АНАЛИЗ СОСТАВА ФИТОПЛАНКТОННЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ АКВАТОРИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ ВБЛИЗИ ПОЛУОСТРОВА КРЫМ

Н.А. Андреева, Е.А. Гребнева

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: andreeva.54@list.ru

Проведены предварительные исследования культивируемых микроводорослей фитопланктона в образцах воды, отобранных в ходе четырёх экспедиций на океанографических станциях прибрежной акватории северо-западной и северо-восточной части Чёрного моря в различные сезоны 2019–2020 гг. Установлены некоторые особенности развития альгологической компоненты в условиях изменяющихся океанологических характеристик среды. В весенний период выявлен наиболее активный рост диатомовых водорослей на участке от Балаклавы до акватории Большой Севастопольской бухты.

Ключевые слова: экспедиции, Чёрное море, микроводоросли, фитопланктон, изменяющиеся океанологические характеристики.

Поступила в редакцию: 28.09.2020. После доработки: 05.11.2020.

Введение. Интенсивность развития фитопланктона в значительной мере определяет экологию морской среды. Кроме того, он является важнейшим звеном питания морских организмов. В фитопланктоне Черного моря насчитывается 746 видов и разновидностей водорослей, относящихся к семи отделам: диатомовым, пиропитовым, золотистым, зеленым, синезеленым, желтозеленым и эвгленовым [1]. В настоящее время по более полным предварительным подсчетам известно около 1000 видов фитопланктонных организмов [2].

Качественный состав и количество фитопланктона изменяются в зависимости от сезона и года [3]. В сезонном цикле развития фитопланктона прибрежных вод Черного моря наблюдается, как правило, два основных, наиболее продуктивных, максимума: зимне-весенний и осенний [4]. Они связаны с вегетацией диатомовых водорослей [5], которые преобладают в основном зимой.

Обилие биогенных элементов, принесенных в прибрежную зону Черного моря реками и разнесенных течениями, создает там условия для хорошего развития неритического фитопланктона. Особенно благоприятны условия в северо-западной части моря, куда поступает

почти три четверти речных вод. С удалением от берега фитопланктон становится беднее и в количественном, и в качественном отношении. Негативным изменениям, связанным с повышением уровня эвтрофикации, в первую очередь, подвержен фитопланктон шельфовой зоны моря, в том числе бухт. Проявлением эвтрофирования считается увеличение числа видов водорослей [6]. Именно поэтому сведения о состоянии фитопланктона в прибрежных водах Черного моря представляют определенный интерес.

Значительное влияние на развитие популяций водорослей кроме наличия в среде различных органических веществ, оказывают также температура, солёность и освещенность [7].

Температура является экологическим фактором, влияющим на географическое распространение и зональное распределение микроводорослей фитопланктона, а также на скорость и характер протекания их жизненных процессов.

Не меньшее значение для жизнедеятельности водорослей имеет и кислотность среды. Устойчивость различных таксонов к изменениям pH столь же различна, как и к изменениям температуры. Как показали исследования, морской

фитопланктон чувствителен к pH, причем различные популяции фитопланктона по-разному реагируют на изменения данного параметра [8]. В морских водах pH обычно составляет 8,1–8,4 и является достаточно устойчивым в связи с буферностью среды, содержащей большое количество карбонатов [9]. Изменения pH относительно среднего уровня прибрежных морских вод оказывает существенное влияние на темпы роста некоторых фитопланктонных видов. Так, в лабораторных условиях оптимальный pH для роста различных представителей микроводорослей колебался от 6,3 до 10. Выявлено [10], что эвтрофикация прибрежных вод может увеличивать диапазон колебания этого показателя. В глобальном плане изменения климата приводят к тому, что океаны закисляются. Предполагается, что при низком уровне величины pH поверхностного слоя рас-

творяющейся в водах мирового океана CO₂ тоже является ограничивающим фактором для роста и фотосинтеза фитопланктона [11].

Цель работы – изучение сезонного разнообразия микроводорослей и цианобактерий фитопланктона северо-западной и юго-восточной акватории Чёрного моря вблизи полуострова Крым в условиях изменяющихся океанологических характеристик среды.

Материалы и методы. Пробы воды отбирались из поверхностного слоя (0–20 см) специальным пробоотборником.

Анализ гидрологических и гидрохимических показателей выполнялся на основе данных, полученных в экспедиционных условиях. В работе использовались результаты четырех экспедиций, проведенных вдоль северного побережья Чёрного моря в различные сезоны 2019 и 2020 гг. (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Экспедиции по отбору проб, в которых проведены альгологические исследования

Дата	Район проведения экспедиции	Количество станций
24.05.2019	Разрез от Балаклавы до примыкающей к Большой Севастопольской бухте Голландия, огибая мыс Херсонес и минуя бухты: Казачья и Абрамова	8
18.11.2019	Камышовая бухта, которая расположена на юго-западном побережье Крымского полуострова, на юго-западе г. Севастополя. К западу и востоку от нее находятся соответственно бухты Казачья и Абрамова	20
06.12.2019 – 30.12.2019	Часть Чёрного моря, между северо-западным берегом Крымского полуострова и берегом материка. Район мыса Песчаный и мыса Тарханкут. Часть станций вблизи Керчинского полуострова в северо-восточной части Черного моря [12]	6
04.06.2020 – 27.06.2020	Полоса черноморского побережья Крыма на юго-восточном склоне главного хребта Крымских гор от Мыса Ай-Тодор до Феодосийского залива, часть станций в районе Керченского полуострова [12]. Одна глубоководная станция (~1770 м) в северо-восточной части Черного моря	9

Температура морской воды фиксировалась в зондирующем режиме *in situ*. Водородный показатель pH определялся в отобранных с поверхности моря пробах воды непосредственно на борту судна по соответствующей методике [13, 14].

Исследование состава микроводорослей фитопланктона на обозначенных станциях (рис. 1) проводилось в лабораторных условиях. С этой целью по 1 мл пробы воды вносили в пробирки с 10 мл жидкой модифицированной среды Громова № 6, которая является универсаль-

ной средой для культивирования водорослей [15]. Инкубирование образцов осуществлялось в течение 30–120 суток при искусственном освещении и комнатной температуре в светостате.

Изучение морфологии микроводорослей и фотографирование культур проводилось на прижизненных препара-

тах с использованием биологического микроскопа Levenhuk 740T при увеличении $\times 400$. Обработка полученных изображений осуществлялась в программе Adobe Photoshop CS3 Extended. Таксономическую принадлежность микроводорослей устанавливали при помощи определителей [16–19].

Рис. 1. Схема станций комплексных съемок: а) 24 мая 2019 г.; б) 18 ноября 2019 г.; в) 06–30 декабря 2019 г.; г) 04–27 июня 2020 г. Красным цветом отмечены станции, на которых выполнялись альгологические исследования

Fig. 1. Scheme of integrated survey stations, а) May 24, 2019; б) November 18, 2019; в) 06–30 December 2019; г) June 04–27, 2020. Red color marks the stations at which algological studies were carried out

Результаты и обсуждения. Съемка, выполненная 24 мая 2019 г., проходила на борту маломерного судна на участке от Балаклавы до акватории Большой Севастопольской бухты, а именно, примыкающей к ней бухты Голландии, огибая мыс Херсонес, минуя бухты Казачья и Абрамова (рис. 1, а). Средняя географическая глубина при отдалении от конечных точек составляла ~ 18 –30 м. Температура морской воды в это время была достаточно высокой. Среднее значение –

$19,26^{\circ}\text{C}$ ($18,2$ – $20,3^{\circ}\text{C}$). От мыса Херсонес по степени приближения к Севастопольской бухте температура воды постепенно увеличивалась и в бухте Голландия ее величина достигала $20,3^{\circ}\text{C}$. Такие значения соответствуют климатической норме в весенне-летний период для акватории исследования [20]. Величина pH находилась в диапазоне $8,16$ – $8,29$ (табл. 2), что способствовало активному развитию микроводорослей. Относительное разнообразие форм объясняется

особенностями географического расположения района и его экологическим состоянием. Гидролого-гидрохимический режим и развитие фитопланктона Севастопольской бухты определяется интенсивностью водообмена с сопредельной территорией, режимом стока р. Черная, а также постоянно увеличивающимися, поступающими в бухту

сточными водами (главный, постоянный источник загрязнения).

Таким образом, акватория бухты и прилегающая к ней часть моря характеризовались повышенным количеством биогенных элементов, которое во много раз превышало их среднее содержание в открытой части Черного моря. Всё это оказывает влияние на видовое разнообразие микроводорослей [20].

Таблица 2. Температура морской воды и величина pH на поверхности акватории. Экспедиция 24 мая 2019 г.

№ станции	T, °C	Величина pH
3	18,2	8,28
4	18,7	8,25
5	18,9	8,28
6	19,5	8,16
7	19,7	8,29
8	19,9	8,21

Здесь обнаруживались диатомовые родов *Navicula*, *Chaetoceros*, *Cylindrotheca*, *Amphora*, *Pinnularia*, зелёные одноклеточные водоросли, а среди цианобактерий – представители родов *Microcystis*

и *Rhabdoderma*. Кроме того, на некоторых станциях выявлялись гантелевидные организмы, имеющие неясную систематическую принадлежность (рис. 2, 1-ый ряд).

Рис. 2. Представители фитопланктона прибрежной акватории северной части Чёрного моря (по материалам экспедиционных исследований): 1 ряд – 24.05.2019; 2 ряд – 18.11.2019; 3 ряд – декабрь 2019 г.; 4 ряд – июнь 2020 г.

Fig. 2. Representatives of phytoplankton of the coastal water area of the northern part of the Black Sea (based on expeditionary research materials) 1 row – May 24, 2019; 2 row – 11.18.2019.; 3 row – December 2019; 4 row – in June 2020

В акватории Камышовой бухты (рис. 1, б) в ноябре температура воды колебалась от 15,02 до 15,6°C (в среднем – 15,26°C), величина pH составляла 8,29–8,52 (табл. 3), что несколько превышало показатели предыдущей экспедиции (табл. 2). Высокие значения pH (8,48–8,52) отмечались в центральной части бухты. На остальных станциях этот показатель в поверхностном слое варьировал в пределах 8,29–8,51 и соответствовал, в целом, диапазону изменчивости pH в водах всего Черного моря

(8,04–8,52). Как показали результаты исследований, при повышении показателя pH и понижении температуры наблюдалось уменьшение числа культивируемых форм в составе фитопланктона (рис. 2, 2-ой ряд). Они были представлены в основном диатомовыми водорослями рода *Melosira*. В отдельных случаях выявлялись также диатомовые рода *Pinnularia*, (рис. 2, 10), зелёные одноклеточные формы и цианобактерии рода *Microcystis* (рис. 2, 12).

Таблица 3. Температура и величина pH в верхнем слое акватории Камышовой бухты. Ноябрь 2019 г

№ станции	T, °C	Величина pH
1	15,24	8,36
2	15,264	8,29
3	15,335	8,43
5	15,098	8,44
6	15,018	8,42
9	15,148	8,38
12	15,179	8,46
13	15,265	8,48
14	15,251	8,46
16	15,096	8,40
17	15,131	8,52
18	15,171	8,48
19	15,178	8,48
22	15,209	8,32
24	15,235	8,41
25	15,185	8,38
28	15,49	8,43
29	15,47	8,46
30	15,603	8,44
31	15,56	8,32

На станциях 1, 2, 3 и 14 рост микроводорослей и цианобактерий отсутствовал, однако здесь были обнаружены немногочисленные лентообразные и другие организмы неясного систематического положения (рис. 2, 13,15).

В ходе экспедиции в декабре 2019 г. состав фитопланктона изучался на 6 станциях в акватории северного побережья Черного моря (рис. 1, в). Температура воды в зимний период была достаточно низкой и колебалась от 9,76 до 12,48°C (в среднем составляла 11,55°C). Величина pH находилась в пределах

8,20–8,43 (табл. 4), что соответствовало интервалу его значений, характерному для поверхностного слоя Черноморских вод в зимний период. Глубина участков акватории, на которых располагались исследуемые станции, составляла 13–58 м.

В результате культивирования проб на питательной среде только в трех из них был выявлен рост диатомовых рода *Melosira*, а в трех остальных обнаруживались отдельные организмы неясного систематического положения (рис. 2, 3-ий ряд).

Таблица 4. Температура и величина pH в верхнем слое моря. Декабрь 2019 и июнь 2020 гг.

Декабрь 2019 г.		
№ станции	T, °C	Величина pH
29	9,76	8,43
31	10,57	8,33
34	12,47	8,28
38	12,10	8,20
89.1	12,17	8,39
103.1	12,20	8,40
Июнь 2020 г.		
11.1	20,93	8,42
13.1	18,98	8,38
16.1	20,51	8,46
17.1	20,98	8,48
18.1	19,57	8,30
124	21,76	8,38
167	21,28	8,40
209	19,79	8,44
226	22,19	8,42

Во время экспедиции в июне 2020 г. (рис. 1, з) для исследования состава фитопланктона образцы воды отбирались на станциях, на которых глубина находилась в широких пределах – от 20 м (станция 17.1) до 1770 м (станция 167). Температура поверхностного слоя воды составляла 18,98–23,0°C (в среднем – 21,9°C) (табл. 4). Величина pH (8,42–8,48) была более высокой по сравнению с зимними значениями.

В процессе культивирования образцов воды на питательной среде заметный рост альгологической компоненты наблюдался только на двух, относительно мелководных, станциях (17.1 и 226.). При микроскопировании данных образцов оказалось, что в них развивались цианобактерии рода *Synechococcus*. В остальных случаях выявлены только организмы, имеющие неясное систематическое положение (рис. 2, 4-ый ряд). Дiatомовые водоросли не обнаруживались. Возможно, в состав фитопланктонных сообществ в данном случае входили в основном некультивируемые формы микроводорослей. Ещё одной причиной скудности состава фитопланктонных микроводорослей мог стать процесс перемешивания водных слоёв вследствие

волновой активности в период, когда происходил отбор проб.

Закключение. Таким образом, в результате лабораторного культивирования образцов воды, отобранных на нескольких станциях в ходе четырёх морских экспедиций, проводимых в различные сезоны 2019 и 2020 гг., были получены предварительные результаты по распределению микроводорослей в фитопланктоне северного, северо-восточного и северо-западного побережья Чёрного моря в условиях изменяющихся океанологических характеристик среды. Выявлено, что наиболее активно микроводоросли развивались в фитопланктоне на участке от Балаклавы до акватории Большой Севастопольской бухты в весенний период при pH 8,16–8,29 и температуре 19,26°C. Относительному разнообразию форм также могли способствовать особенности гидролого-гидрохимического режима данного региона.

В осенний период в акватории Камышовой бухты и зимой в районе между северо-западным побережьем Крымского полуострова и берегом материка рост микроводорослей в фитопланктоне выявлялся не на всех исследуемых станциях, а там, где наблюдался, – доминиро-

вали диатомовые рода *Melosira*. Сходная картина распределения фитопланктонных микроводорослей в обоих случаях, вероятно, связана с похожими океанологическими характеристиками такими, как значение рН.

Во время экспедиции в летний период на станциях акватории вдоль юго-восточного побережья Крыма, характеризующихся повышенной, относительно зимних значений, величиной рН, в фитопланктоне только двух станций был выявлен рост альгологической компоненты – цианобактерий рода *Synechococcus*. Диатомовые водоросли не обнаруживались. Одной из причин скудности состава фитопланктонных микроводорослей предположительно мог стать процесс перемешивания водных слоёв вследствие волновой активности в период, когда происходил отбор проб.

В ходе дальнейших экспедиций исследования развития фитопланктонных микроводорослей в зависимости от изменяющихся океанологических характеристик позволят установить более чёткие закономерности отношений данных параметров и определить экологические показатели благополучия морской прибрежной акватории.

Полученные данные в дальнейшем могут быть использованы при проведении мониторинговых исследований экологического состояния прибрежных акваторий крупных населённых пунктов, зон рекреации и других объектов хозяйственной деятельности.

Работа выполнена в рамках проекта Российской академии наук № АААА-А19-119031490078-9 при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №18-45-920014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пиццык Г.К.* Систематический состав фитопланктона. В кн.: Основы биологической продуктивности Черного моря. Киев: Наук. думка, 1979. С. 63–70.
2. *Алтухов Д.А.* Видовое разнообразие фитопланктона Черного моря: Методические рекомендации по созданию базы данных // Экология моря. 2000. Вып. 52. С. 79–82.
3. *Востоков С.В., Лобковский Л.И., Востокова А.С., Соловьев Д.М.* Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями Хлорофилла *a* // Доклады Академии наук, 2019. Т. 485, № 1. С. 9–103.
4. *Чёрное море.* Сборник. Л.: Гидрометеиздат, 1983. Варна: Книгоиздательство „Георги Бакалов.“ Авторский коллектив / пер. на рус. яз.
5. *Стельмах Л.В., Куфтаркова Е.А., Бабич И.И.* Структурно-функциональные характеристики фитопланктона прибрежных вод западной части Черного моря в осенний период // <https://docplayer.ru/47403379-Strukturno-funkcionalnye-harakteristiki-fitoplanktona-pribrezhnyh-vod-zapadnoy-chasti-chernogo-morya-v-osenniy-period.html> (дата обращения: 21.09.2020).
6. *Нестерова Д.А., Теренько Л.М.* Некоторые изменения фитопланктона Черного моря под влиянием эвтрофирования // Гидробиол. исслед. на Украине в 11 пятилетке: 5 конф. Укр. фил. Всес. Гидробиол. об-ва. Киев, 2–4 апр. 1987: тезисы докл. Киев, 1987. С. 55–56.
7. *Šolić M.* Effect of phytoplankton on the growth of bacteria under experimental conditions // Acta adriat. 1989. Vol. 29. № 1-2. P. 83–104.
8. *Litchendorf T.* The effect of lower pH on phytoplankton growth in the Galapagos Archipelago // 2006. https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/2409/Trina_Litchendorf.pdf;sequence=1 (дата обращения: 21.09.2020).
9. *Константинов А.С.* Общая гидробиология: учеб. для студентов биол. спец. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 472 с.
10. *Hinga K.R.* Effects of pH on coastal marine phytoplankton // Marine Ecology Progress Series (Mar. Ecol. Prog. Ser.) 2002. Vol. 238. P. 281–300.

11. *Chenl C.Y., Durbin E.G.* Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1994. Vol. 109. P. 83–94.
12. *Океанография Черного моря* / В.А. Иванов, В.Н. Белокопытов; НАН Украины, Морской гидрофизический институт. Севастополь, 2011. 209 с.
13. *Рябинин А.И., Шибеева С.А.* Инструментальные методы анализа в экологии: учеб. пособие. Севастополь: СИЯЭиП, 2002. 168 с.
14. *Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР».* 2012. <http://ecodevice.com.ru/ecodevicecatalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 12.04.2019).
15. *Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П.* и др. Водоросли. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
16. *Кондратьева Н.В.* Синьозелені водорості – Cyanophyta. Ч. 2. Класс Гормогонієві – Hormogoniophyceae: в кн. *Визначник прісноводних водоростей Української РСР.* Вип. 1. Київ: Наукова думка, 1968. 523 с.
17. *Кондратьева Н.В., Коваленко О.В., Приходькова Л.П.* Синьозелені водорості – Cyanophyta. Загальна характеристика синьозелених водоростей – Cyanophyta. Класс Хроококові – Chroococcophyta. Класс Хамесифонові – Chamaesiphonophyceae: в кн. *Визначник прісноводних водоростей Української РСР.* Вип. 1. Київ: Наукова думка, 1984. 388 с.
18. *Определитель бактерий Берджи* / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. М.: Мир, 1997. Т. 1-2. 799 с.
19. *Гусляков Н.Е., Закордонцев О.А., Герасимюк В.П.* Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов. Киев: Наукова думка, 1992. 110 с.
20. *Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов* / В.А. Иванов, Е.И. Овсяный, Л.Н. Репетин [и др.] / МГИ НАН Украины. Севастополь, 2006. 90 с.

COMPOSITION ANALYSIS OF PHYTOPLANKTON MICROALGAE IN VARIOUS WATER AREAS OF THE BLACK SEA NEAR THE CRIMEAN PENINSULA

N.A. Andreeva, E.A. Grebneva

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Preliminary studies of cultivated phytoplankton microalgae were carried out in water samples collected during four expeditions at oceanographic stations of the coastal waters of the north-western and northeastern parts of the Black Sea in different seasons of 2019-2020. Some features of the development of the algological component in conditions of changing oceanological characteristics of the environment have been established. In spring, the most active growth of diatoms was revealed in the area from Balaklava to the water area of the Sevastopol Bay.

Keywords: expeditions, the Black Sea, microalgae, phytoplankton, changing oceanological characteristics.