



УДК: 574.583:577.1(262.5)

ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТАДИЙ ПРОДУКЦИОННО-ДЕСТРУКЦИОННОЙ СУКЦЕССИИ МИКРОПЛАНКТОНА КРЫМ-СКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ И ГЛУБОКОВОДЬЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АТФ И ХЛОРОФИЛЛА α

© 2020 А. А. Сысоев, И. В. Сысоева

ФИЦ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН («ИнБИОМ»),
Севастополь 299011, Россия
E-mail: alexsysoev@yandex.ru

Аннотация. На основе данных, полученных в научных экспедиционных рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в январе, апреле, октябре 2016 г. и в июле 2017 г., проанализированы пространственно-временные изменения распределения АТФ и хлорофилла α микропланктона как показатели общей метаболически активной биомассы сообщества и фотоавтотрофной его части, соответственно. Из соотношений концентраций этих биохимических показателей рассчитан гетеротрофно-фотоавтотрофный индекс (НПИ), который использован для оценки стадий продукционно-деструкционной сукцессии сообщества в указанные сезоны. Участки исследованных акваторий, на которых наиболее часто отражаются резкие отличия биохимических показателей микропланктона от общего фона, можно принять во внимание как аномальные, подверженные антропогенному воздействию, главным образом связанные с бытовыми и промышленными стоками. В целом в порядке сравнения распределения метаболически активной биомассы и продукционной его части в указанные сезоны сходство величин проявилось в прибрежном мелководье Крыма: низкие — с оценкой олиго-мезотрофные — у западной части полуострова, повышенные — с оценкой мезо-эвтрофные — у восточной, в водах, прилегающих к Керченскому проливу. Судя по величинам НПИ, в исследованных водах наиболее перспективная ситуация к развитию биомассы микропланктона и повышению продуктивности вод была отмечена в осенний сезон. Вероятно, это является одним из ключевых факторов сезонной миграции некоторых видов рыб из Азовского моря в Черное в осенне-зимний сезон.

Ключевые слова: Черное море, Крым, прибрежные воды, микропланктон, АТФ, хлорофилл α , гетеротрофно-фотоавтотрофный индекс, сезонные изменения

ASSESSMENT OF SEASONAL VARIATIONS AT THE STAGES OF PRODUCTION AND DESTRUCTION SUCCESSION IN THE MICROPLANKTON OFF THE CRIMEAN COAST AND DEEP WATERS OF THE NORTHERN BLACK SEA ON THE BASIS OF ATP AND CHLOROPHYLL α ANALYSIS

A. A. Sysoev, I. V. Sysoeva

*FRC Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS ("IBSS"), Sevastopol 299011, Russia
E-mail: alexsysoev@yandex.ru*

Abstract. Based on the data collected during scientific expeditions of RV "Professor Vodyanitsky" in January, April, October 2016 and July 2017, spatial and temporal changes in distribution of microplankton ATP and chlorophyll α as indicators of metabolically active biomass and its photoautotrophic part, respectively, were analyzed. The heterotrophic-photoautotrophic index (HPI) was calculated from ratios of these biochemical parameters and used to assess the stages of production and destruction succession of microplankton community over these seasons. In the investigated area, the sites, which most often demonstrate sharp differences in biochemical parameters of microplankton from the general background, can be considered anomalous and subjected to anthropogenic impact, mainly associated with household and industrial effluents. In general, upon comparison of the distribution of the metabolically active biomass and its production part in the specified seasons the similarity in the values manifested itself in the shallow coastal waters of Crimea: low values for the waters near the western part of the peninsula were assessed to be oligo-mesotrophic; increased values for the waters adjacent to the Kerch Strait in the east were found to be meso-eutrophic. Based on the HPI values, the situation, most promising in terms of development of microplankton biomass and increase in water productivity was observed in the investigated area in autumn. Quite possibly, it is one of the key factors affecting seasonal migration of some fish species from the Azov Sea to the Black Sea in the autumn-winter season.

Keywords: Black Sea, Crimea, coastal waters, microplankton, ATP, chlorophyll α , heterotrophic-photoautotrophic index, seasonal variations

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность вод пелагиали находится в зависимости от состояния первичного трофического звена — микропланктона. Информация об обилии и потенциале развития биомассы этого сообщества является ключевой для оценки стадий продукционно-деструкционной сукцессии, позволяет прогнозировать вектор развития кормовой базы для консументов этого трофического звена на ближайшую временную перспективу. Известно, что в водах умеренных широт изменения продукционно-деструкционной сукцессии микропланктонного сообщества имеют определенную сезонную периодичность [1]. В связи с этим исследования сезонной динамики стадий продукционно-деструкционной сукцессии микропланктона являются важным элементом в изучении продуктивности вод Черного моря, в особенности в районах черноморского побережья, где обитают промысловые виды рыб. Проводившиеся ранее авторами подобные работы в этом регионе не носили системный характер и содержали временные интервалы в несколько лет.

Работа основана на материале, собранном в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в январе, апреле, октябре 2016 г. и в июле 2017 г. Рассмотрены вариации распределения АТФ и хлорофилла α микропланктона как показатели метаболически активной (живой) биомассы и продукционного потенциала, соответственно. Применен метод оценки соотношений биомасс гетеротрофной и фотоавтотрофной составляющих микропланктона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы микропланктона отбирали батометрами зонда Sea Bird's. Непосредственно после отбора пробы объемом 1,5 л осаждали методом вакуумной фильтрации на нитроцеллюлозные мембранные фильтры Sartorius диаметром 47 мм с размерами пор 0,45 мкм — для анализов АТФ и хлорофилла α микропланктона. Рабочее вакуумное разрежение составляло -0,2– -0,4 атм. Фильтры с осажденными пробами для анализа хлорофилла α высушивали в темном месте. Экстракцию АТФ проводили методом Холм-Хансена [2]: фильтры с осажденными

пробами помещали в центрифужные пробирки, заливали 5 мл кипящего трис-ЭДТА-ацетатного буфера (рН=7,75) и выдерживали в кипящей водяной бане в течение 5 мин. Затем экстракты разливали и укупоривали в пластиковые кюветы. Высушенные фильтры для анализа хлорофилла α и кюветы с экстрактами АТФ хранили в морозильной камере при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до дальнейшей обработки.

Для анализа хлорофилла α нитроцеллюлозные фильтры растворяли в 90%-ном ацетоне, центрифугировали. Экстинкцию полученных элюатов измеряли на спектрофотометре Spocol-11 (Carl Zeiss Jena). Расчет концентрации проводили по формуле Джеффри и Хамфри [3].

Анализ АТФ проводили хемилюминесцентным методом с добавлением в экстракт светлякового энзима — люциферин-люциферазу. Световую эмиссию реакции измеряли на приборе ATP Luminometer 1250, (LKB).

Трофность вод оценивали по концентрациям АТФ и хлорофилла α микропланктона согласно критериям Карла [4]. Гетеротрофно-фотоавтотрофный индекс (НРІ), рассчитываемый по формуле: $\text{НРІ} = (\text{САТФ} / \text{Схлороф.}\alpha) \cdot 100$, при величинах 10–20 означает паритетное соотношение биомасс гетеротрофных и фотоавтотрофных организмов микропланктонного сообщества. Значения индекса >20 свидетельствуют о гетеротрофном доминировании, <10 — о фотоавтотрофном, согласно критериям, разработанным Чиаудани и Пагнотта [5]. Используя НРІ, можно оценить стадию продукционно-деструкционной сукцессии сообщества, адаптируя к критериям, разработанным М.Е. Виноградовым

и Э.А. Шушкиной [6]. Карты распределения изучаемых параметров выполнены с использованием компьютерных программ Hydro 5.32-2 и Surfer 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе представлены данные интегральных значений концентраций биохимических параметров с различных горизонтов самого продуктивного — верхнего — фотического слоя (от 0 до 30 м).

В зимний сезон наиболее высокие значения содержания АТФ были зафиксированы в акваториях, прилегающих к крупным городам: Севастополю, Ялте и Феодосии (рис. 1). Концентрации АТФ на этих участках имели значения мезотрофных вод, в то время как в большинстве остальных исследованных акваторий отмечены олиготрофные значения. Распределение хлорофилла α имело в значительной мере иную картину. Наиболее высокие концентрации были отмечены по обе стороны от южной оконечности полуострова и имели значения, близкие к эвтрофным (рис. 2). Значения НРІ показали повсеместное преобладание гетеротрофной части биомассы микропланктона над фотоавтотрофной. Стадию продукционно-деструкционной сукцессии можно оценить как зрелую (рис. 3).

В весенний сезон показатели АТФ в целом имели мезотрофные значения, повышенные концентрации были отмечены в водах, прилегающих к Ялте, и в северо-западном побережье Крыма (рис. 4). Концентрации хлорофилла α также укладывались в диапазон мезотрофного значения. Повышенные концентрации были обнаружены в акватории, при-

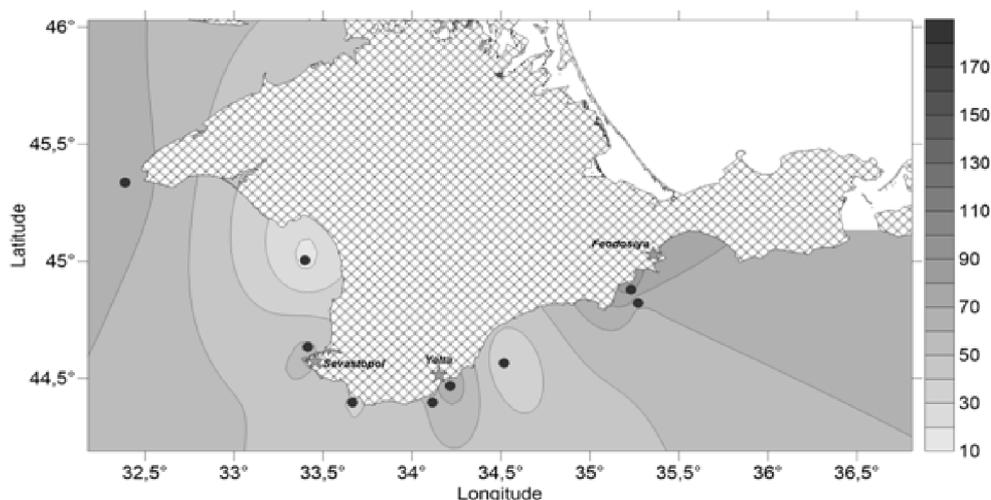


Рис. 1. Распределение АТФ микропланктона (ng l^{-1}) в черноморском побережье Крыма в зимний сезон

Fig. 1. Distribution of microplankton ATP (ng l^{-1}) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the winter season

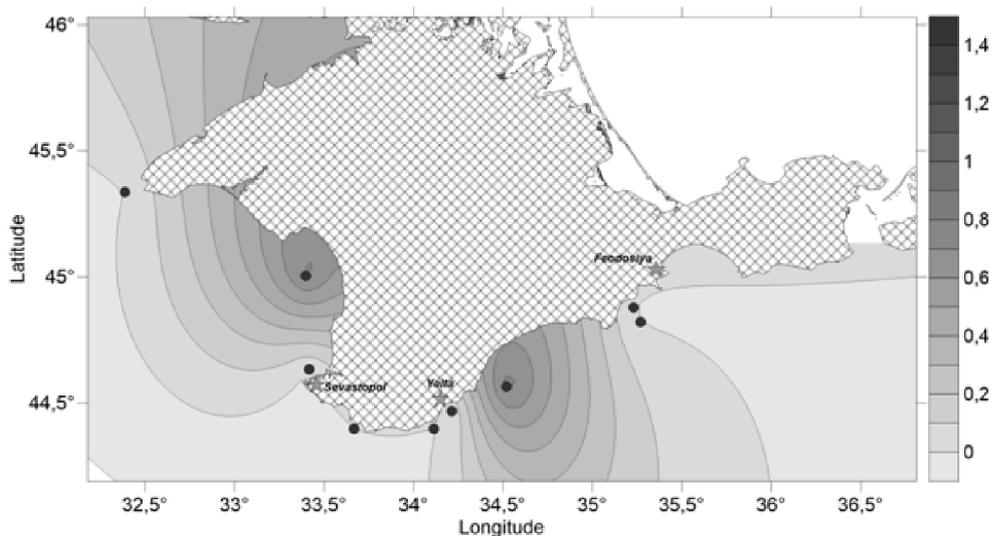


Рис. 2. Распределение хлорофилла α микропланктона ($\mu\text{g l}^{-1}$) в черноморском прибрежье Крыма в зимний сезон

Fig. 2. Distribution of microplankton chlorophyll α ($\mu\text{g l}^{-1}$) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the winter season

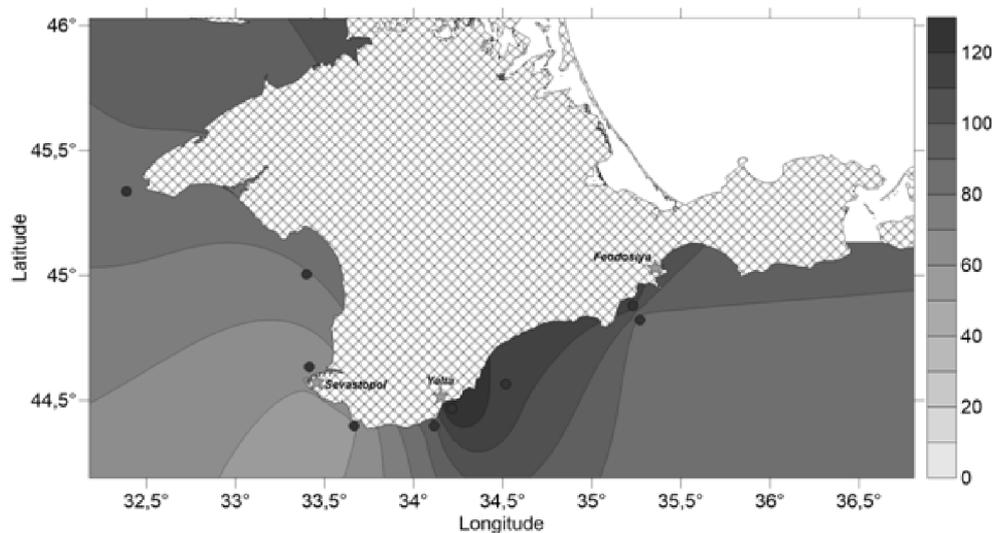


Рис. 3. Распределение НРІ в черноморском прибрежье Крыма в зимний сезон

Fig. 3. Distribution of the NPI in the Black Sea coastal waters of Crimea in the winter season

легающей к Феодосии (рис. 5). Судя по значениям НР-индекса, высокие концентрации АТФ у северо-западного побережья Крыма были обусловлены главным образом гетеротрофным микропланктоном, повышенные значения биомассы фотоавтотрофного микропланктона отмечены лишь в районе Феодосии и в акватории, прилегающей к Севастополю (рис. 6). Стадию продукционно-деструкционной сукцессии в целом можно охарактеризовать как развитую.

В летний сезон, по данным концентраций АТФ, зафиксированы мезотрофные значения концентраций в небольшом диапазоне вариаций. Повышен-

ные показатели метаболически активной биомассы микропланктона отмечены в водах у северо-западной оконечности полуострова и в районе, прилегающем к Керченскому проливу (рис. 7). Значения концентраций хлорофилла α также укладывались в диапазон мезотрофных вод, повышенные концентрации отмечены к северу от Севастополя и в районе Феодосии (рис. 8). Согласно значениям НРІ, на большей части исследованной акватории преобладала гетеротрофная часть биомассы микропланктона, исключения составляли участки, прилегающие к Ялте и Феодосии (рис. 9). Стадию продукционно-деструкционной сукцессии можно охарактеризовать как зрелую.

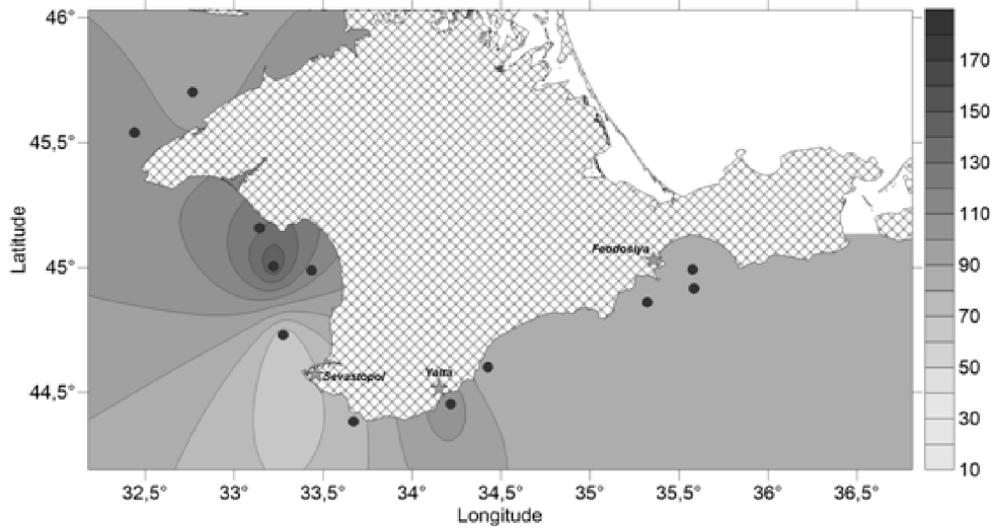


Рис. 4. Распределение АТФ микропланктона (ng l^{-1}) в черноморском побережье Крыма в весенний сезон
Fig. 4. Distribution of microplankton ATP (ng l^{-1}) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the spring season

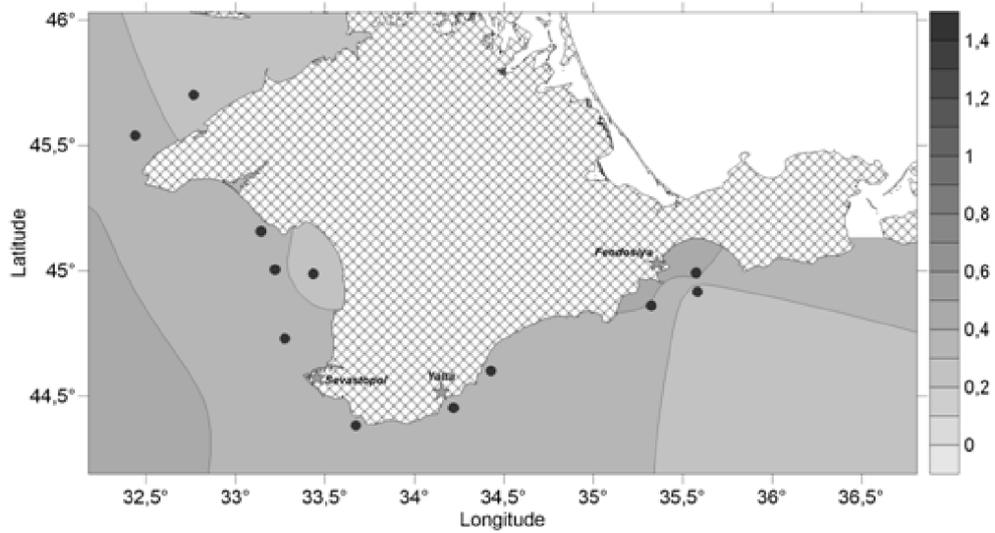


Рис. 5. Распределение хлорофилла α микропланктона ($\mu\text{g l}^{-1}$) в черноморском побережье Крыма в весенний сезон
Fig. 5. Distribution of microplankton chlorophyll α ($\mu\text{g l}^{-1}$) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the spring season

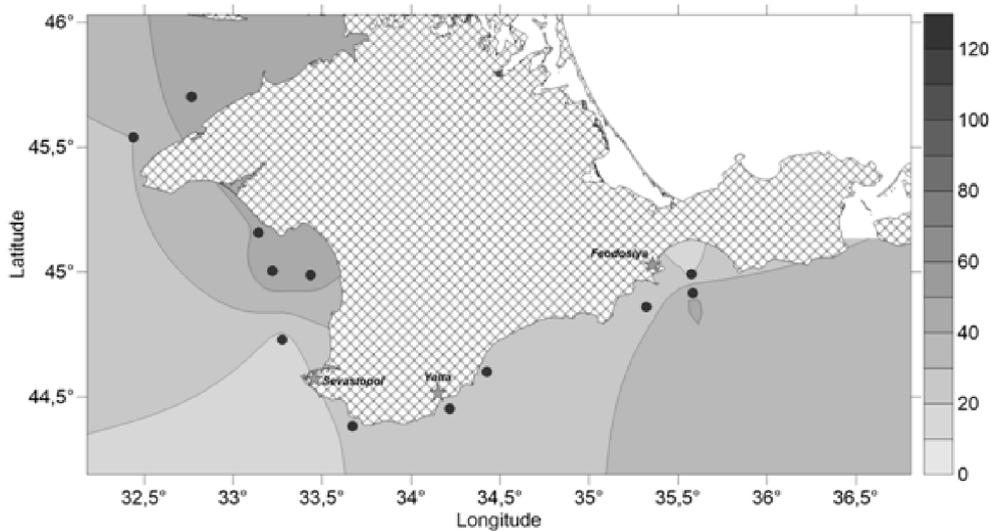


Рис. 6. Распределение НРІ в черноморском побережье Крыма в весенний сезон
Fig. 6. Distribution of the HPI in the Black Sea coastal waters of Crimea in the spring season

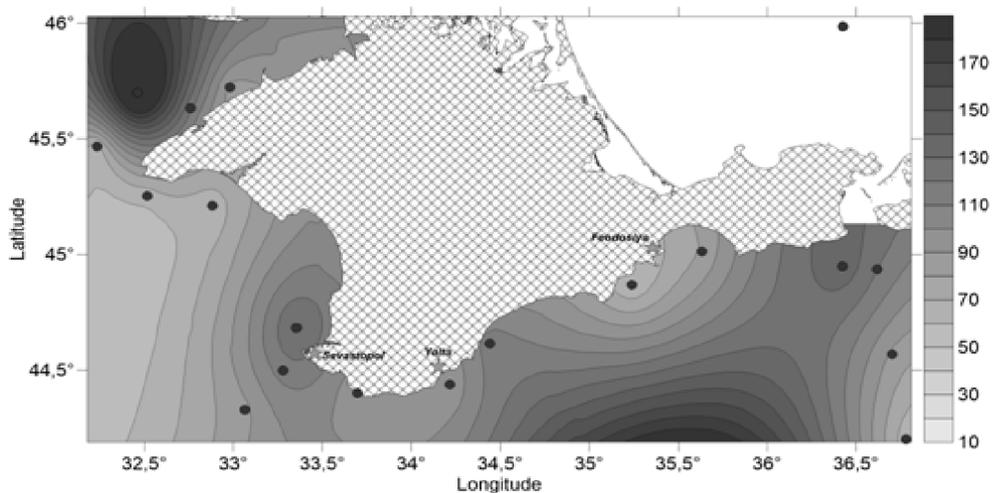


Рис. 7. Распределение АТФ микропланктона (ng l^{-1}) в черноморском побережье Крыма в летний сезон
Fig. 7. Distribution of microplankton ATP (ng l^{-1}) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the summer season

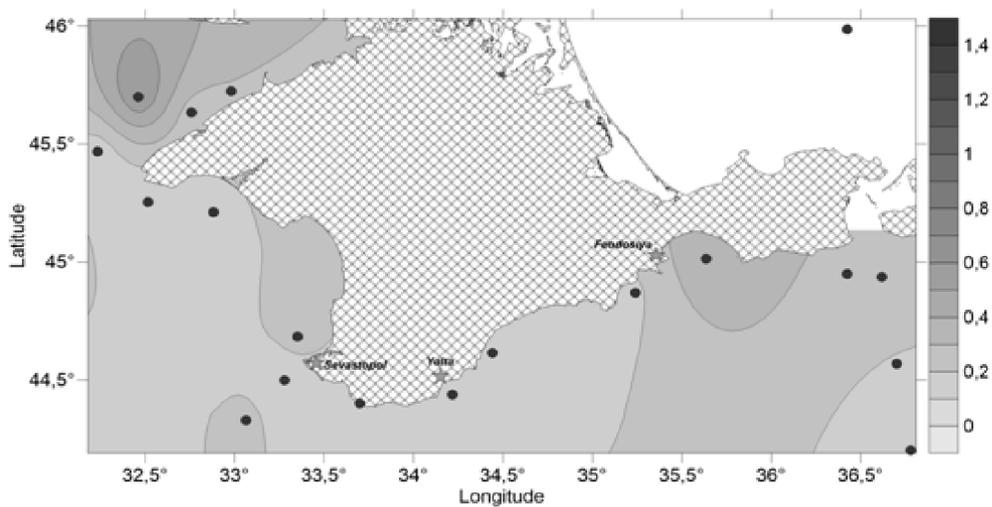


Рис. 8. Распределение хлорофилла α микропланктона ($\mu\text{g l}^{-1}$) в черноморском побережье Крыма в летний сезон
Fig. 8. Distribution of microplankton chlorophyll α ($\mu\text{g l}^{-1}$) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the summer season

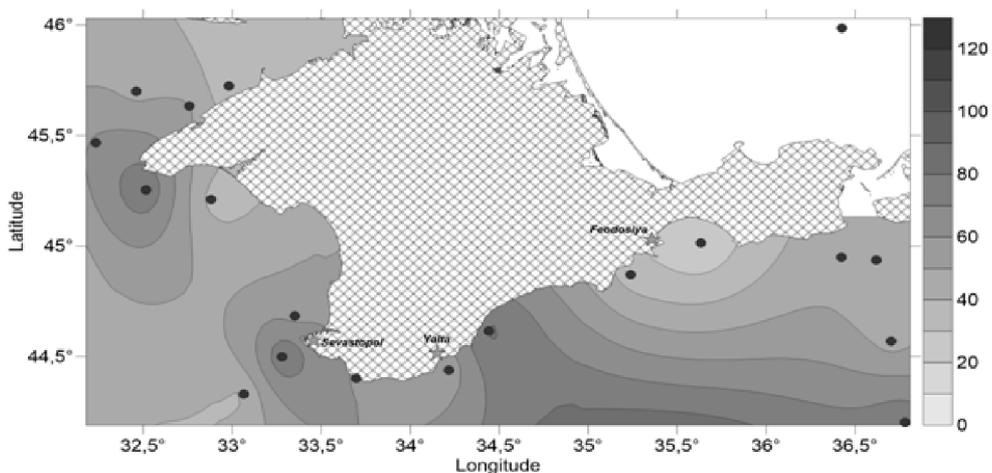


Рис. 9. Распределение НРІ в черноморском побережье Крыма в летний сезон
Fig. 9. Distribution of the HPI in the Black Sea coastal waters of Crimea in the summer season

В *осенний* сезон при общих мезотрофных значениях наибольшие концентрации АТФ отмечены в акватории, прилегающей с юга к Ялте, наименьшие — в водах, прилегающих к Севастополю (рис. 10). Концентрации хлорофилла α на фоне мезотрофных значений в целом по исследованной акватории выделяются эвтрофными величинами в водах, прилегающих к Феодосии (рис. 11). Соответственно этому, значения НР-индекса в этом районе указывают на доминирование фотоавтотрофной биомассы микропланктона над гетеротрофной, в то время как остальная исследованная акватория побережья имеет статус паритетных значений биомасс гетеротрофного и фотоавтотрофного микропланктона либо слабое доминирование гетеро-

трофов (рис. 12). Стадию продукционно-деструкционной сукцессии можно охарактеризовать как развивающуюся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, используя оперативные методы анализа биохимических показателей микропланктона АТФ и хлорофилла α по рассчитанному из них гетеротрофно-фотоавтотрофному индексу, можно дать оценку стадий продукционно-деструкционной сукцессии микропланктонного сообщества. Участки исследованных акваторий, на которых наиболее часто наблюдаются резкие отличия биохимических показателей микропланктона от общего фона, можно принять во внимание как аномальные,

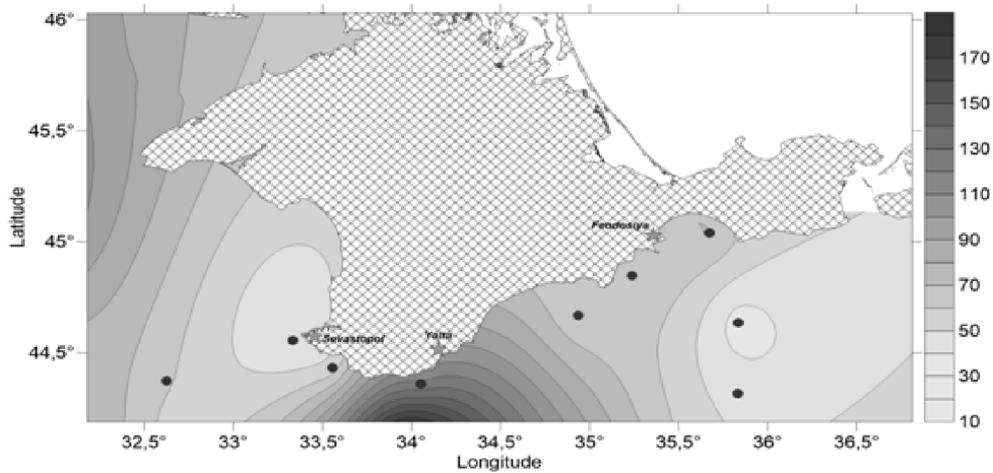


Рис. 10. Распределение АТФ микропланктона (ng l^{-1}) в черноморском побережье Крыма в осенний сезон

Fig. 10. Distribution of microplankton ATP (ng l^{-1}) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the autumn season

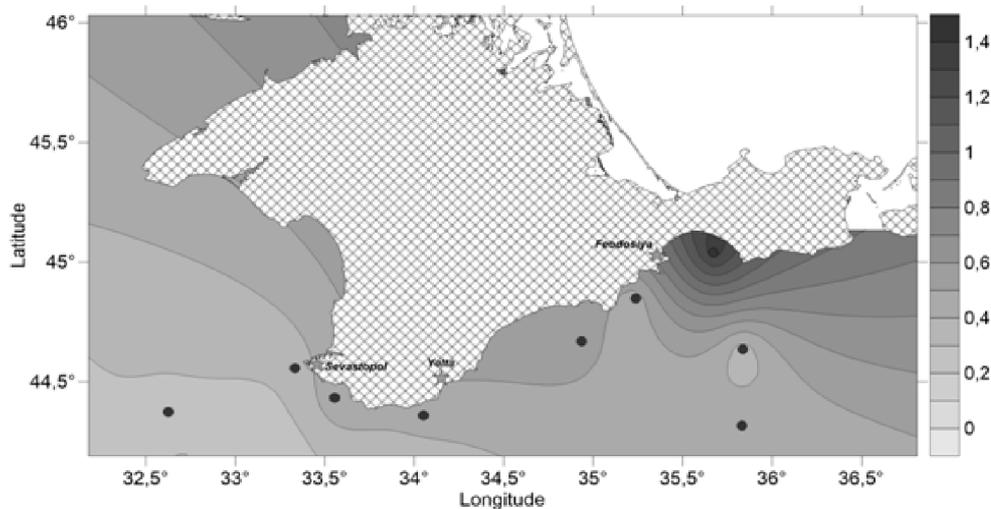


Рис. 11. Распределение хлорофилла α микропланктона ($\mu\text{g l}^{-1}$) в черноморском побережье Крыма в осенний сезон

Fig. 11. Distribution of microplankton chlorophyll α ($\mu\text{g l}^{-1}$) in the Black Sea coastal waters of Crimea in the autumn season

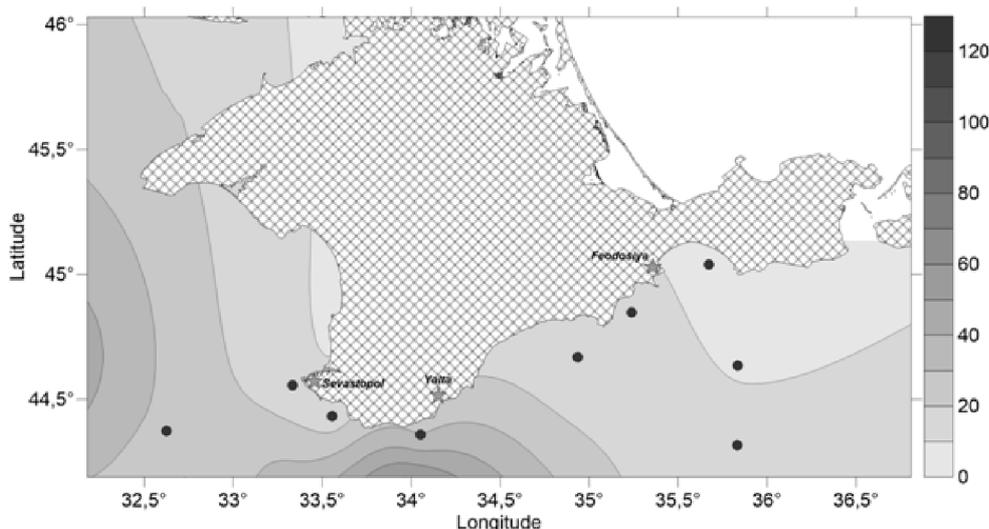


Рис. 12. Распределение НПИ в черноморском побережье Крыма в осенний сезон

Fig. 12. Distribution of the HPI in the Black Sea coastal waters of Crimea in the autumn season

подверженные антропогенному воздействию, главным образом связанные с бытовыми и промышленными стоками.

В целом в порядке сравнения распределения метаболически активной биомассы и продукционной ее части в указанные сезоны сходство величин проявилось в прибрежном мелководье Крыма: низкие — с оценкой олиго-мезотрофные — у западной части полуострова, повышенные — с оценкой мезо-эвтрофные — у восточной, в водах, прилегающих к Керченскому проливу. При сравнении распределения метаболически активной биомассы и гетеротрофно-фотоавтотрофного индекса на большей части исследованной акватории проявилось пространственное сходство высоких показателей общей биомассы микропланктона и показателя потенциала первичной продукции. Исключения составляют районы с высокими значениями НПИ. Судя по величинам НПИ, в исследованных водах наиболее перспективная ситуация к развитию биомассы микропланктона и повышению продуктивности вод была отмечена в осенний сезон. Вероятно, это является одним из ключевых факторов сезонной миграции некоторых видов рыб из Азовского моря в Черное в осенне-зимний сезон.

Работа выполнена по темам НИР: № АААА-А18-118021430098-4; № 0828-2018-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Некоторые биологические особенности планктонных сообществ умеренно-холодных районов Северного полушария // *Океанология. Биология*

океана. Т. 2. Биологическая продуктивность океана / Под ред. А.С. Мони́на. М.: Наука, 1977. С. 56–58.

2. Holm-Hansen O., Booth C.R. The measurement of adenosine triphosphate in the ocean and its ecological significance // *Limnology and Oceanography*. 1966. Vol. 11, issue 4. Pp. 510–519. doi: 10.4319/lo.1966.11.4.0510.
3. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975. Vol. 167, issue 2. Pp. 191–194. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
4. Karl D.M. Cellular nucleotide measurements and applications in microbial ecology // *Microbiological Reviews*. 1980. No. 44. Pp. 739–796.
5. Chiaudani G., Pagnotta R. Ratio ATP/chlorophyll as an index of river's water quality // *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*. 1978. No. 20. Pp. 1897–1901.
6. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Сукцессия морских планктонных сообществ // *Океанология*. 1983. Т. 23, вып. 4. С. 633–639.

REFERENCES

1. Nekotorye biologicheskie osobennosti planktonnykh soobshchestv umerenno-kholodnovodnykh rayonov Severnogo polushariya [Some biological features of the plankton communities in the temperate cold-water regions of the Northern Hemisphere]. In: *Okeanologiya. Biologiya okeana. T. 2. Biologicheskaya produktivnost' okeana* [Oceanology. Ocean biology. Vol. 2. Biological productivity of the ocean]. A.S. Monin. (Ed.). Moscow: Nauka [Science], 1977, pp. 56–58. (In Russian).

2. Holm-Hansen O., Booth C.R. The measurement of adenosine triphosphate in the ocean and its ecological significance. *Limnology and Oceanography*, 1966, vol. 11, issue 4, pp. 510–519. doi: 10.4319/lo.1966.11.4.0510.
3. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a , b , c_1 and c_2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, vol. 167, issue 2, pp. 191–194. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
4. Karl D.M. Cellular nucleotide measurements and applications in microbial ecology. *Microbiological Reviews*, 1980, no. 44, pp. 739–796.
5. Chiaudani G., Pagnotta R. Ratio ATP/chlorophyll as an index of river's water quality. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 1978, no. 20, pp. 1897–1901.
6. Vinogradov M.E., Shushkina E.A. Suktsessiya morskikh planktonnykh soobshchestv [Succession of marine planktonic communities]. *Okeanologiya [Oceanology]*, 1983, vol. 23, issue 4, pp. 633–639. (In Russian).

Поступила 25.10.2019

Принята к печати 27.12.2019