

МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФИТОПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

Л.В. Стельмах

ФИЦ “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН”,
РФ, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: lustelm@mail.ru

Дано обоснование методологии проведения мониторинга состояния фитопланктонного сообщества прибрежных вод Черного моря в условиях глобального потепления и усиленного антропогенного загрязнения. Предложено использование комплексного подхода, основанного на определении сезонной и межгодовой изменчивости целого ряда структурных и функциональных параметров фитопланктона, скорости его потребления микрозоопланктоном, а также количественной оценке основных гидрологических и гидрохимических показателей, отражающих состояние водной среды. Такие результаты помогут выявить основные тенденции изменений в фитопланктонном сообществе на современном этапе развития черноморской экосистемы, а также предсказать возможные пути ее дальнейшего развития в условиях глобальных климатических изменений и антропогенного пресса.

Ключевые слова: фитопланктон, Черное море, климатические изменения, антропогенное загрязнение.

Поступила в редакцию: 05.02.2020. После доработки: 28.02.2020.

Введение. Одной из основных задач экологии является оценка современного состояния морских экосистем и возможных путей их эволюции в условиях климатических изменений и постоянно растущей антропогенной нагрузки. За последнее столетие в результате изменений климата температура морской воды в глобальном масштабе повысилась примерно на 1°C [1]. В поверхностном слое глубоководной части Черного моря с середины 1990-ых годов изменение температуры характеризуется положительным трендом [2, 3]. Усиление температурной стратификации водной толщи привело к существенному снижению потока биогенных веществ из глубин в зону фотосинтеза. В результате среднегодовые значения концентрации хлорофилла *a* и биомассы фитопланктона значительно ниже, чем в предыдущие десятилетия [4, 5]. Вследствие этого поток вещества и энергии от фитопланктона к высшим трофическим уровням существенно ниже, чем ранее.

В прибрежных водах в районе Крымского полуострова также отмечается многолетний однонаправленный поло-

жительный тренд по температуре воды поверхностного слоя [6]. Кроме того, прибрежные акватории подвергаются усиленному антропогенному загрязнению, особенно районы, находящиеся вблизи городов [7, 8]. К таким районам относятся прибрежные воды у Севастополя, качество которых продолжает снижаться. Поэтому исследования, направленные на выявление изменений, происходящих в первичном звене экосистем этих акваторий, являются крайне актуальными. Их успех в значительной мере определяется выбором методологии и методов проведения работ.

Цель настоящей работы состояла в обосновании методологии проведения комплексного мониторинга состояния фитопланктонного сообщества прибрежных вод Черного моря в условиях глобального потепления и усиленного антропогенного загрязнения.

Основная часть. Понимание механизмов, контролирующих развитие фитопланктонного сообщества, необходимо при решении многих вопросов, связанных с кислородным и биогенным режимом вод, обменом газами между оке-

аном и атмосферой, транспортом CO_2 из атмосферы в глубины океана, влиянием климата и антропогенной нагрузки на изменение углеродного цикла и структуру пищевых цепей в море. Для выявления факторов, определяющих современное состояние и динамику развития фитопланктона, требуются знания об изменчивости его биомассы, таксономического и видового состава, размерной структуры и функциональных характеристик. Исследования сезонной и многолетней динамики этих параметров в различных районах прибрежных вод Черного моря, в том числе в районе Севастополя, могут быть основой для выявления возможных перспектив эволюции фито-

планктонного сообщества прибрежных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов. Такие исследования необходимо осуществлять комплексно, включая определение гидрохимических и гидрологических показателей водной среды. Это позволит определить параметры фитопланктона, наиболее чувствительные к антропогенному воздействию и климатическим изменениям, а также выявить пути его адаптации к меняющимся условиям среды.

В прибрежных водах на развитие фитопланктона оказывает влияние целый комплекс абиотических факторов в результате их прямого воздействия, а также опосредованного (рис. 1).

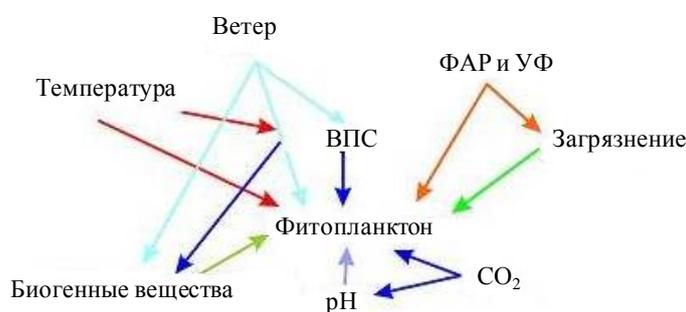


Рис. 1. Взаимодействие между различными абиотическими факторами, влияющими на фитопланктон [9]. ВПС – верхний перемешанный слой,

ФАР – фотосинтетически активная радиация, УФ – ультрафиолетовое излучение

Fig. 1. The interaction between various abiotic factors influencing on phytoplankton [9]. UML – upper mixed layer, PAR – photosynthetically active radiation, UV – ultraviolet radiation

Основными абиотическими факторами, определяющими уровень развития фитопланктона, являются свет, температура и биогенные вещества. Роль последних двух факторов имеет особое значение в условиях глобального потепления климата.

Прямое влияние температуры выражается в том, что при повышении температуры водной среды в пределах температурного оптимума развития водорослей, скорости фотосинтетических процессов и роста возрастают, тогда как в условиях температур, превышающих оптимальные, ингибируются (9, 10). Вследствие этого происходит перестройка фитопланктонного сообщества: часть микроводорослей может отмирать, а в фитопланктоне начинают развиваться виды, устойчивые к более высоким зна-

чениям температур и низкому содержанию биогенных веществ. Среди них представители динофитовых водорослей и некоторые виды диатомовых [11], имеющих высокий температурный оптимум для своего роста [10].

Влияние температуры на фитопланктонное сообщество может проявляться косвенно через усиление температурной стратификации водной толщи, приводящее к обеднению поверхностных вод биогенными веществами, необходимыми для развития фитопланктона. В этих условиях основной формой азота, как правило, является аммоний, обеспечивающий успешное развитие только некоторых групп водорослей, прежде всего динофитовых и кокколитофорид [12]. Кроме того, при биогенном лимитировании преимущество получают либо виды

с малым клеточным объемом, имеющие низкие константы полунасыщения (K_s) по биогенным веществам, либо крупные водоросли, способные накапливать биогенные вещества во внутриклеточных вакуолях.

Показано, что вследствие глобально-го потепления в некоторых районах Мирового океана в настоящее время зимнее «цветение фитопланктона» наблюдается гораздо позже, чем ранее [13]. Сокращается продолжительность «цветений» и снижается их интенсивность, что обусловлено прямым влиянием температуры на фитопланктон, а также снижением содержания биогенных веществ в верхнем перемешанном слое в результате усиления температурной стратификации водной толщи. Подобные процессы наблюдаются в последние два десятиле-

тия и в глубоководной области Черного моря [5]. В его прибрежных районах содержание биогенных веществ может быть достаточно высоким в течение большей части года [7, 14], а значит не ограничивать прирост биомассы фитопланктона. Однако в летний период, на фоне сильно выраженной стратификации водной толщи, концентрация биогенных веществ в этих водах, в том числе в районе Севастополя, в некоторых случаях равна аналитическому нулю. В этих условиях отмечено снижение эффективности работы фотосистемы 2 и удельной скорости роста фитопланктона [15]. Влияние биогенных веществ на эффективность работы фотосистемы 2 и удельную скорость роста было выявлено нами на культурах нескольких видов морских микроводорослей (рис. 2а, б).

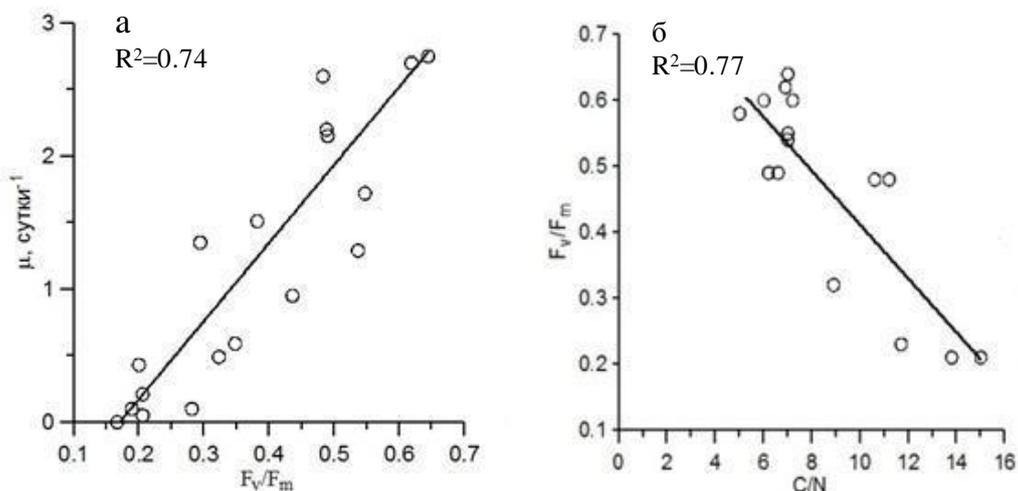


Рис. 2. Зависимость: а – удельной скорости роста (μ) от относительной переменной флуоресценции (F_v/F_m , отн. ед.), б – относительной переменной флуоресценции от внутриклеточного атомарного отношения между азотом и углеродом (C/N) в культурах диатомовых водорослей *Chaetoceros socialis*, *Skeletonema costatum* и *Ditylum brightwellii* [16]

Fig. 2. Dependence: а – specific growth rate (μ) on the relative variable of fluorescence (F_v / F_m , rel. units), б – relative variable of fluorescence on the intracellular atomic ratio between nitrogen and carbon (C/N) in diatom cultures of *Chaetoceros socialis*, *Skeletonema costatum* and *Ditylum brightwellii* [16]

Как видно из представленных данных, повышение атомарного отношения между азотом и углеродом (C/N) в культурах диатомовых водорослей *Chaetoceros socialis*, *Skeletonema costatum* и *Ditylum brightwellii*, свидетельствующее о низком содержании азота внутри их клеток, вызывает снижение эффективности ра-

боты фотосистемы 2 (F_v/F_m) приблизительно в 3 раза. При этом низкому уровню отношения F_v/F_m соответствуют минимальные значения удельной скорости роста водорослей. Тогда как повышение эффективности работы фотосистемы 2 приводит к увеличению удельной скорости роста. Следовательно, эти два пара-

метра могут быть использованы в мониторинговых исследованиях в качестве показателей изменчивости функционального состояния фитопланктона на фоне разного уровня биогенной обеспеченности.

Лабораторные исследования показали, что эффективность работы фотосистемы 2 водорослей снижается под действием загрязняющих веществ, которые могут поступать в море из различных источников. В экспериментах на культурах морских диатомовых водорослей *Thalassiosira weissflogii* и *Pseudonitzschia delicatissima* обнаружено резкое усиление чувствительности фотосистемы 2 к солям тяжелых металлов. В результате воздействия метилртути и хлорида ртути на эти культуры величина отношения Fv/Fm снижалась [17]. Это дает основание полагать, что такой показатель, как эффективность работы фотосистемы 2 фитопланктона вместе со скоростью роста следует использовать для качественной оценки загрязнения прибрежной полосы моря бытовыми сточными водами, промышленными отходами, балластными водами и случайными разливами нефти, а также микропластиком. В акваториях, подверженных антропогенному воздействию, прослеживаются изменения качественного и количественного состава фитопланктона. Чаще всего это проявляется в «цветении» воды, вызванном интенсивным развитием отдельных видов водорослей. Некоторые из них проявляют токсичные свойства или являются потенциально токсичными. Это существенно влияет на состояние всей экосистемы в целом.

В тех случаях, когда прямые изменения в составе и функционировании фитопланктона не выявлены, загрязняющие вещества могут накапливаться в клетках водорослей и в процессе их потребления зоопланктоном оказывать угнетающее влияние на его функционирование. В первую очередь это относится к микрозоопланктону, который является основным потребителем первичной продукции фитопланктона [18]. Поэтому от его функционального состояния и трофической активности зависит количество органического вещества, передаваемое от

фитопланктона на последующие трофические уровни.

В условиях прямого влияния повышенного антропогенного загрязнения на микрозоопланктон снижается его численность [19] и происходит деградация таксономического состава [20]. Отрицательное воздействие на микрозоопланктон может осуществляться косвенно в результате изменений в видовом составе фитопланктона, приводящих к ухудшению качества пищи для простейших, что вызывает снижение скорости потребления фитопланктона микрозоопланктоном [21]. Следовательно, последний параметр крайне важен при выполнении мониторинговых исследований.

В ходе проведения комплексных работ по мониторингу фитопланктона необходимо выполнять определения не только биологических параметров, но и гидрологических, а также гидрохимических. Среди них такие параметры, как температура воды, соленость, содержание минеральных форм азота, фосфора и кремния, насыщение воды кислородом, биологическое потребление кислорода (БПК₅), перманганатная окисляемость, а также индекс эвтрофикации (E)TRIX. Последние три показателя могут отражать уровень эвтрофирования и загрязнения вод.

Для изучения проблемы, связанной с загрязнением, необходимо выполнять регулярные комплексные исследования в течение года в прибрежных водах, подверженных разному уровню антропогенного воздействия. Интервал отбора проб не должен быть более двух недель, так как этот временной интервал соответствует минимальной продолжительности продукционных циклов фитопланктона, зарегистрированных в прибрежных водах Черного моря в течение года [22].

С целью выявления влияния температуры на фитопланктон прибрежных районов Черного моря в контексте глобального потепления необходим анализ результатов комплексных исследований биологических, гидрохимических параметров и температуры воды, полученных за последние два десятилетия. Именно в этот период отмечены существенные изменения в фитопланктонном сообще-

стве, связанные преимущественно с повышением среднегодовых значений температуры водных масс [11].

Заключение. Представленное в данной работе обоснование методологии проведения мониторинга состояния фитопланктонного сообщества прибрежных вод Черного моря, функционирующего в условиях глобального потепления и усиленного антропогенного загрязнения, основано на результатах работ, выполненных нами ранее, а также данных, полученных отечественными и зарубежными коллегами. Предлагаемый комплексный подход для решения поставленных задач на современном этапе развития экосистемы прибрежных вод ранее не использовался. Результаты, полученные с применением такого подхода, будут иметь не только фундаментальное значение, но и прикладное. Они могут быть рекомендованы к использованию в комплексе мероприятий по оценке санитарного состояния морской среды в зонах рекреации и районах локализации марихозяйств.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920002 «Стратегии адаптации фитопланктона и его потребление микробиотой под влиянием климатических изменений и антропогенной нагрузки на прибрежные экосистемы Черного моря (район Севастополя)», а также по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ РАН № АААА-А18-18021490093-4 («Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Häder D.-P., Gao K. Interactions of anthropogenic stress factors on marine phytoplankton // *Frontiers in environmental science*. 2015. V. 3. Article 14. P 1–14.
2. Oguz T., Glibert D. Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960–2000: Evidence for regime-shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations // *Deep-Sea Res. I*. 2007. V. 54. P. 220–242.
3. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Черное и Азовское моря: сравнительный анализ изменчивости температуры поверхности (1982–2009 гг., спутниковая информация) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8, № 4. С. 209–218.
4. Пархоменко А.В., Кривенко О.В. Оценка биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948–2001 гг. // В кн.: *Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей*. Севастополь: ЭКО-СИ-Гидрофизика, 2008. С. 237–249.
5. *Regional climate and patterns of phytoplankton annual succession in the open waters of the Black Sea* / A.S. Mikaelyan, A.A. Kubryakov, V.A. Silkin [et al.] // *Deep-Sea Res. Part I*. 2018. V. 142. P. 44–57.
6. Репетин Л.Н. Пространственная и временная изменчивость температурного режима прибрежной зоны Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2012. Вып. 26. С. 99–116.
7. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е.И. Овсяный, А.С. Романов, Р.Я. Миньковская [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2001. Вып. 2. С. 138–152.
8. Селифонова Ж.П., Ясакова О.Н. Фитопланктон акваторий портовых городов северо-восточного шельфа Чёрного моря // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11. № 4. С. 67–77.
9. Warming will affect phytoplankton differently: evidence through a mechanistic approach / E. Huerstas, M. Rouco, V. Lopez-Rodes [et al.] // *Proc. R. Soc. B*. 2011. V. 278. P. 3534–3543.
10. Akimov A.I., Solomonova E.S. Characteristics of Growth and Fluorescence of Certain Types of Algae during Acclimation to Different Temperatures under Culture Conditions // *Oceanology*. 2019. Vol. 59. Iss. 3. P. 316–326.

11. *Стельмах Л.В.* Влияние температуры на сезонную и межгодовую изменчивость некоторых структурно-функциональных характеристик фитопланктона прибрежных вод Черного моря (район Севастополя) // *Вопросы современной альгологии*. 2019. № 1 (19). С. 46–56.
12. *Pluses and minuses of ammonium and nitrate uptake and assimilation by phytoplankton and implications for productivity and community composition, with emphasis on nitrogen-enriched conditions / P.M. Glibert, F.P. Wilkerson, R.C. Dugdale [et al.] // Limnology and Oceanography*. 2016. V. 61. P. 165–197.
13. *Impacts of warming on phytoplankton abundance and phenology in a typical tropical marine ecosystem / J.A. Gittings, D.E. Raitsos, G. Krokos [et al.] // Scientific reports*. 2018. Vol. 8. Article 2240. P. 1–12.
14. *Зайцев Ю.П.* Введение в экологию Черного моря. Одесса: Эвен, 2006. 224 с.
15. *Использование переменной флуоресценции хлорофилла in vivo для оценки функционального состояния фитопланктона / Л.В. Стельмах, Е.А. Куфтаркова, А.И. Акимов [и др.] // Системы контроля окружающей среды*. 2010. Вып. 13. С. 263–268.
16. *Стельмах Л.В.* Функциональное состояние и некоторые структурные характеристики морских планктонных водорослей при разном уровне обеспеченности биогенными веществами // *Вопросы современной альгологии*. 2018. № 1(16). URL: <http://algology.ru/1252>.
17. *Использование флуоресценции хлорофилла а для биотестирования водной среды / В.А. Осипов, Г.М. Абдурахманов, А.А. Гаджиев [et al.] // Юг России: экология, развитие*. № 2, 2012. С. 93–100.
18. *Schmoker C., Hernandez-Leon S., Calbet A.* Microzooplankton grazing in the oceans: impacts, data variability, knowledge gaps and future directions // *Journal of Plankton Research*. 2013. Vol. 35. P. 691–706.
19. *Microplankton dynamics under heavy anthropogenic pressure. The case of the Bahía Blanca Estuary, southwestern Atlantic Ocean / M.C.L. Abbate, J.C. Molinero, V.A. Guinder [et al.] // Marine Pollution Bulletin Volume 95, Issue 1*, 2015. P. 305–314.
20. *Microzooplankton as bioindicator of environmental degradation in the Amazon / B.N.S. Costa, S.C.C. Pienheiro, L.L. Amado [et al.] // Ecological Indicators*. 2016. V. 61. Part 2. P. 526–545.
21. *Caron D.A., Hutchins D.A.* The effects of changing climate on microzooplankton grazing and community structure: drivers, predictions and knowledge gaps // *J. Plankton Res.* 2013. Vol. 35. P. 235–252.
22. *Сезонная динамика структурных и функциональных показателей фитопланктонного сообщества в Севастопольской бухте / З.З. Финенко, Л.В. Стельмах, И.М. Мансурова [и др.] // Системы контроля окружающей среды*. 2017. Вып. 9 (29). С. 73–82.

METHODOLOGY OF COMPREHENSIVE MONITORING OF MODERN BLACK SEA PHYTOPLANKTON COMMUNITY STATUS

L.V. Stelmakh

The A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of RAS, Sevastopol, Nachimov Av., 2

The substantiation of the methodology for the monitoring of the phytoplankton community state of the Black Sea coastal waters under global warming and increased anthropogenic pollution is given. An integrated approach based on the determination of seasonal and interannual variability of structural and functional parameters of phytoplankton, the rate of its consumption by microzooplankton, as well as a quantitative assessment of the main hydrological and hydrochemical parameters reflecting the state of the aquatic environment is proposed. Such results will help identify the main trends in the phytoplankton community at the present stage of the Black Sea ecosystem development, as well as predict the possible ways of its further development in the context of global climate change and anthropogenic press.

Key words: phytoplankton, the Black Sea, climate change, anthropogenic pollution.