

УДК 574.524

СУДОВОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ: ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЛАГИЧЕСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

© 2015 г. Е. Г. Арашкевич¹, Н. Е. Луппова², А. Б. Никишина¹, Л. А. Паутова¹, В. К. Часовников², А. В. Дриц¹, О. И. Подымов², Н. Д. Романова¹, Р. Р. Станичная³, А. Г. Зацепин¹, С. Б. Куклев², М. В. Флинт¹

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва
e-mail: aelena@ocean.ru

²Южное отделение Института океанологии им. П.П. Шишова РАН, Геленджик

³Морской гидрофизический институт, Севастополь

Поступила в редакцию 16.05.2015 г.

На основании данных мульти-дисциплинарного мониторинга, выполненного в 2005–2014 гг., проведена оценка состояния прибрежной пелагической экосистемы северо-восточной части Черного моря. Проанализированы сезонные и межгодовые изменения поверхностной температуры моря (SST), концентрации хлорофилла “а”, концентрации биогенных элементов (кремния, азота и фосфора), биомассы и таксономического состава фито- и зоопланктона, а также желетелого макропланктона. Линейный тренд показал увеличение среднегодовых значений SST на 0.9°C за десять последних лет. Увеличение зимней SST сопровождалось уменьшением концентрации кремния весной ($p < 0.05$), а увеличение летней SST – уменьшением концентрации хлорофилла “а” и биомассы диатомовых водорослей в летне-осенний период ($p < 0.05$). На развитие диатомовых водорослей отрицательное влияние также оказывало снижение концентрации фосфора ($p < 0.01$). Снижение биомассы диатомовых вызывало уменьшение биомассы растительного зоопланктона во второй половине года ($p = 0.05$). Корреляционный анализ не выявил достоверных связей между биомассой медуз и гребневиков и биомассой мезозоопланктона. Современное состояние пелагической экосистемы шельфа оценено как стабильное, однако в последние два года наметилась тенденция к уменьшению биомассы и изменению таксономического состава фито- и зоопланктона, которое, вероятно, связано как с прямым, так и опосредованным влиянием повышения температуры верхнего слоя моря.

DOI: 10.7868/S0030157415060015

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие на шельфе, оказывают существенное влияние на функционирование всей пелагической экосистемы. Благодаря береговому стоку, шельф является, с одной стороны, наиболее продуктивной областью моря, а с другой стороны, областью, наиболее подверженной антропогенному загрязнению. Разномасштабные гидродинамические процессы определяют достаточно интенсивный водообмен узкого северо-восточного шельфа Черного моря с глубоким морем [10].

В настоящей работе мы рассматриваем некоторые результаты десятилетнего (2005–2014 гг.) мульти-дисциплинарного мониторинга, выполненного в шельфовой зоне Черного моря в районе г. Геленджика. Основная цель работы – оценка современного состояния прибрежной пелагической экосистемы и ее отклик на изменение регионального климата. В рамках этой основной цели решаются следующие конкретные задачи:

Анализ сезонных и межгодовых изменений поверхностной температуры и хлорофилла (хл “а”) и их возможного влияния на пелагическую экосистему;

Исследование сезонных и межгодовых изменений гидрохимических и биологических параметров;

Исследование многолетних трендов биомассы и структуры мезо- и макрозоопланктона;

Анализ взаимосвязей между различными компонентами экосистемы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полевой материал был собран на срединном шельфе северо-восточной части Черного моря (район г. Геленджика) на станции с глубиной места 50 м с борта НИС “Акванавт” в 2005–2008 гг. и МНИС “Ашамба” в 2009–2014 гг. Пробы собирались ежемесячно с марта–апреля по октябрь–ноябрь.

Пробы для измерения концентрации биогенных элементов и фитопланктона были собраны батометрами Нискина комплекса *Rosett SeaBird SBE 556* на глубинах 0, 10, 20 и 50 м, а также в слое максимума флуоресценции, определенного предварительным зондированием STD-зондом, оснащенным датчиком флуоресценции. Концентрация хл “а” измерялась в пробах, отобранных из приповерхностного слоя моря.

Определение содержания биогенов в воде проводилось в соответствии с [1]: неорганический фосфор (PO_4) определялся колориметрически модифицированным методом Морфи и Райли; силикаты (Si) определялись колориметрически по голубому кремнево-молибденовому комплексу (метод Королева); нитриты (NO_2) определялись колориметрически; нитраты (NO_3) определялись колориметрически после восстановления на кадмиевых колонках до нитритного азота; аммонийный азот (NH_4) определяли колориметрически методом Сэджи–Солорзано.

Для измерения концентрации хл “а” воду фильтровали через фильтры GF/F. Экстракцию проводили 90-% ацетоном при температуре $+4^\circ C$ в темноте в течение 24 ч. Флуоресценция экстрактов была измерена на флуорометре *Trilogy Turner Designs* (США). Концентрацию хл “а” и феопигментов рассчитывали по формуле [9].

Пробы фитопланктона фиксировали нейтрализованным формалином (конечная концентрация 1%). После отстаивания пробы были декантированы до объема 10–15 мл. Обработку проб проводили методом световой микроскопии в камерах Ножотта (0.05 мл) и Наумана (1.0 мл). Для выражения биомассы фитопланктона в единицах углерода использовали уравнение [5] зависимости содержания углерода в клетке от ее объема.

Сбор проб зоопланктона проводили сетными вертикальными ловами от дна до поверхности. Мезозоопланктон собирали сетью Джели (площадь входного отверстия 0.1 м^2 , размер ячеек 180 мкм). Пробы фиксировали 4% раствором формалина, нейтрализованного бурой. Для определения индивидуального веса животных в единицах углерода использовали формулы, приведенные в [3].

Макрзоопланктон (медуз и гребневиков) собирали конической сетью с площадью входного отверстия 0.5 м^2 и размером ячеек 500 мкм. Немедленно после отбора пробу переливали в просторный сосуд с морской водой. Желетельный макрозоопланктон (гребневиков и медуз) подсчитывали и измеряли в “живой” пробе. Животных поочередно переносили в прозрачный сосуд и измеряли их размер линейкой, приложенной ко дну сосуда: у гребневиков длину тела измеряли от абсорбального органа до рта; у медуз измеряли диаметр купола. Вес тела в единицах углерода определяли по формулам зависимости содержания уг-

лерода от длины тела, полученных для гребневиков *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata* [4] и медуз *Aurelia aurita* [2] Черного моря.

Были проанализированы среднемесячные ряды данных по температуре морской поверхности (SST) и концентрации хл “а”, полученные сканером MODIS спутника AQUA для района исследования. Для построения временных рядов спутниковых данных использовался сервис LAS (Live Access Server) архива PO DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) <http://thredds.jpl.nasa.gov/las/getUI.do>. В качестве средне-летних значений температуры брались данные за июнь–август, а средне-зимних – за январь–март. Концентрация хлорофилла рассчитывалась с использованием регионального алгоритма, верифицированного с привлечением данных, полученных *in-situ* в ходе выполнения мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Судовые и спутниковые данные позволяют констатировать, что исследуемый район характеризуется хорошо выраженным общим трендом повышения температуры приповерхностного слоя моря (SST) в 2005–2014 гг. (рис. 1). В этот период зимняя средняя SST равнялась $8.7 \pm 0.7^\circ C$, летняя средняя $-24.2 \pm 0.9^\circ C$ и годовая средняя $-16.1 \pm 0.6^\circ C$. Линейные тренды показывают увеличение среднегодовой и зимней температуры на $\sim 0.9^\circ C$, а летней – на $1.0^\circ C$ за десять лет. Самые высокие значения средне-летней и среднегодовой температуры зарегистрированы в 2010, 2012 и 2014 гг., а самая холодная зима была в 2012 г. На основании температурных аномалий можно выделить две фазы: первая (2005–2009 гг.) характеризуется температурой поверхности моря ниже средних значений; вторая (2010–2014 гг.), при сильно выраженных температурных флюктуациях, более теплая. Различия средней зимней, средней летней и среднегодовой температуры между этими фазами составило 0.76 , 1.12 и $0.69^\circ C$, соответственно. Как было показано [7], в Черном море характерным для последних десятилетий явлением является резкое чередование различных климатических фаз, вызывающее заметные изменения SST и перестройки в экосистеме пелагиали.

В отличие от температуры, значительного поступательного изменения концентрации хл “а” за последние десять лет не обнаружено (рис. 2), хотя заметен небольшой (2.4%) тренд к уменьшению среднегодовых значений. Средние значения концентрации поверхностного хлорофилла за десятилетний период для зимы, весны, лета и осени составили 0.69 ± 0.09 , 0.50 ± 0.10 , 0.40 ± 0.12 и $0.77 \pm 0.37 \text{ мг хл “а” / м}^3$, соответственно. Сравнение концентрации хл “а” по сезонам показало отсутствие достоверных различий между годами

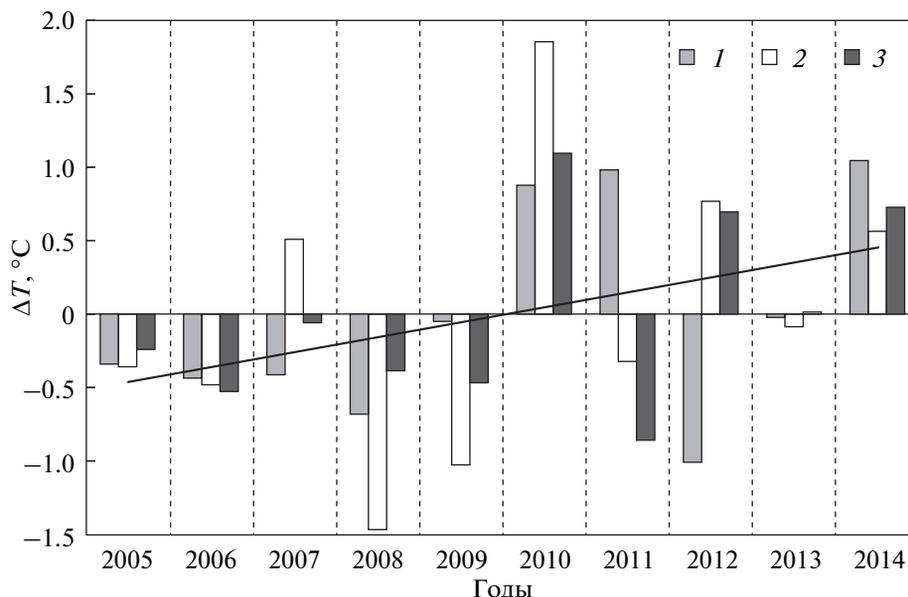


Рис. 1. Отклонение значений поверхностной температуры (ΔT) от средних значений для 2005–2014 гг. 1 – зимняя температура; 2 – летняя температура; 3 – среднегодовая температура. Линейный тренд среднегодовой температуры показан прямой линией.

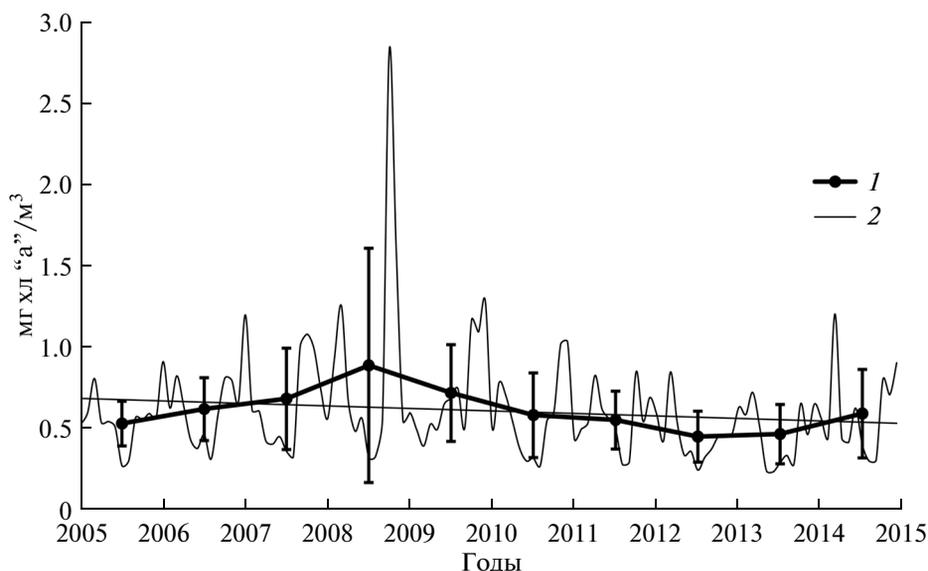


Рис. 2. Изменение концентрации поверхностного хл "а" в 2005–2014 гг. 1 – среднегодовая концентрация \pm SD; 2 – среднемесячные концентрации. Линейный тренд показан прямой линией.

для всех сезонов (ANOVA, $p = 0.2-0.5$), кроме лета (ANOVA, $p = 0.005$). Отрицательная зависимость концентрации хлорофилла от поверхностной температуры отмечена для всех периодов, но только для лета она оказалась достоверной ($r = 0.69$, $p < 0.05$). Существование такой зависимости может быть связано с формированием более ярко выраженного сезонного термоклина, кото-

рый препятствует поступлению биогенных элементов снизу в эвфотический слой.

Сезонная динамика концентрации кремния, фосфора, и растворенного минерального азота ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3 + \text{NH}_3$) характеризуется высокой изменчивостью (рис. 3), и, как следствие, отсутствием достоверных различий между сезонами (ANOVA, $p > 0.05$). Кратковременные локальные

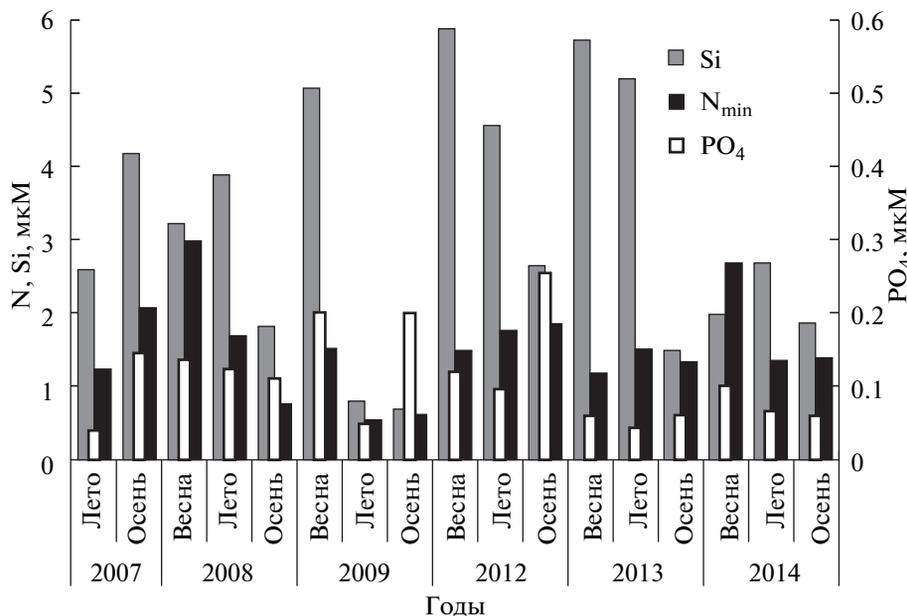


Рис. 3. Сезонная и межгодовая изменчивость концентрации кремния (Si), растворенного минерального азота (N_{\min}) и фосфора (PO_4) в слое 0–50 м на срединном шельфе северо-восточной части Черного моря.

изменения содержания биогенных элементов вследствие пульсации берегового стока, чередования апвеллингов и даунвеллингов, а также под воздействием жизнедеятельности биоты характерны для шельфовой области Черного моря. Общая тенденция состоит в уменьшении содержания кремния и минерального азота от весны к осени и заметном снижении содержания фосфора летом. Среднегодовые значения содержания кремния и азота практически не менялись за последние восемь лет, составляя 3.2 и 1.5 мкМ, соответственно, в то время как содержание фосфора снизилось с 0.13 мкМ в 2007–2009 гг. до 0.07 мкМ в 2013–2014 гг. Сходная тенденция изменений среднегодовой концентрации биогенных элементов в поверхностном 0–5 м слое в северо-восточной части Черного моря отмечалась для зимнего периода 2002–2010 гг. [8]. Анализ полученных данных не выявил влияния температуры на среднегодовую и сезонную концентрацию биогенных элементов ($p > 0.1$), и только концентрация кремния в весенний сезон отрицательно коррелировала с зимней температурой ($r = -0.73$, $p < 0.05$). Это позволяет предположить, что содержание в воде кремния в силу его большей консервативности в большей степени связано с интенсивностью зимней вертикальной конвекции, в то время как на концентрацию азота и фосфора в шельфовой зоне существенно влияет береговой сток.

Анализ сезонной динамики фитопланктона показал, что, при отсутствии выраженных изменений общей биомассы, прослеживаются закономерности изменения таксономической структу-

ры сообщества (рис. 4). Весной доминируют динофлагелляты и кокколитофориды, а летом и осенью, как правило, возрастает роль диатомовых водорослей. В последние три года (2012–2014 гг.) отмечено уменьшение общей биомассы фитопланктона по сравнению с 2007–2009 гг., главным образом за счет резкого падения количества диатомовых водорослей. Средние для этих 3-х летних периодов значения биомассы диатомовых уменьшились в восемь раз, в то время как биомасса кокколитофорид возросла приблизительно в два раза. Такой же сдвиг в таксономической структуре фитопланктона был отмечен и в глубоководной зоне моря [6] в период с 2002 по 2012 гг. Как показал корреляционный анализ, уменьшение биомассы диатомовых в летне-осенний сезон связано, главным образом, с изменением летней температуры ($r = -0.54$, $p = 0.025$) и концентрацией биогенных элементов. При этом корреляция отрицательна для кремния и минерального азота ($r = -0.61$ и $r = -0.69$, соответственно; $p < 0.05$) и положительна для фосфора ($r = 0.77$, $p < 0.01$). Эти результаты свидетельствуют о лимитирующей роли фосфора для развития диатомовых водорослей.

Межгодовые изменения биомассы мезозoopланктона представлены на рис. 5. Видно, что в 2013–2014 гг. произошло заметное снижение общей биомассы (3.5 ± 2.2 мг С/м³) по сравнению с предыдущими годами (8.2 ± 2.3 мг С/м³), главным образом за счет уменьшения биомассы растительных зоопланктеров, составляющих более 80% суммарной биомассы мезозoopланктона. Значительных межгодовых изменений таксоно-

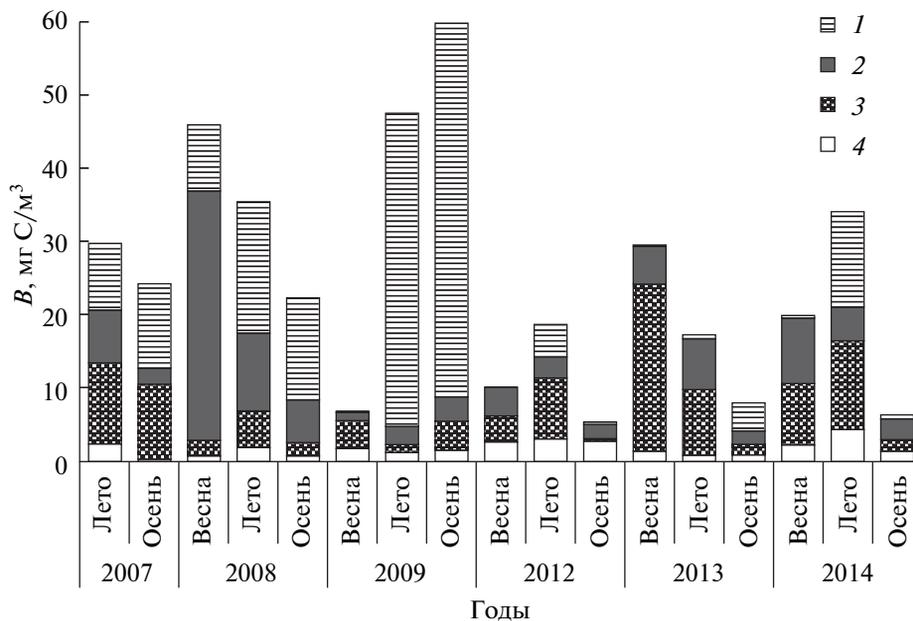


Рис. 4. Сезонная и межгодовая изменчивость биомассы фитопланктона (мг С/м^3) в слое 0–50 м на срединном шельфе северо-восточной части Черного моря.

1 – диатомовые; 2 – динофлагелляты; 3 – кокколитофориды; 4 – прочие.

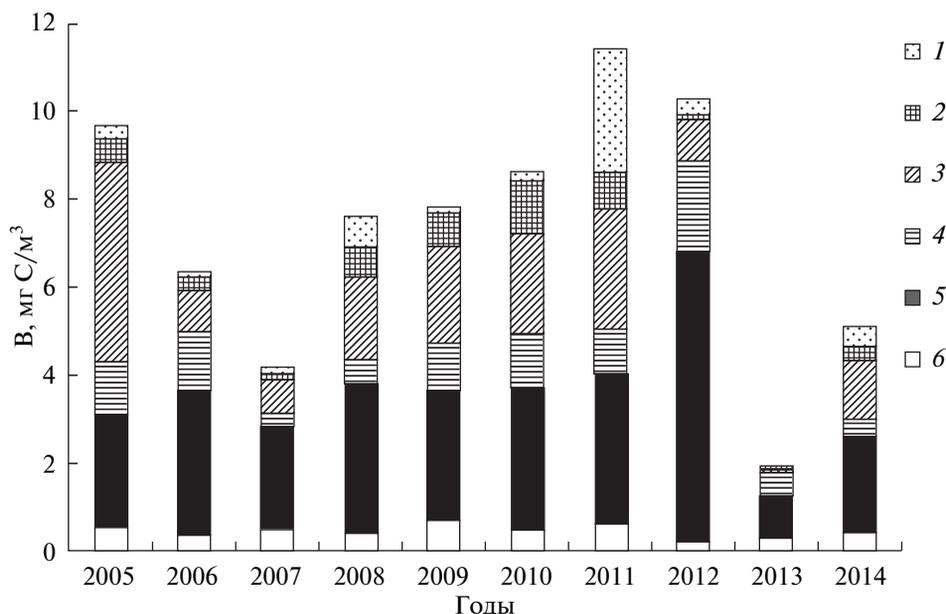


Рис. 5. Межгодовая изменчивость биомассы (мг С/м^3) и таксономической структуры мезозoopланктона в слое 0–50 м на срединном шельфе северо-восточной части Черного моря.

1 – ноктилука; 2 – меропланктон; 3 – клadoцеры; 4 – хетогнаты; 5 – копеподы; 6 – прочие.

Гетеротрофная динофлагеллята *Noctiluca scintillans* традиционно для Черного моря рассматривается как компонент мезозoopланктона из-за крупного размера и всеядного типа питания.

мической структуры зоопланктонного сообщества не наблюдалось, за исключением 2011 г., когда было зарегистрировано массовое развитие *Noctiluca scintillans*, и 2013 г., характеризовавшимся практически полным исчезновением клado-

цер. Корреляционный анализ не выявил достоверной связи биомассы зоопланктона и отдельных таксономических групп ни с температурой, ни с концентрацией хл “а”, ни с общей биомассой фитопланктона. Единственная положительная

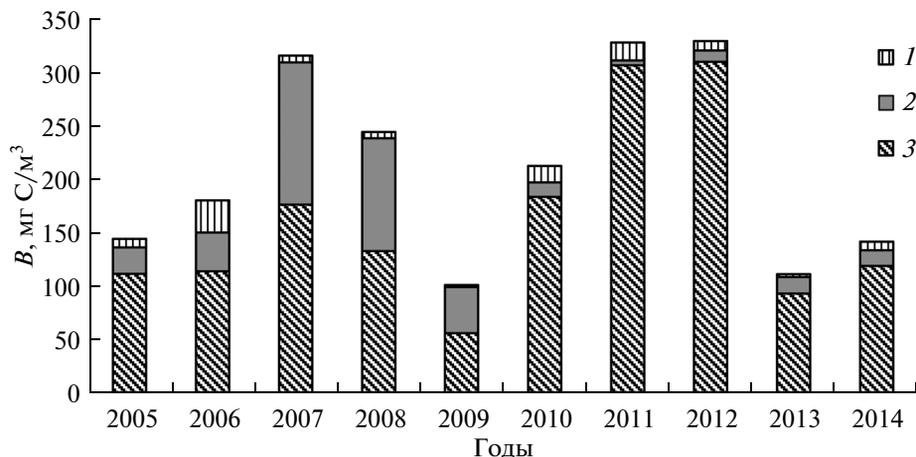


Рис. 6. Межгодовая изменчивость биомассы (мг С/м³) и таксономической структуры студенистого макрозоопланктона в слое 0–50 м на срединном шельфе северо-восточной части Черного моря.

1 – *Beroe ovata*; 2 – *Mnemiopsis leidyi*; 3 – *Aurelia aurita*.

корреляция была найдена между биомассой растительного зоопланктона и биомассой диатомовых водорослей ($r = 0.55$, $p = 0.05$).

Желетельный макропланктон представлен медузой *Aurelia aurita* и гребневиками-вселенцами *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata* (рис. 6). Вклад последнего в суммарную среднегодовую биомассу обычно составлял 3–7%. Межгодовая динамика общей биомассы этой группы характеризовалась двумя максимумами, в 2007–2008 гг. и в 2011–2012 гг. В первом случае высокая биомасса была образована гребневиком *M. leidyi* и медузой *A. aurita*, а во втором – только медузой. Биомасса *M. leidyi* резко снизилась в 2010 г. и оставалась низкой до 2014 г. В 2010–2014 гг. также значительно сократилась доля гребневика мнемииопсиса от общей углеродной биомассы желетелого макрозоопланктона (7%), по сравнению с 2005–2009 гг., когда доля этого вида достигала 33% от общей биомассы (t -test, $p < 0.01$). Снижение биомассы мнемииопсиса совпало с общей тенденцией повышения температуры поверхности моря, хотя достоверной корреляции между его биомассой и температурой не обнаружено. Также не было обнаружено никаких взаимосвязей между биомассой желетельных хищников и биомассой, как всего мезозоопланктона, так и отдельных таксономических групп.

Таким образом, в последнее десятилетие состояние пелагической экосистемы исследуемого района можно охарактеризовать как достаточно стабильное несмотря на быстрые темпы повышения температуры моря. Однако может быть отмечено несколько негативных сигналов, связанных как с прямым, так и с опосредованным влиянием потепления. Прежде всего, это касается нижних звеньев трофической цепи, в частности уменьшения биомассы диатомовых водорослей, которое, в

свою очередь оказывает негативное влияние на биомассу растительного планктона. Отмеченное в последние два года уменьшение биомассы и изменения таксономического состава фито- и зоопланктона пока проявляется как межгодовые флюктуации, но если эта тенденция сохранится, то можно ожидать значительных перестроек структуры и функционирования прибрежной пелагической экосистемы при дальнейшем увеличении температуры.

Исследование проводилось при поддержке РФФ (проект № 14-50-00095). Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 14.604.21.0044, уникальный идентификатор проекта – RFMEFI60414X0044). Обработка и анализ данных по распределению макропланктона осуществлялась при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-05-00491.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.243-02. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 264 с.
2. Anninsky B.E. Organic composition and ecological energetics of jellyfish *Aurelia aurita* L. (Cnidaria, Scyphozoa) under the Black Sea conditions // Trophic relationships and food supply of heterotrophic animals in the pelagic ecosystem of the Black Sea / Eds. Shulman G.E. et al. Istanbul: Black Sea Commission Publications, 2009. P. 99–160.
3. Arashkevich, E.G., Stefanova K., Bandelj V. et al. Meso-zooplankton in the open Black Sea: Regional and seasonal characteristics // J. Mar Sys. 2014. V. 135. P. 81–96.
4. Finenko G.A., Romanova Z.A., Abolmasova G.I. et al. Population dynamics, ingestion, growth, and reproduction rates of the invader *Beroe ovata* and its impact on plankton community in Sevastopol Bay, the Black Sea // J. Plankton Res. 2003. V. 25 (5). P. 539–549.

5. *Menden-Deuer S, Lessard E.J.* C to volume relationships for dinoflagellates. Diatoms and other protists plankton // *Limnol Oceanogr.* 2000. V. 39. P. 1044–1060.
6. *Mikaelyan A.S., Pautova L.A., Chasovnikov V.K. et al.* Alteration of diatoms and coccolithophores in the north-eastern Black Sea: a response to nutrient changes // *Hydrobiologia.* 2015. DOI 10.1007/s10750-015-2219-z
7. *Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *J. Marine Syst.* 2006. V. 60. P. 235–254.
8. *Pakhomova S., Vinogradova E., Yakushev E. et al.* Inter-annual variability of the Black Sea Proper oxygen and nutrients regime: The role of climatic and anthropogenic forcing // *J. of Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2014. V. 140. P. 134–145.
9. *Strickland J.D.H., Parsons T.R.* A practical handbook of seawater analysis. Pigment analysis // *Bull. Fish. Res. Bd. Can.* 1968. V. 167. P. 1–311.
10. *Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al.* Observation of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. of Geoph. Res.* 2003. V. 108(C8). P. 1–27.

Marine Environmental Monitoring in the Shelf Zone of the Black Sea: Assessment of the Current State of the Pelagic Ecosystem

**E. G. Arashkevich, N. E. Louppova, A. B. Nikishina, L. A. Pautova, V. K. Chasovnikov, A. V. Drits,
O. I. Podymov, N. D. Romanova, R. R. Stanichnaya, A. G. Zatsepin, S. B. Kuklev, M. V. Flint**

The status of the shelf pelagic ecosystem was assessed based on a multi-disciplinary monitoring performed in the NE Black Sea in 2005–2014. The seasonal and interannual variations in sea surface temperature (SST) and the concentration of chlorophyll-a (*Chl-a*) were analyzed along with the concentration of nutrients (silicate, nitrogen and phosphate), biomass and taxonomic composition of phyto- and zooplankton, and gelatinous macroplankton. The linear trend showed an increase in mean annual SST by 0.9°C over the last decade. The increase in winter SST was accompanied by decrease in the concentration of silicates in spring ($p < 0.05$), and the increase in summer SST – by decrease in the concentration of *Chl-a* and biomass of diatoms in the summer-autumn period ($p < 0.05$). Reducing phosphate concentration also had a negative impact on the development of diatoms ($p < 0.01$). Reduced diatom biomass caused a decrease in herbivorous zooplankton biomass in the second half of the year ($p = 0.05$). Correlation analysis revealed no significant relationships between the biomass of gelatinous top-predators and mesozooplankton biomass. The current state of the shelf pelagic ecosystem was assessed as stable, but in the last two years there has been a downward trend in biomass and change of taxonomic composition of phyto- and zooplankton, which was probably due to both direct and indirect effect of temperature increase of the upper layer of the sea.