ВЛИЯНИЕ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА БИОРАЗНООБРАЗИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ С ПОВЫШЕННЫМ АНТРОПОГЕННЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ

Н.А. Андреева, Е.А. Гребнева

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: andreeva.54@list.ru

В работе рассмотрено влияние гидролого-гидрохимических условий среды (рН, температуры и концентрации растворенного органического вещества) на распределение микроводорослей и цианобактерий фитопланктона на 15 станциях прибрежной акватории Черного моря с повышенным антропогенным загрязнением в зимний период. Показана дискретность абиотических факторов и особенности структуры фитопланктона в определенных точках и возможность использования некоторых представителей фитопланктона в качестве индикаторов экологического состояния среды.

Ключевые слова: гидролого-гидрохимические факторы, фитопланктон, прибрежная акватория, Черное Море.

Поступила в редакцию: 22.04.2019. После доработки: 30.05.2019.

Введение. Прибрежные воды, особенно вблизи крупных населенных пунктов, постоянно обогащаются огромными количествами взвешенных и растворенных питательных веществ, что может благоприятствовать развитию водорослей, в том числе и планктонных. Особенно благоприятны для развития фитопланктона районы, где подъем глубинных вод преобладает над их опусканием. Однако, в морских водоемах концентрация таких растворенных биогенных веществ, как нитраты, фосфаты и некоторых других также низка, и они представляют собой лимитирующие факторы, в отличие от хлористого натрия. Известно, что водоросли разных отделов имеют неодинаковые потребности в макро- и микроэлементах. Например, для нормального развития диатомовых водорослей необходимы довольно значительные количества кремния, который используется для постройки их панциря. Степень развития и видовой состав фитопланктона определяют уровень загрязнения морской воды различными биогенами. В свою очередь и фитопланктон влияет на содержание в среде этих элементов. Проявлением эвтрофирования считается увеличение числа видов водорослей [1].

Bishop S. с соавторами [2] считают, что растворенный органический азот практически не используется фитопланктоном непосредственно. Но дан-

ные, полученные Delmas D. [3], а также Van Wambeke F. и Bianchi M. [4], свидетельствуют о существенном потреблении водорослями растворенного органического азота, в частности, аминокислот в эстуариях и прибрежных водах с высокой концентрацией взвеси. Способность некоторых видов фитопланктона к потреблению органических соединений рекомендуется учитывать при выделении видов – индикаторов загрязнения [5]. В свою очередь, активное развитие фитопланктона оказывает явное влияние на концентрацию растворенного органического вещества (РОВ) [6].

Непосредственное влияние на развитие популяций водорослей кроме наличия в среде различных органических веществ оказывают такие факторы, как температура, солёность и освещенность [7]. По минерализации и солёности воды в прибрежной акватории Черного моря относятся к мезогалинному типу (5–18 ‰). Большинство микроводорослей характеризуется широкой амплитудой солеустойчивости [8]. Еще один фактор, влияющий на жизнедеятельность водорослей – это кислотность среды. Отношение к колебаниям кислотности (рН) у разных таксонов столь же различно, как и к изменениям солёности [8]. Распределение водорослей в толще воды определяется световым режимом, необходимым для фотосинтеза. В поверхностном слое воды (в эвфотической зоне) разви-

ваются в основном гелиофильные (светолюбивые) формы, к которым относятся большинство цианобактерий, зеленых водорослей и некоторые диатомовые. Значительное влияние свет оказывает на вертикальное распределение водорослей. В морях, кроме вертикального перемешивания, наблюдаются постоянные течения, также имеющие значение в жизни водорослей [8].

На распределение большинства водорослей фитопланктона значительное влияние оказывает температурный фактор. Именно температура определяет их вертикальное распределение и географическое распространение (географическую зональность). Было выявлено, что у диатомовых скорость поглощения биогенов возрастала непрерывно и равномерно при повышении температуры [9].

Цель работы – изучение развития микроводорослей фитопланктона прибрежной акватории Черного моря в зависимости от различных абиотических факторов в зимний период. Полученные данные могут быть использованы при проведении мониторинговых исследований экологического состояния прибрежных акваторий крупных населенных пунктов.

Материалы и методы. Анализ выполнялся на основе гидрологических и гидрохимических данных экспедиции, организованной Институтом природнотехнических систем и Севастопольским филиалом Московского государственного университета. Съемка прибрежной акватории проводилась 07 декабря 2018 г. по схеме станций, представленной на рис. 1. Данная прибрежная акватория является наиболее подверженной антропогенному воздействию.

Это связано с поступлением в воду значительного количества различных нефтепродуктов и других загрязнителей.

Координаты станций определялись при помощи приемника GPS.

Забортные работы выполнены в дрейфе с борта маломерного судна. Диапазон глубин на полигоне 10–18 м. Водородный показатель pH определялся в отобранных с поверхности моря пробах воды непосредственно на борту судна по соответствующей методике [10]. Темпера-

тура, соленость и концентрация РОВ в водной толще синхронно фиксировались при помощи оптического биофизического зондирующего комплекса «Кондор» в зондирующем режиме *in situ* с шагом по глубине 0,1 м [11].

Рис. 1. Схема станций на спутниковом снимке комплексной съемки, выполненной 07 декабря 2018 г.

В нашей работе использовались данные по 15-ти наиболее характерным точкам. На этих станциях проводилось исследование состава микроводорослей фитопланктона. С этой целью по 1 мл пробы воды вносили в пробирки с 10 мл жидкой модифицированной среды Громова № 6, которая является универсальной средой для культивирования водорослей [12]. Культивирование образцов осуществлялось в течение 30–120 суток при искусственном освещении и комнатной температуре в светостате.

Прижизненные препараты микроводорослей изучались с использованием светового микроскопа при увеличении $\times 400$. Фотографирование культур проводилось биологическим микроскопом Levenhuk 740T с дальнейшей обработкой

изображений в программе Adobe Photoshop CS3 Extended. Таксономическую принадлежность микроводорослей устанавливали при помощи определителей [13–16].

Результаты и обсуждение. Особенности гидрологического режима исследуемой прибрежной акватории заключается в наличии распресненных вод, в ее кутовой части, поступающих из примыкающей балки (рис. 1). Термохалинная структура акватории исследования в период выполнения съемки характеризовалась наличием распресненного (соленость 16,4–16,5 ЕПС) и максимально выхоложденного верхнего тонкого слоя вод до температуры 8,9–9,1°C в кутовой части акватории. В мористой части Южной бухты температура воды на поверхности изменялась от 10,0 до 10,4°C и соленость от 17,3 до 17,7 ЕПС. По акватории наблюдалась повышенная концентрация РОВ, на всех исследованных станциях, превышающая его природную норму содержания в Черном море (2 мг/л), и составляла величину 2,3–4,5 мг/л [17]. Такое содержание РОВ указывает на высокую степень загрязнения вод исследуемой акватории. Локальные максимумы концентрации этого вещества отмечены в кутовой части, у выпусков сточных вод, расположенных у восточного берега акватории и на западе мористой части на станции № 8.

Значения водородного показателя pH на поверхности всей исследуемой акватории находились в диапазоне от 8,05 до 8,30 ед. pH. Минимальные величины были отмечены в кутовой части, что соответствовало понижению термохалинных индексов.

Температура воды, концентрация биогенных веществ и значение pH являются наиболее значимыми факторами качественного и количественного распределения фитопланктона.

Фитопланктон прибрежной зоны Черного моря представлен, в основном, диатомовыми и перединовыми водорослями [18]. Но в морских акваториях, подверженных антропогенному воздействию, прослеживаются более или менее выраженные изменения состава фитопланктона.

В результате инкубирования образцов воды из поверхностного слоя в течение 30 суток в светостате наблюдался слабый рост культивируемых микроводорослей на всех 15 станциях. Микроскопирование прижизненных препаратов выявило присутствие в большинстве проб диатомовых водорослей, принадлежащих к роду *Melosira*. В образце № 1 отмечен слабый рост *Pleurosigma*, еще в одном образце присутствовали мелкие диатомовые из рода *Navicula*, кроме того, во всех вариантах были обнаружены организмы неясного систематического положения, такие, как лентообразные формы (рис. 2). Четко выраженного различия по составу микроводорослей в образцах между станциями на этом этапе культивирования не обнаружено.

Через 120 суток культивирования в 4-х образцах на станциях № 7, № 8, № 9 и № 18 визуально отмечался активный рост микроводорослей. Результаты микроскопирования показали, что в образце № 7 присутствовали диатомовые водоросли, нитчатые зеленые и гантелевидные организмы. В варианте № 8 выявлялись две формы цианобактерий (*Cyano-sarcina* и, предположительно, *Chroococcidiopsis*), в образце № 9 основной была диатомовая водоросль *Melosira*.

В образце № 18 доминировали мелкие одноклеточные зеленые водоросли, а также обнаруживались нитчатые диатомовые (*Melosira*) и гантелевидные формы. В других вариантах наблюдался, в основном, рост различных диатомовых, а в некоторых присутствовали лентообразные организмы. В вариантах 13 и 16 встречалась необычная нитчатая цианобактерия, сходная с представителями рода *Rhabdoderma* (рис. 3).

Следует отметить, что на станции № 8 создались наиболее благоприятные условия для развития цианобактерий: высокая для зимнего сезона температура воды (10,6°C), максимальное по сравнению с другими станциями содержание РОВ (4,2 мг/л) и повышенная щелочность среды (pH = 8,22), которая может быть связана с эвтрофикацией прибрежных вод [19].

Рис. 2. Представители фитопланктона в образцах воды 15-ти станций прибрежной акватории через 30 суток инкубации в светостате
1 – *Pleurosigma*; 2–5 – *Melosira*; 6, 7, 9 – неидентифицированные диатомовые;
8 – *Navicula*; 10 – лентообразные

Рис. 3. Представители фитопланктона в некоторых образцах воды прибрежной акватории через 120 суток инкубации в светостате
1 – *Pinnularia*; 2 – неидентифицированная зеленая водоросль; 3 – гантелевидные организмы;
4 – *Cyanosarcina*; 5 – *Chroococcidiopsis*; 6 – *Melosira*; 7 – одноклеточные зеленые водоросли;
8 – зеленые водоросли + *Melosira*; 9 – зеленые водоросли + гантелевидные; 10 – лентообразные;
11 – хроококковые цианобактерии; 12–14 – цианобактерии *Rhabdoderma*; 15 – *Navicula*

Станции № 7 и № 9 характеризовались высокими для данной акватории значениями температуры и средними значениями pH. Содержание РОВ здесь не превышало 2,4 мг/л. Активное развитие в этих точках диатомовых водорослей могло быть связано с освещенностью. Это подтверждается литературными данными, свидетельствующими о за-

висимости роста диатомей (поглощения ими биогенов) как от повышения температуры, так и от освещенности [9].

На станции № 18 отмечено минимальное значение РОВ и высокие показатели температуры и pH. Доминирование зеленых водорослей в данном случае указывает на вероятное наличие в среде достаточного количества неорганиче-

ских биогенных элементов наряду с оптимальной инсоляцией, что способствовало активному фотосинтезу водорослей.

В вариантах № 13 и № 16 при высокой температуре 10,5–10,6°C и значении рН 8,23–8,24, как указывалось выше, была обнаружена реликтовая алкалофильная цианобактерия, принадлежащая к роду *Rhabdoderma*. Сведения о данном организме в фитопланктоне акватории черноморского побережья отсутствуют, поэтому факт их обнаружения в пробах представляет научный интерес.

В процессе культивирования образцов воды из варианта № 8 был изолирован штамм 65 (*Cyanosarcina*), а из варианта № 18 – штамм 66 (одноклеточная зеленая водоросль). Выделенные штаммы после очистки и получения альгологически чистых культур пополняют созданную Коллекцию микроводорослей и цианобактерий Института природно-технических систем.

Закключение. Практически вся исследуемая прибрежная акватория отличается очень сильным загрязнением и экологические условия в ней остаются неблагоприятными в течение большей части года. Кроме того, свой немалый вклад в эвтрофирование акватории вносят ливневые стоки. Результаты, полученные в процессе анализа гидролого-гидрохимических и альгологических данных, дают возможность говорить о выраженной дискретности абиотических факторов среды и распределения различных представителей фитопланктона на 15-ти исследованных станциях. Термохалинная структура в бухте с ярко выраженной температурной инверсией с приращением 0,9–1,2°C в ее кутовой части. Водородный показатель рН на поверхности моря повсеместно соответствовал его природной норме. Отмечена высокая степень загрязнения вод всей исследуемой акватории растворенным органическим веществом, локальные максимумы концентрации которого регистрировались в кутовой части бухты и в местах выпусков сточных вод. Используя методы лабораторного культивирования образцов, была получена возможность выявить в фитопланктоне цианобактериальную компоненту, плохо

различимую в фиксированных пробах. Активное развитие цианобактерий обнаруживалось именно в той точке акватории (станция № 8), где были самые высокие показатели содержания РОВ. Так как цианобактерии являются миксотрофными организмами и легко переходят от одного способа питания к другому (от фототрофии к гетеротрофии), их можно использовать в качестве индикаторов загрязнения акватории органическими веществами. Наличие в двух пробах (станции № 13 и № 16) алкалофильных цианобактерий рода *Rhabdoderma* вероятно указывает на тенденцию к защелачиванию вод вследствие эвтрофикации. На станциях № 7 и № 9 сложились благоприятные условия для развития диатомовых водорослей, а на станции № 18 – для одноклеточных зеленых форм. На остальных участках скудный состав фитопланктона в основном соответствовал данным, полученным нами по акватории за предыдущие два года.

Работа частично выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-45-920014).

Авторы выражают благодарность Ломакину П.Д. и Чепыженко А.И. за предоставление гидрологических данных и данных по содержанию РОВ, необходимых для дальнейшего анализа биологических результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Bishop S.S., Emmanuele K.A., Yoder J.A. Nutrient limitation of phytoplankton growth in Georgia near shore waters // Estuaries. 1984. В 7. N 4. P. 506–512.
3. Delmas D. A zone organique dissous et production primaire // Oceanis. 1988. Vol. 14. N 2. P. 375–379.
4. Van Wambeke F., Bianchi M.A. Effect of organic nitrogen enrichments on marine planktonic networks and heterotrophic

bacterial potential // Mar. Ecol. Progr. Ser, 1990. Vol. 63. N 1. P. 17–25.

5. Yamada M., Arai Y., Tsuruta A., Yoshida Y. Использование органических азотсодержащих соединений в качестве источника азота морским фитопланктоном // Nippon suisan gakkaiishi, Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 1983. 49. N 9. P. 1445–1448.

6. Zark M., Riebesell U., Dittmar T. Effects of ocean acidification on marine dissolved organic matter are not detectable over the succession of phytoplankton blooms // Sci. Adv. 2015. Vol. 1 (9). e1500531. P. 1–7.

7. Šolić M. Effect of phytoplankton on the growth of bacteria under experimental conditions // Acta adriat. 1989. Vol. 29. N 1-2. P. 83–104.

8. Экология и распространение водорослей. 2017. С. 5–8. <https://lektsia.com/6x449.html> (дата обращения: 12.04.2019).

9. Terry K.L. Temperature dependence of ammonium and phosphate uptake, and their interactions, in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum* bohrlin // Mar. Biol. Lett. 1983. Vol. 4. N 6. P. 309–320.

10. Рябинин А.И., Шибаева С.А. Инструментальные методы анализа в экологии: учеб. пособие. Севастополь: СИЯЭиП, 2002. 168 с.

11. Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР». 2012. <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 12.04.2019).

12. Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. Водоросли. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.

13. Кондратьева Н.В. Синьозелені водорості – Суанопхита. Ч. 2. Клас Гормогонієві – Нормогоніопхусеае: в кн. Визначник прісноводних водоростей Української РСР. Вип. 1. Київ: Наукова думка, 1968. 523 с.

14. Кондратьева Н.В., Коваленко О.В., Приходькова Л.П. Синьозелені водорості – Суанопхита. Загальна характеристика синьозелених водоростей – Суанопхита. Клас Хроококові – Хроососсопхита. Клас Хамесифонові – Чамесифонопхусеае: в кн. Визначник прісноводних водоростей Української РСР. Вип. 1. Київ: Наукова думка, 1984. 388 с.

15. Определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. М.: Мир, 1997. Т. 1-2. 799 с.

16. Гусяков Н.Е., Загордонец О.А., Герасимюк В.П. Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов. Киев: Наукова думка, 1992. 110 с.

17. Хайлов К.М. Экологический метаболизм в море. Киев: Наукова Думка, 1971. 250 с.

18. Жизнь растений. В 6-ти т. Т. 3. Водоросли. Лишайники / под ред. проф. М.М. Голлербаха. М.: Просвещение, 1977. 487 с.

19. Hinga K.R. Effects of pH on coastal marine phytoplankton // MAR. ECOL. PROG. SER. 2002. Vol. 238. P. 281–300.

INFLUENCE OF HYDRO-HYDROCHEMICAL FACTORS ON THE BIODIVERSITY OF PHYTOPLANKTON IN THE COASTAL AQUATORIA BLACK SEA WITH ENHANCED ANTHROPOGENOUS POLLUTION

N.A. Andreeva, E.A. Grebneva

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

The paper considers the influence of hydrological and hydrochemical environmental conditions (pH, temperature and dissolved organic matter concentration) on the distribution of microalgae and phytoplankton cyanobacteria at 15 stations of the coastal water area of Sevastopol in the winter period. The discreteness of abiotic factors and phytoplankton structure features at certain points and the possibility of using some phytoplankton representatives as indicators of the ecological state of the environment are shown.

Keywords: hydrological and hydrochemical factors, phytoplankton, coastal water area, Black Sea.