода формирования биомассы фитопланктона. При этом в процессе такого формирования клетки фитопланктона могут претерпевать значительные вертикальные перемещения. Поэтому наиболее корректно сравнивать значения данных параметров, интегрированных для верхней толщи воды. Для сравнительного анализа мы интегрировали по глубине отрицательные значения АОУ и соответствующие значения концентраций хл "а" для каждой станции.

В весенний период (4 апреля–28 мая), когда фотосинтетическая активность фитопланктона максимальна, интегральная величина АОУ существенно коррелирует ($r = -0.79$, $n = 19$) с суммарным содержанием хл "а" в верхнем слое водной толщи (рис. 6а). В летний период (22 июня–28 августа), при меньшей активности фитопланктона, корреляция между параметрами отсутствовала. Отсутствие корреляции между АОУ и хл "а" мо-

жет быть объяснено обилием полулабильного органического вещества, накопленного во время весеннего цветения [24, 41], деструкция которого существенно влияет на величину АОУ. В осенний период (28 сентября–26 ноября) проявилась связь между АОУ и суммарным содержанием хл "а", но она была значительно слабее ($r = -0.54$, $n = 14$), чем весной (рис. 6б).

Значительное отклонение точек от линии регрессии для весеннего периода (рис. 6а) возможно объясняется снижением интегральной фотосинтетической активности фитопланктона в ранневесенний период в начале апреля (нижние точки), либо наоборот существенным ее увеличением в начале мая (верхние точки) по сравнению с общим трендом соотношения между интегральной концентрацией хл "а" и эффектом его активности, выражаемой через величину АОУ. Аналогично и для осеннего периода (рис. 6б) отклонения точек от линии регрессии возможно объясняется увеличением интегральной активности фитопланктона в конце сентября на мористой станции с глубиной 500 м (верхняя отклоняющаяся точка) относительно других точек со сходными величинами интегральной концентрации хл "а" и соответственно значительным уменьшением активности фитопланктона практически до нуля в конце ноября при достаточно высоких концентрациях хл "а". Очевидно, что при сходном уровне интегрального содержания хлорофилла, отражающего обилие фитопланктона, фотосинтетическая активность (а, следовательно, и величина АОУ) значительно варьирует в разных районах на протяжении сезона, что обусловлено варьированием значений основных факторов, определяющих первичную продуктивность (содержание биогенных элемен-

тов, уровень освещенности, физиологическое состояние и видовой состав фитопланктона).

ВЫВОДЫ

В результате исследований динамики распределения кислорода, АОУ и хл “а” относительно сезонного термоклина в северо-восточной части Черного моря в 2012 г. установлена взаимосвязь между этими параметрами. Показано, что в слоях под термоклином концентрации кислорода обратно пропорциональны положительным величинам АОУ, что может отражать связь АОУ с деструкционными процессами в этих слоях, связанными с потреблением кислорода. Взаимосвязь интегрированных величин хл “а” и интегрированных отрицательных значений АОУ может отражать зависимость АОУ от продукционных процессов, в значительной степени определяющих насыщение вод кислородом. Более точная оценка вклада биологических процессов (продукционных и деструкционных) в изменчивость величин АОУ может быть получена при параллельных измерениях АОУ, первичной продукции и бактериальной деструкции.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № 0128-2021-0007), при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00459).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов Е.А., Полонский А.Б., Станичный С.В.* Параметризация вертикального профиля температуры в сезонном термоклине Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 3. С. 21–29.
2. *Андрусов Н.И.* Предварительный отчет об участии в Черноморской глубоководной экспедиции 1890 г. // *Изв. Русского географ. общ.* 1890. Т. 26. № 5. С. 398–409.
3. *Арашкевич Е.Г., Луппова Н.Е., Никишина А.Б. и др.* Судовой экологический мониторинг в шельфовой зоне Черного моря: оценка современного состояния пелагической экосистемы // *Океанология*. 2015. Т. 6. № 55. С. 964–971.
4. *Арашкевич Е.Г., Луппова Н.Е., Подымов О.И. и др.* Экологический мониторинг пелагического сообщества // *Некоторые результаты комплексной прибрежной экспедиции “Черное море – 2017” на МНИС “Ашамба”*. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2018. С. 44–66.
5. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 239 с.
6. *Ведерников В.И.* Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в Черном море в весенний и летний периоды // *Изменчивость экосистемы Черного моря: Естественные и антропогенные факторы*. М.: Наука, 1991. С. 128–147.
7. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла в различных сезонных глубоководных районах Черного моря // *Океанология*. 1997. Т. 33. № 2. С. 414–423.
8. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. М.: Наука, 2002. С. 212–234.
9. *Ведерников В.И., Коновалов Б.В., Кобленц-Мишке О.И.* Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в Черном море осенью 1978 г. // *Экосистемы пелагиали Черного моря*. М.: Наука, 1980. С. 66–84.
10. *Ведерников В.И., Коновалов Б.В., Кобленц-Мишке О.И.* Сезонные изменения пигментов фитопланктона в прибрежных водах северо-восточной части Черного моря // *Сезонные изменения черноморского планктона*. М.: Наука, 1983. С. 66–84.
11. *Востоков С.В., Лисицын Б.Е., Коновалов Б.В. и др.* Мезомасштабная изменчивость концентраций хлорофилла-а, взвешенного органического вещества и спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона в поверхностном слое северо-восточной части Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. М.: Наука, 2002. С. 235–247.
12. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др.* О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // *Изв. РАН. Физ. атм. осф. и океана*. 2013. Т. 49. № 6. С. 717–732.
13. *Иванов А.* Введение в океанографию. М.: Мир, 1978. 574 с.
14. *Кубряков А.А., Белокопытов В.Н., Зацепин А.Г. и др.* Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35. № 5. С. 449–468.
15. *Полонский А.Б., Котолупова А.А.* Долгопериодная изменчивость растворенного кислорода и температуры верхнего слоя вод Черного моря // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 1. С. 22–32.
16. *Поляков С.Г.* Изучение зоны сосуществования кислорода и сероводорода: гидрохимические аспекты // *Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря*. М.: Наука, 1989. С. 23–37.
17. *Розанов А.Г.* Окислительно-восстановительная стратификация воды Черного моря // *Океанология*. 1995. Т. 35. № 4. С. 544–549.
18. *Романова Н.Д., Часовников В.К., Арашкевич Е.Г.* Оценка состояния экосистемы шельфово-склоновой зоны северо-восточной части Черного моря на основе индекса трофности (TRIX) // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 120–124.
19. *Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана.* Под ред. Сапожникова В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
20. *Сорокин Ю.И.* Черное море: Природа, ресурсы. М.: Наука, 1982. 218 с.
21. *Стунжас П.А., Якушев Е.В.* О тонкой гидрохимической структуре редокс зоны в Черном море по результатам измерений открытым датчиком кислорода и по батометрическим данным // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 5. С. 672–684.

22. Хайлов К.М. Экологический метаболизм в море. Киев: Наукова Думка, 1971. 252 с.
23. Arar E.G., Collins G.B. U.S. Environmental Protection Agency method 445.0 In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence, revision 1.2 // Cincinnati, Ohio, U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development. 1997. P. 1–22.
24. Cauwet G., Deliat G., Krastev A. et al. Seasonal DOC accumulation in the Black Sea: a regional explanation for a general mechanism // Marine Chemistry. 2002. № 79. P. 193–205.
25. Chen W., Wangersky P.J. Production of dissolved organic carbon in phytoplankton cultures as measured by high-temperature catalytic oxidation and ultraviolet photo-oxidation methods // Journal of Plankton Research. 1996. V. 18. № 7. P. 1201–1211.
26. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll-a determination: improvements in methodology // Oikos. 1978. V. 30. P. 438–447.
27. Kara A.B., Helber R.W., Boyer T.P. et al. Mixed layer depth in the Aegean, Marmara, Black and Azov Seas: part I: general features // Journal of Marine Systems. 2009. V. 78. P. S169–S180.
28. Kapranov S.V., Kovrigina N.P., Troshchenko O.A. et al. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 // Cont. Shelf Res. 2020. V. 206. 104185.
29. Konovalov S.K., Murray J.W. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995) // Journal of Marine Systems. 2001. V. 31. P. 217–243.
30. Libes S. Introduction to Marine Biogeochemistry. 2nd edition. San Diego: Academic Press, 2009. 909 p.
31. Margolin A.R., Gonnelli M., Hansell D.A. et al. Black Sea dissolved organic matter dynamics: Insights from optical analyses // Limnol. Oceanogr. 2018.
32. Mikaelyan A.S., Zatsepin A.G., Chasovnikov V.K. Long-term changes in nutrient supply of phytoplankton growth in the Black Sea // Journal of Marine Systems. 2013. V. 117–118. P. 53–64.
33. Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Solovyev V.A. et al. The short timescale variability of the oxygen inventory in the NE Black Sea slope water // Ocean Sci. 2018. V. 14. P. 1567–1579.
34. Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A. The influence of organisms on the com-position of seawater // NY: Intersc., 1963. V. 2. P. 26–77.
35. Ricour F., Capet A., D’Ortenzio F. et al. Dynamics of the deep chlorophyll maximum in the Black Sea as depicted by BGC-Argo floats // Biogeosciences. 2021. V. 18. № 2. P. 755–774.
36. Stanev E.V., Peneva E., Chitirkova B. Climate Change and Regional Ocean Water Mass Disappearance: Case of the Black Sea. // Journal of Geophysical Research. Oceans. 2019: V. 124. № 7. P. 4803–4819.
37. Tuğrul S., Murray J.W., Friederich G.E. et al. Spatial and temporal variability in the chemical properties of the oxic and suboxic layers of the Black Sea // Journal of Marine Systems. 2001. V. 135. P. 29–43.
38. Weiss R.F. The solubility of nitrogen, oxygen, and argon in water and seawater // Deep Sea Research. 1970. V. 17. P. 721–735.
39. Yakushev E.V., Arkhipkin V.S., Antipova E.A. et al. Seasonal and interannual variability of hydrology and nutrients in the Northeastern Black Sea // Chemistry and Ecology. 2007. V. 23. № 1. P. 29–41.
40. Yakushev E.V., Newton A. Introduction: Redox Interfaces in Marine Waters // Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces: Observation and Modeling. The Handbook of Environmental Chemistry. Heidelberg: Springer, 2013. V. 22. P. 1–12.
41. Yamashita Y., Tanoue E. Production of bio-refractory fluorescent dissolved organic matter in the ocean interior // Nature Geoscience. 2008. V. 1. P. 579–582.

Studies of Seasonal Variability of Oxygen, Apparent Oxygen Utilization and Chlorophyll-A in the Northeastern Part of the Black Sea in 2012

A. V. Kostyleva^{a, #}, S. A. Mosharov^a, O. I. Podymov^b

^aShirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia

^bSouthern branch of Shirshov Institute of Oceanology, Gelendzhik, Russia

[#]e-mail: ventis-ire@yandex.ru

This paper deals with seasonal dynamics of concentrations of dissolved oxygen, chlorophyll-a (Chl “a”) and apparent oxygen utilization (AOU). The data were collected on a 5-mile transect perpendicular to the coastline of the Golubaya Bay (Gelendzhik, NE Black Sea) in 2012 from April to November inclusive. It is shown that the maximum oxygen content during the study period in most cases is observed in the thermocline layer or directly below it, and the minimum values of AOU (negative values reflecting the maximum photosynthetic oxygen release) are above the thermocline. The maximum content of Chl “a” is most often located at a depth of 10–20 m, i.e. in spring and summer it is mostly located within the thermocline, and in autumn – above it. It is shown that the oxygen content in the upper water layer is largely determined by the solubility of the gas in the sea water at a given temperature and salinity. Biological processes of oxygen release and consumption (production and destruction of organic matter) have less influence on its seasonal dynamics in the upper layer. In the water layer under the thermocline, AOU can serve as an indicator of destruction processes.

Keywords: Black Sea, seasonal dynamics, oxygen, chlorophyll-a, apparent oxygen utilization, seasonal thermocline, production and destruction processes