

DOI: 10.37614/2307-5252.2020.11.4.001

УДК 574.52: 57.045 (268.4)

**М.В. Макаров¹, Г.Г. Матишов^{1,2}, Д.В. Моисеев¹, С.В. Малавенда¹,
А.Г. Дворецкий¹, Е.И. Дружкова¹, А.В. Ежов¹, Г.В. Ильин¹,
О.В. Карамушко¹, С.В. Бердников²**

¹Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск, Россия

²Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия

БИОРЕСУРСЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация

В статье изложены основные результаты работ по программе Президиума РАН по теме “Биоресурсы арктических морей России: современное состояние, влияние природных изменений и антропогенных воздействий, научные основы и перспективы использования” и связанным исследованиям.

Ключевые слова: арктические моря, биоресурсы, зообентос, макрофитобентос, фитопланктон, ихтиофауна, камчатский краб, радионуклиды, климатические изменения, математическое моделирование.

**M.V. Makarov¹, G.G. Matishov¹, D.V. Moiseev¹, S.V. Malavenda¹, A.G. Dvoretzkiy¹,
E.I. Druzhkova¹, A.V. Ezhov¹, G.V. Ilyin¹, O.V. Karamushko¹, S.V. Berdnikov²**

¹Murmansk Marine Biological Institute RAS, Murmansk, Russia

²South Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

BIORESOURCES OF THE ARCTIC SEAS: CURRENT STATE, EFFECT OF CLIMATE AND ANTHROPOGENIC CHANGES

Abstract

Article present the main results of the investigations deal with the program of the Presidium Russian Academy of Science “Bioresources of the Arctic seas of Russia: current state, the effect of natural changes and anthropogenic impacts, scientific foundations and perspectives for use” and linked researches.

Keyword: Arctic seas, bioresources, zoobenthos, macrophytobenthos, ichthyofauna, phytoplankton, red king crab, radionuclides, climate change, mathematical modeling.

Введение. В последние десятилетия Арктическая зона России переживает новый этап промышленного, социально-экономического и инфраструктурного возрождения. Поэтому особенное внимание следует обратить на охрану и сохранение природных ресурсов арктических экосистем. В основе должен лежать научный подход, знание ресурсного

потенциала Арктики и объективная оценка факторов способных оказать на них негативное воздействие. По мнению большинства ученых, на экосистемы арктических морей России оказывают влияние два основных фактора – климатические изменения и усиление антропогенной нагрузки. Климатические изменения подразумевают в первую очередь повышение температуры и увеличение открытых акваторий в результате таяния льдов. Антропогенное воздействие включает активизацию добычи биоресурсов, работы по освоению месторождений углеводородов на шельфе, увеличение морских перевозок, в том числе нефти и нефтепродуктов, в результате этого вырастают риски импактного загрязнения. Поэтому исследование современного состояния Арктического региона и оценка возможного воздействия на биоценозы техногенных или природных факторов – актуальная задача. Основная направленность работ по Программе Президиума РАН состояла в проведении мониторинга состояния среды и биоты арктических морей, а также выявлении значимых факторов, оказывающих воздействие на морские экосистемы.

Прибрежные экосистемы в значительной степени характеризуют состояние всей Арктики. В своих исследованиях ключевыми биоиндикаторами состояния прибрежных экосистем Баренцева моря мы выбрали фитоценозы макроводорослей и камчатского краба.

Для экосистем открытой части Баренцева моря наиболее значимыми компонентами являются фитопланктон (как первичные продуценты) и ихтиофауна. Основным показателем климатических изменений служит температура водных масс, а антропогенного воздействия – загрязнение радионуклидами и нефтепродуктами.

Цель исследований – выявление факторов, оказывающих влияние на состояние биоресурсов арктических морей, и оценка степени их воздействия.

Наблюдающиеся в последние десятилетия климатические изменения оказывают значительное воздействие на морские экосистемы, особенно в приполярных регионах (Parmesan, Yohe, 2003; Climate ..., 2005; Harley, 2011; Effects ..., 2012). Учитывая это, а также влияние атлантических водных масс, при котором воды Мурманского побережья не замерзают, нами были выбраны прибрежные сообщества Баренцева моря в качестве объектов для изучения последствий климатических изменений.

Гидрологические характеристики водных масс на разрезе “Кольский меридиан” по результатам СТД-профилирования. Для оценки гидрологических характеристик поступающих в Баренцево море теплых атлантических водных масс выполнялось СТД-профилирование [соленость–температура–давление (глубина)] на разрезе “Кольский меридиан” (рис. 1) в целом и в районе Мурманского прибрежного течения при помощи погружных зондов SEACAT SBE 19plus в частности. Стандартные станции разреза расположены с дискретностью 30’ широты и наиболее полно обеспечены многолетними данными, поэтому они используются для расчета норм и аномалий.

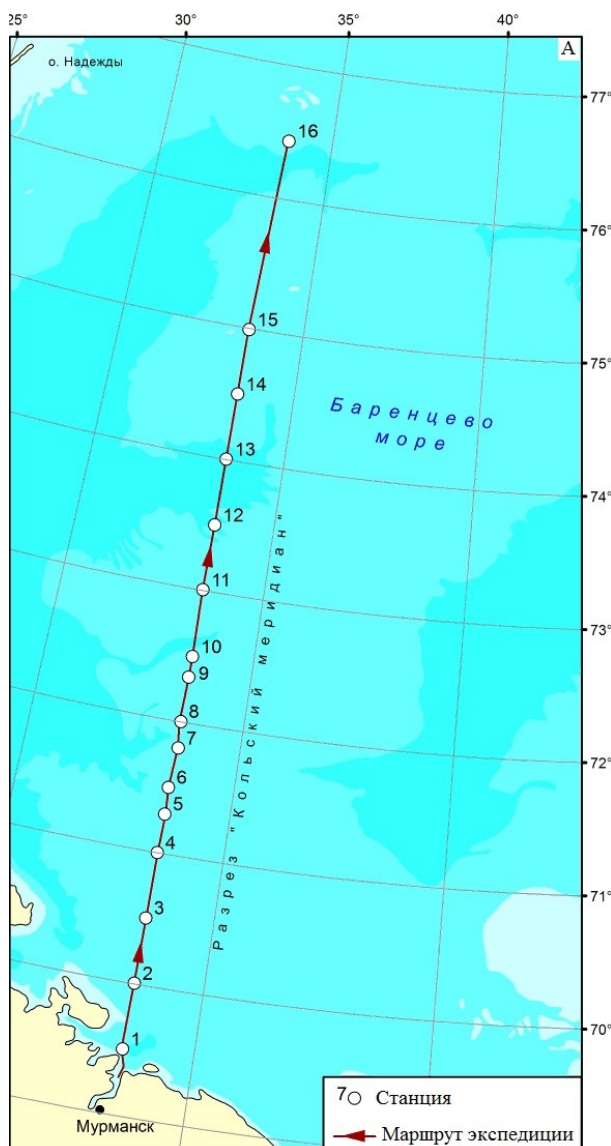


Рис. 1. Карта-схема расположения станций СТД-зондирования на разрезе "Кольский меридиан" в 2016–2017 гг. (А) и 2018–2019 гг. (Б). Схема течений приведена по: Климатические ..., 2010

Fig. 1. Layout and numbers of CTD-sensing stations on the transect "Kola Section" in 2016–2017 (A) and 2018–2019 (B). The diagram of currents is given by: Climate ..., 2010

В апреле 2016 г. максимальная температура воды (5.2 °C) зафиксирована в слое атлантических вод 150–200 м между 71° и 72° с. ш., минимальная температура (1.4 °C) – в верхнем слое северной прикромочной части разреза. В придонном слое на 72°30',

73°, 75° с. ш. отмечены линзы холодных вод. Соленость во всей водной толще изменялась от 34.2 ‰ в прибрежной зоне до 35 ‰ на 75° с. ш. В 2016 году наблюдалась более высокая соленость и температура на 2–3 °C выше нормы.

Аномалии температуры и солености водных масс по отношению к среднегодовым значениям рассчитывали с 2017 г. Данные показали, что в 2017 г. наблюдалась повышенная соленость и температура увеличилась на 1.5 °C, а начиная с 2018 г., температура была выше нормы на 1.06–1.22 °C, соленость оказалась ниже нормы (таблицы 1, 2). Это свидетельствует о продолжающемся повышении затопке вод атлантического происхождения в Баренцево море.

Т а б л и ц а 1

**Аномалии температуры и солёности воды
на разрезе “Кольский меридиан” в июле 2017 г.**

Table 1

**Anomalies of water temperature and salinity
at the transect “Kola Section” in July 2017**

Слой, м	Номера станций										Среднее
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ΔT, °C											
0–50	–0.58	+0.63	+0.12	+0.84	+0.55	+0.70	+0.56	+0.94	+1.18	+0.85	+0.58
0–100	–0.08	+0.62	+0.51	+1.02	+0.79	+0.76	+0.86	+1.11	+1.13	+1.00	+0.77
150–200	+1.25	–	+1.42	+1.51	+1.10	+0.35	+1.53	+1.18	+1.16	+1.12	+1.19
0–200	+0.52	–	+0.95	+1.31	+1.00	+0.66	+1.13	+1.22	+1.14	+1.10	+0.99
0–дно	+0.70	+0.71	+1.02	+1.32	+0.88	+0.44	+1.26	+1.20	+1.10	+0.98	+0.93
ΔS, ‰											
0–50	+0.36	+0.09	–0.04	–0.09	–	+0.13	+0.07	+0.12	+0.12	+0.14	+0.09
0–100	+0.17	+0.03	–0.06	–0.08	+0.01	+0.12	+0.06	+0.10	+0.09	+0.11	+0.05
150–200	–0.09	–	–0.08	–0.01	+0.08	+0.07	+0.05	+0.06	+0.05	+0.05	+0.04
0–200	+0.05	–	–0.07	–0.04	+0.04	+0.09	+0.05	+0.08	+0.07	+0.08	+0.05
0–дно	+0.02	+0.01	–0.07	–0.04	+0.05	+0.09	+0.05	+0.08	+0.07	+0.07	+0.05

Т а б л и ц а 2

**Аномалии температуры и солёности воды
на разрезе “Кольский меридиан” в 2018–2019 гг.**

Table 2

**Anomalies of water temperature and salinity
at the transect “Kola Section” in 2018–2019**

Слой, м	$\Delta T, ^\circ\text{C}$			$\Delta S, \text{‰}$		
	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3
Май 2018 г.						
0–50	+0.76	+0.95	+1.11	+0.23	–0.18	–0.18
0–100	+0.59	+0.87	+1.00	+0.03	–0.18	–0.18
150–200	+0.78	–	+1.12	–0.20	–	–0.11
0–200	+0.62	–	+1.07	–0.09	–	–0.15
0–дно	+0.72	+0.89	+1.05	–0.10	–0.17	–0.14
Апрель 2019 г.						
0–50	–	+1.00	+0.76	–	–0.03	–0.09
0–100	–	+1.04	+0.80	–	–0.06	–0.10
150–200	–	–	+1.22	–	–	–0.10
0–200	–	–	+0.95	–	–	–0.10
0–дно	–	+1.07	+0.99	–	–0.05	–0.11
Июль 2019 г.						
0–50	–	+0.80	+0.68	–	–0.09	–0.15
0–100	–	+0.82	+0.70	–	–0.11	–0.14
150–200	–	–	+1.06	–	–	–0.13
0–200	–	–	+0.82	–	–	–0.14
0–дно	–	+0.88	+0.89	–	–0.11	–0.13

Альгофлора Баренцева моря и современное состояние прибрежных фитоценозов. Проведенная в лаборатории альгологии ММБИ ревизия флоры водорослей-макрофитов Баренцева моря показала наличие 183 видов. Видовое разнообразие сосредоточено на юго-западе – на Мурманском побережье обитает 158 видов макроводорослей, в юго-восточной части моря отмечено 64, на архипелагах Земля Франца-Иосифа – 60, Новая Земля – 41, Шпицберген (баренцевоморское побережье) – 39.

Мониторинг состояния сообществ макроводорослей проводится с 2009 г. в губе Зеленецкая (Дальнезеленецкая), которая может служить индикаторным районом сообществ Восточного Мурмана. Она отличается высоким водообменом, по расчетам смена воды происходит за 2 сут., при этом воды Мурманского прибрежного течения в данном районе близко подходят к берегу (Митяев, 2014). Многолетние непрерывные метеорологические и гидрологические наблюдения, проводимые в губе, обеспечивают доказательную базу наблюдений. Здесь проходит северо-восточная граница распространения некоторых бореальных видов, поэтому наблюдения за их биомассой в период климатических изменений весьма актуальны. Мониторинг популяций фукусовых водорослей проводили и в сопредельных районах – губе Ярнышная, бухтах Прибойная и Чевры, которые представляют собой участки открытого прибою побережья и заливы фьордового типа, что позволяет экстраполировать полученные выводы на весь Восточный Мурман.

За период наблюдений в сублиторальных сообществах было выявлено 26 видов бурых водорослей, 34 – красных и 19 – зеленых. Одни стабильно встречались на определенных участках дна, другие – единично.

Сообщества ламинариевых водорослей расположены от нижнего горизонта литорали до глубины 15–18 м. Структурную основу таких сообществ в губе Зеленецкая составляют *Saccharina latissima*, *Laminaria digitata*, *Alaria esculenta* и *Desmarestia aculeata*. Эти четыре вида формируют основную часть биомассы, служат пологом мелким организмам и обеспечивают ярусность сообществ. В целом изменения биомассы отсутствуют у *S. latissima*, *A. esculenta* и *D. aculeata*, а у *L. digitata* отмечается ее снижение.

Биомасса *S. latissima* в губе Зеленецкая существенно выше, чем в проливе, и средняя за время исследований биомасса составила 2814 ± 1188 г/м² (без учета данных 2012 г., когда биомасса была 12872 г/м²). В проливе *S. latissima* находилась на второстепенных ролях, и ее биомасса в среднем соответствовала 198 ± 138 г/м², помимо максимума 2009 г. на глубине 15 м – 2919 г/м² (соответствует среднему в защищенном от прибоя месте).

Alaria esculenta сосредоточена в проливе, где средняя биомасса в 4 раза выше, чем в губе. В 2009 году в губе Зеленецкая она встречалась на глубине 2–4 м в виде единичных талломов, а в проливе в качестве массового вида на всем протяжении склона мыса Пробный. В 2012 году

в губе *A. esculenta* отмечалась главным образом на глубине 10 м, в то время как в проливе на 4 м, при этом наблюдалось резкое увеличение биомассы вида. В 2019 году в губе Зеленецкая *A. esculenta* была распространена на глубине 0–18 м, а в проливе – только на 4 м.

Также ассиметричное распределение отмечено для *L. digitata*. В 2009 году основная масса *L. digitata* была сосредоточена в проливе на небольших глубинах, в основном на 2 м, где биомасса достигала 7920 г/м², в 2012 г. вид встречался повсеместно с биомассой около 1000 г/м². В 2019 году в проливе было обнаружено лишь несколько талломов на глубине 10 м.

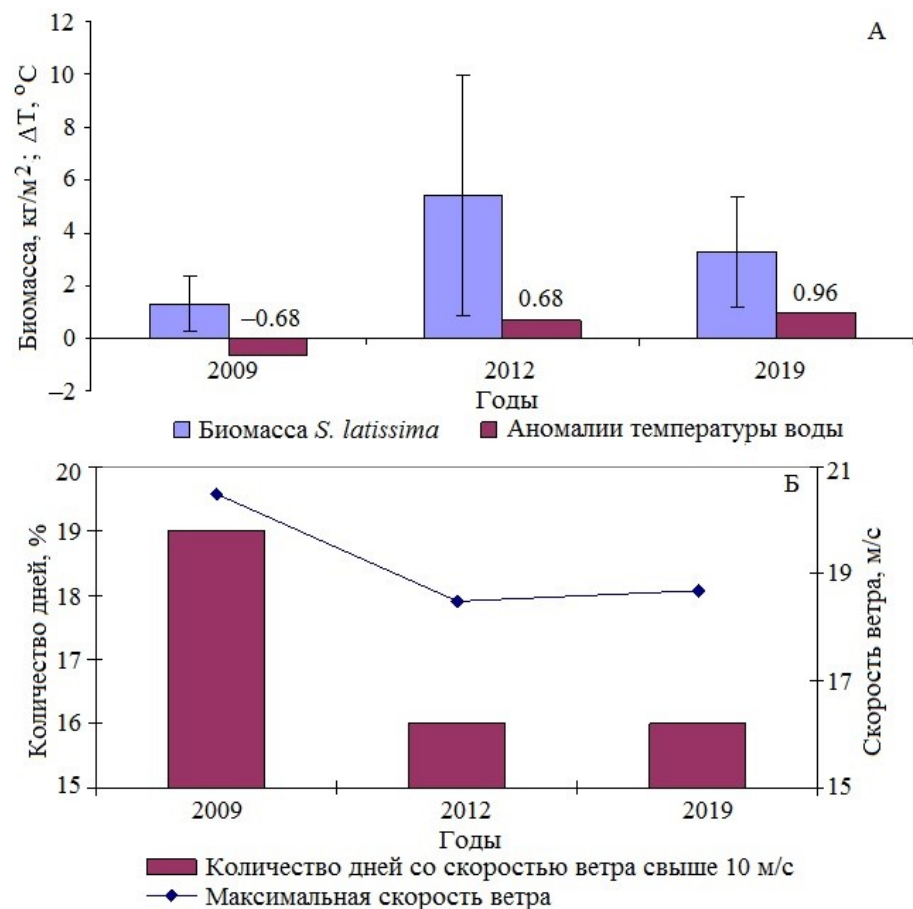


Рис. 2. Зависимость биомассы *S. latissima* от температуры воды (А) и метеорологических условий (Б)

Fig. 2. Dependence of *S. latissima* biomass on water temperature (А) and meteorological conditions (Б)

Комплексный анализ полученных данных показал, что видовой состав фитоценозов сублиторали Восточного Мурмана и биомасса доминантных видов за период 2009–2019 гг. достоверно не изменились.

Биомасса в большей степени зависела от метеорологических условий (количества штормовых дней и силы ветра), чем от температуры поступающих атлантических водных масс (рис. 2). Положительные температурные аномалии оказали влияние только на отдельные виды. Так отмечена вспышка численности зеленой водоросли-космополита *Ulva lactuca*, впервые отмеченной в губе Зеленецкая в 2016 г. в единичных экземплярах, и снижение биомассы и встречаемости красной холодноводной водоросли *Polysiphonia arctica*.

Продукционный потенциал пелагического альгоценоза Баренцева и Карского морей. Фитопланктон наряду с макрофитами является основным первичным продуцентом и лежит в основании пищевой цепи в прибрежных и открытых морских районах Баренцева моря.

В районах Баренцева моря, различающихся океанологической структурой пелагиали, впервые были описаны годовые сукцессионные циклы фитопланктона. Наиболее распространены в Арктике пелагические экосистемы открытого шельфа, для которых характерно формирование сезонного пикноклина в теплый период года, термоклина для субарктических и галоклина для арктических областей. На субарктическом шельфе биологическая весна начинается в марте. Максимальных значений количественные показатели сообщества фитопланктона достигают в мае, когда доминируют колониальные диатомеи из родов *Thalassiosira*, *Nitzschia*, *Navicula* и золотистая водоросль *Phaeocystis pouchetii*. Биологическое лето приходится на июнь–июль. В это время сообщество планктонных микроводорослей находится в фазе сбалансированного развития. Доминируют автотрофные жгутиковые (*Dinophyceae*, *Chrysophyceae* и *Prymnesiophyceae*). Далее численность и биомасса микрофитопланктонного сообщества постепенно снижаются, достигая к началу ноября своих зимних значений. Зимняя стадия покоя длится с ноября по февраль. Ее определяющей чертой является максимальная дезинтегрированность фитопланктонного сообщества (рис. 3).

На Арктическом шельфе гидрологический год в пелагиали, под ледовым покровом, начинается с цветения криофлоры подо льдом и дальнейшего формирования прикромочных зон. В составе комплекса микроводорослей доминирующее положение занимают ранневесенние неритические диатомовые и некоторые колониальные жгутиковые, такие как *Phaeocystis pouchetii* и *Dinobryon balticum*. Стратифицированное состояние водной толщи, являющееся результатом таяния ледового покрова и распреснения поверхностного слоя, сохраняется в арктической пелагиали в период открытой воды до начала активного вертикального осенне-зимнего перемешивания. В результате в летний период, после окончания весеннего цветения, происходит перераспределение биомассы микроводорослей по вертикали, и в зоне пикноклина формируется ее подповерхностный максимум, в основном за счет *Phaeocystis pouchetii* и *Thalassiosira* spp. По мере продвижения в высокие широты осенний

максимум постепенно выпадает из структуры годового цикла альгоценоза, и сезонная кривая развития микрофитопланктона приобретает однопиковый характер.

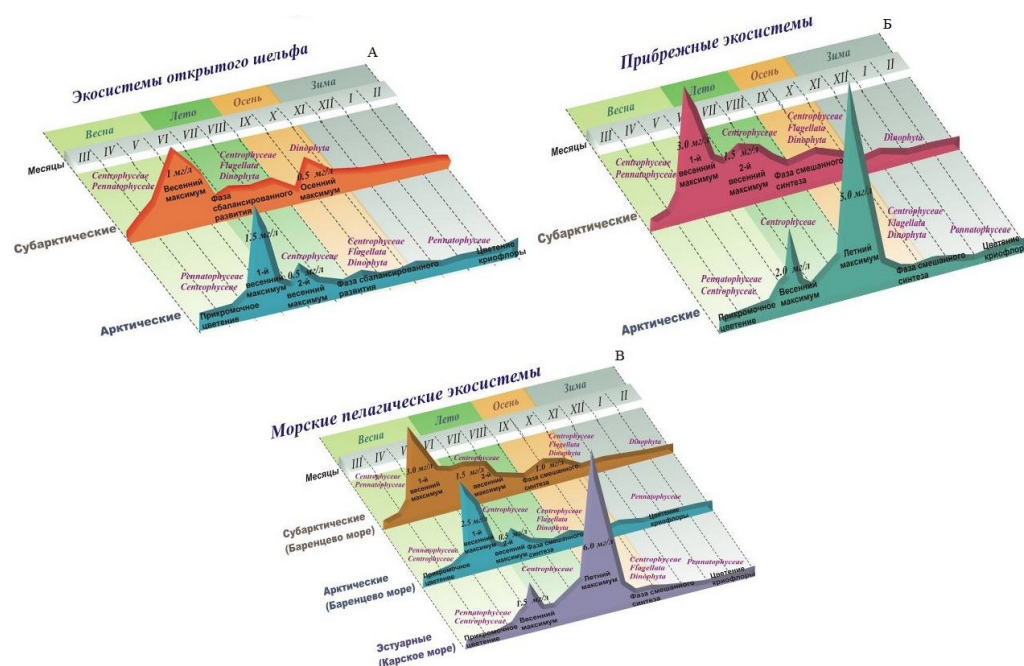


Рис. 3. Сукцессионные циклы фитопланктона экосистем открытого шельфа (А), прибрежных (Б) и морских (В) пелагических экосистем Баренцева и Карского морей

Fig. 3. Succession cycles of phytoplankton in open shelf (A), coastal (B) and marine (B) pelagic ecosystems of the Barents and Kara seas

В субарктических прибрежных экосистемах годовой цикл фитопланктона подвергается значительному усложнению по сравнению с таковым открытого шельфа. Основной особенностью арктических прибрежных экосистем является наличие ледового покрова припайного типа, вся сезонная динамика прибрежных систем (особенно в случае полярных архипелагов, где роль континентального стока весьма невелика) фактически полностью определяется сезонной динамикой ледового покрова. В отличие от субарктических прибрежных экосистем, в арктических раннелетний и осенний сукцессионные циклы полностью выпадают из структуры годового цикла. Ранневесенний цикл трансформируется в прикромочное цветение (в прикромочной области припайных льдов), а поздневесеннее цветение формируется несколько позднее (июнь), в период максимума континентального стока.

По результатам анализа данных круглогодичных исследований впервые были описаны годовые сукцессионные циклы фитопланктона в районах Баренцева и Карского морей, различающихся по климатическим

характеристикам и океанологической структуре водной толщи. Полученные результаты опровергают традиционные представления о биологической продуктивности Арктического бассейна, оценивающие наличие однолетнего ледового покрова как фактор, негативно влияющий на развитие микроводорослей. Наши данные убедительно свидетельствуют, что продукционный потенциал пелагического альгоценоза реализуется независимо от наличия или отсутствия сезонного льда. Активизация первичных продуцентов на замерзающих акваториях начинается в то же время, что и в открытых участках побережья, но протекает под сплошным покровом льда задолго до его разрушения – за счет подледного “цветения” и развития представителей криофлоры. В итоге интегральные годовые биомассы фитопланктона в одной широтной зоне Баренцева и Карского морей оказываются практически одинаковыми, несмотря на разный ледовый режим. Различия же заключаются, главным образом, в ее сезонных уровнях и группах микроводорослей доминирующих в сообществе в тот или иной период года.

Состояние зообентоса Баренцева моря. Анализ данных количественных съемок зообентоса, проводимых ММБИ в Баренцевом море с 1995 г., показал, что высокий уровень биомассы характерен для краевых участков акватории (шельф Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, юго-восточная часть и губы и заливы Кольского полуострова, кроме Кольского залива). В этих районах биомасса донных организмов значительно превышала 200 г/м². В центральной части Баренцева моря биомасса бентоса составляла до 100 г/м² (рис. 4). Низкий уровень биомассы в этом районе, скорее всего, указывает на воздействие тралового промысла. Однако, даже при имеющемся уровне донных тралений, в период аномально теплых лет произошел значительный прирост биомассы бентоса, в основном за счет бореальных и бореально-арктических видов, что показано на примере разреза “Кольский меридиан”.

В загрязненном антропогенным мусором, нефтепродуктами и бытовыми стоками Кольском заливе зообентос находится в наиболее угнетенном состоянии, что проявляется в низкой биомассе (30 г/м²), видовом богатстве (32 вида/станции) и численности, появлении супердоминантов полихет *Laonice cirrata* и *Alitta virens*, нарушении вертикальной зональности.

Пик видового богатства приурочен к водам атлантического происхождения на глубине около 150 м. Здесь же пик видового богатства совпадает с ареалом распространения бореальных и арктических видов.

В целом фауна центральной части Баренцева моря испытывает антропогенную нагрузку в виде тралового изъятия, что привело к снижению биомассы бентоса. В Кольском заливе постоянное длительное загрязнение донных осадков и вод стало причиной не только снижения биомассы и обеднения фауны, но и полностью изменило структуру сообществ, трофический состав, нарушило их вертикальное

распределение. Восстановление всех затронутых антропогенным воздействием сообществ, особенно в Кольском заливе, может произойти только после ослабления уровня воздействия, либо в отдельных частях залива после полной рекультивации грунтов.

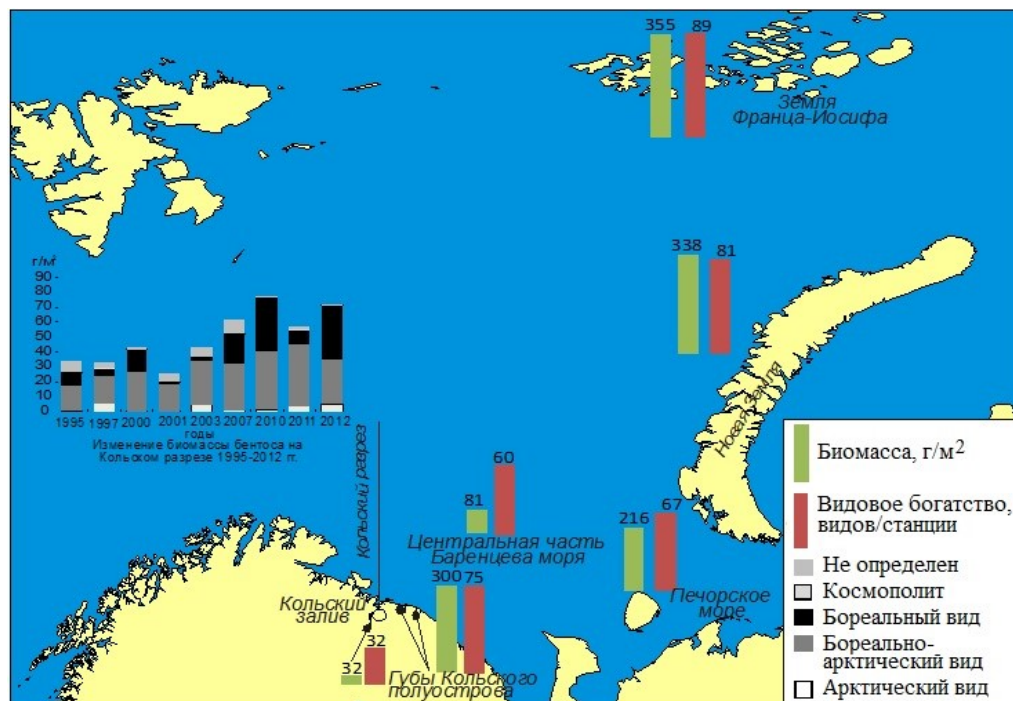


Рис. 4. Биомасса и видовое богатство зообентоса в Баренцевом море
Fig. 4. Biomass and species diversity of zoobenthos of the Barents Sea

В донных сообществах зообентоса верхней сублиторали северной части Кольского залива (до глубины 20–25 м) выявлено высокое видовое разнообразие зообентоса (358 видов), сопоставимое с экологически чистыми районами Мурманского побережья. Выделено 3 биоценоза неподвижных сестонофагов, 1 биоценоз подвижных сестонофагов и 1 – собирающих детритофагов. Состояние биоценозов свидетельствует о незначительном влиянии современного уровня загрязнения на донную фауну на глубине 0–25 м.

На состояние бентосных сообществ литорали Кольского залива большое влияние оказывает опреснение и антропогенное загрязнение. В литоральной зоне обнаружено не менее 13 типов сообществ макрозообентоса. Наибольшее разнообразие сообществ (10–11) выявлено в южном и среднем коленах, что связано с сильным пространственным и временным варьированием солености вод в этих частях залива. Проведенные исследования показали наличие в этой зоне 110 преимущественно морских эвригалинных видов беспозвоночных,

принадлежащих к 10 типам. Подобное видовое разнообразие обусловлено большой протяженностью литоральной зоны, разнообразием грунтов и градиентами гидрологических условий. Снижение в 2–3 раза видового разнообразия литорального зообентоса происходит в загрязненных районах портовых зон и на сильно опресняемых участках литорали. К неблагоприятным факторам также относится истирающее действие берегового и речного льда.

Динамика популяции камчатского краба. Одним из промысловых представителей зообентоса в Баренцевом море является камчатский краб. Промышленный лов камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в Баренцевом море ведется с 2004 г. Высокий уровень эксплуатации запаса в 2005–2006 гг. послужил причиной снижения промысловой численности популяции и, соответственно, сокращения промысловых нагрузок в последующие годы. В 2011 году была отмечена смена негативных тенденций в динамике промыслового запаса, что послужило основанием для увеличения общего допустимого улова в 2012 г. В 2014 году был отмечен дальнейший рост производительности промысла, это позволило освоить выделенные объемы при минимальном за всю историю количестве усилий.

В 2011–2014 годах основной промысел велся на Мурманском мелководье, Канинской банке и в Восточном Прибрежном районе (Баканев и др., 2015). Ранее основная доля уловов, начиная со времени экспериментального промысла, приходилась на западные районы (Кузьмин, Гудимова, 2002; Пинчуков, 2009). В 2010–2014 годах отмечался значительный рост величин промысловой биомассы в начале сезона добычи, сопровождающийся снижением точности оценок. С учетом вылова камчатского краба в 2014 г. (5.995 тыс. т), его промысловая биомасса на конец сезона добычи оценена на уровне 31.869 тыс. т (Баканев и др., 2015).

Ежегодно проводятся экспедиционные работы в губе Зеленецкая, которая была выбрана в качестве модельной акватории по исследованиям состояния популяции краба в прибрежной зоне. Исследования на модельной акватории показали, что группировка данного вида находится в хорошем состоянии. Общая численность краба была на относительно стабильном уровне с 2012 по 2015 гг., после этого до 2018 г. наблюдался рост численности (рис. 5). В 2019 году произошел спад численности и резкое снижение количества молоди в уловах, что может быть связано с конкуренцией между ювенильными и половозрелыми крабами или влиянием климатических факторов. Общие положительные тенденции, отмеченные в открытой части моря, позволяют рассчитывать на продолжение интенсивной эксплуатации камчатского краба и повышение общего допустимого улова в последующие годы при условии соблюдения правил, регулирующих промысел данного вида.

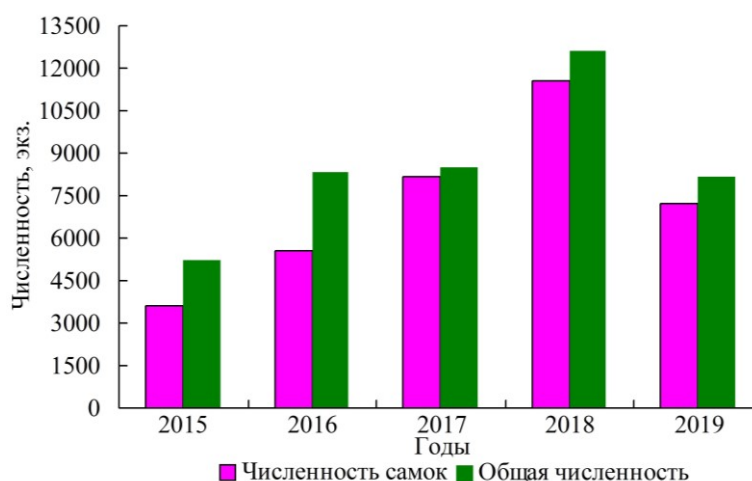


Рис. 5. Динамика численности камчатского краба в губе Зеленецкая в 2015–2019 гг.
Fig. 5. Dynamics of the red king crab population in Zelenetskaya Bay in 2015–2019

Ихтиофауна как индикатор состояния арктических экосистем.

Изменения в экосистемах северных морей также могут быть прослежены на примере рыбных сообществ. Исследования, проведенные в различных районах российской Арктики, позволили получить данные о видовом составе и структуре ихтиофауны от Баренцева до Чукотского морей. Была выполнена инвентаризация видового состава на основании всех зарегистрированных поимок за исторический период наблюдений в каждом отдельном водоеме, и представлены данные о структуре ихтиофауны по характеру географического ареала, принадлежности к биотопам и трофическим предпочтениям рыб. В результате ревизии видового состава и структуры ихтиофауны северных морей России установлено, что в целом в российском секторе арктических морей отмечено и обитает 284 вида, относящихся к 160 родам, 63 семействам, 28 отрядам и 5 классам. Без полупроходных, проходных и пресноводных видов, постоянно встречающихся на акватории морей, количество только морских видов и подвидов составляет в Баренцевом море 154, Белом – 50, Карском – 60, Лаптевых – 50, Восточно-Сибирском – 26, Чукотском – 78. Наиболее многочисленны представители пресноводной ихтиофауны в Белом и Карском морях, где встречается по 19 видов рыб. В Баренцевом море таких видов 9, Лаптевых – 7, Восточно-Сибирском – 8, Чукотском – 5. Доля арктических видов неизменно возрастает от Баренцева моря (28 %) до моря Лаптевых (67.1 %), а затем снижается, составляя в Чукотском море немногим менее половины от этого показателя (33.0 %). Количество арктическо-бореальных видов, доля которых в Баренцевом море достаточно низка (2.2 %), плавно возрастает в восточном направлении до Восточно-Сибирского моря (7.8 %). Наименьшее количество бореальных видов в море Лаптевых (24.3 %), а максимальное в Белом море, что связано с высокой долей пресноводных видов.

Основным биотопом для рыб северных морей являются придонные слои и дно, где в зависимости от района постоянно живут от 36.6 до 67.0 % всех видов. Основная трофическая группа рыб в высокоширотных морях России – бентофаги. Их доля в различных морях колеблется от 52.2 % (Баренцево море) до 67.1 % (море Лаптевых). Относительное количество планктофагов различается в меньшей степени и составляет 21.4–23.7 %, в Чукотском море – 17.5 %. Наибольшее количество хищников обитает в Баренцевом море – 24.7 %, а минимальное в море Лаптевых – 11.5 %. Соотношение планктофагов и хищников в каждом из шести морей достаточно близко и только в море Лаптевых последних почти в 2 раза меньше.

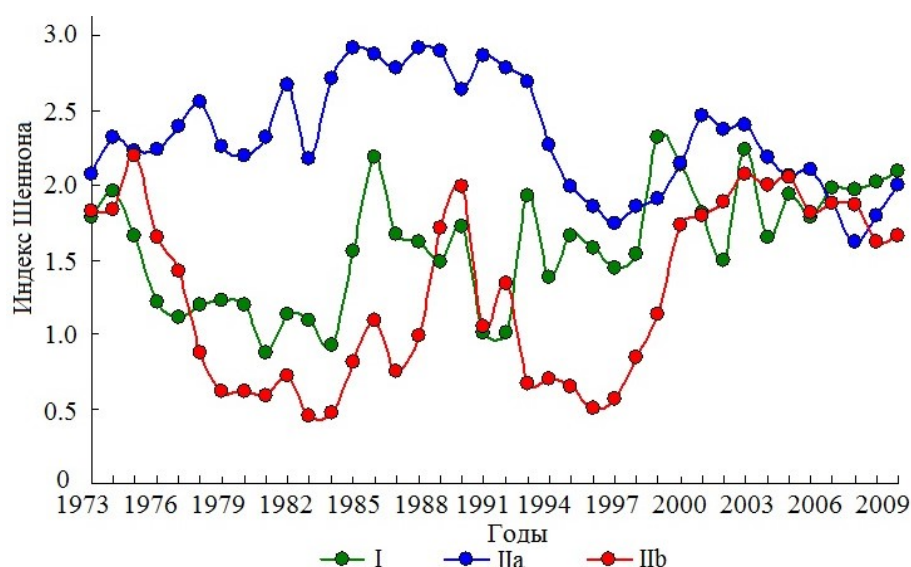


Рис. 6. Динамика разнообразия рыбной части сообществ в наиболее продуктивных районах Арктического региона:

I – Баренцево море, IIa – северная часть Норвежского моря, IIb – северо-восточная часть Гренландского моря

Fig. 6. Dynamics of diversity of fish communities in the most productive areas of the Arctic region:

I – Barents Sea, IIa – northern part of the Norwegian Sea, IIb – north-eastern part of the Greenland Sea

Структура рыбной части сообществ может меняться во времени и пространстве. В арктических морях основными абиотическими факторами разнообразия являются температура и соленость, которые оказывают прямое влияние на формирование рыбного населения, а в таких морях как Баренцево и Белое доминирующим фактором служит промысел. В северных экосистемах, характеризующихся большой степенью доминирования ограниченного числа видов рыб и относительно низкими показателями природного разнообразия, увеличение интенсивности промысла приводит к возрастанию разнообразия за счет

выравнивания долей других представителей сообществ. Поэтому, в таких экосистемах как Баренцево море, увеличение разнообразия и особенно резкое, может служить показателем чрезмерной эксплуатации доминантных популяций рыб, наличия климатических изменений и/или загрязнения водоема. Резкое увеличение видового разнообразия может свидетельствовать о негативных процессах в популяциях доминантных видов рыб, а также о структурных и функциональных перестройках во всем рыбном сообществе и экосистеме в целом. Так на примере наиболее продуктивных районов Арктики можно проследить влияние температурных изменений (рис. 6). Для северной части Норвежского моря разнообразие видов резко снижалось в 1993–1997 гг. и в 2008 г. при увеличении биомассы атлантической сельди, в остальные годы – путассу (1980), мойвы (1983), трески (1990). В двух других районах (Баренцево, северо-восточная часть Гренландского моря) основными видами, оказывавшими влияние на разнообразие, были мойва (1977, 1981, 1984, 1992, 2002 гг.) и треска (1994, 2004 гг.).

Орнитофауна Баренцева моря. Морские птицы являются одним из важнейших звеньев экосистем моря, вследствие чего они являются индикаторами различных изменений в морских экосистемах. В первую очередь, такие изменения отражаются на численности и характере размещения птиц на акваториях морей. Морские птицы как пелагические хищники непосредственно влияют на численность отдельных видов рыб, в том числе промысловых. В некоторых случаях они являются трофическими конкурентами морским млекопитающим и промыслу.

При проведении морских и береговых экспедиций впервые были выявлены русла весенней миграции массовых видов морских уток в Карском море: обыкновенные гаги *Somateria mollissima* были обнаружены у восточного побережья Южного острова Новой Земли, скопления морянок *Clangula hyemalis* – в южной части Карского моря у о. Белый.

Многие вопросы экологии морских птиц в северных морях еще не изучены. Даже в наиболее исследованных бассейнах, как Баренцево и Белое моря, не представляется возможным получить информацию, необходимую для расчета общей численности морских птиц. В более труднодоступных для орнитологических наблюдений морях, таких как Карское море, авифауна исследована в значительно меньшей степени. Впервые за весь обозримый период исследований был выявлен качественный и количественный состав авифауны, обнаружены места сосредоточения и участки видимого пролета отдельных видов морских птиц, описаны места сосредоточения в полыньях и разводьях. Также был определен видовой и количественный состав орнитофауны западной части Карского моря, отмечен сезонный характер размещения морских птиц и обнаружены места их концентрации и пути видимой части миграции.

Орнитофауны Баренцева и Карского морей имеют тесную связь. Большая часть морских птиц, огибая архипелаг Новая Земля с севера и юга, попадает в Карское море до и после периода размножения. На акватории Карского моря максимальная численность морских птиц наблюдается исключительно в период миграций. Однако большинство мигрантов преодолевают ее без промежуточных остановок.

Летом и зимой численность морских птиц на акватории Карского моря минимальна. По результатам наблюдений подтверждено наличие зимовки обыкновенных гаг *Somateria mollissima* и гаг-гребенушек *S. spectabilis*, возможно морянки *Clangula hyemalis* в полыньях и разводьях у юго-западного побережья Новой Земли. Периодически небольшие группы птиц этих видов встречаются в юго-восточной части Баренцева моря, куда они, возможно, вытесняются льдами. В апреле наблюдали активное перемещение групп обыкновенных гаг и гаг-гребенушек у юго-восточного побережья Новой Земли в Карском море, вблизи о. Белый видели пролетные стаи обыкновенных гаг (примерно 900 особей) и гаг-гребенушек (примерно 200 особей). В районе острова отмечены стаи морянок (до 2000 особей), мигрирующих в северо-западном направлении. Основные виды – гага-гребенушка и синьга *Melanitta nigra*. В апреле они перемещались стаями через систему стационарных полыней в Печорском и Карском морях, без остановок преодолевая ледовые пространства в разводьях между ними. Скопления мигрирующих птиц огибали о. Вайгач с севера. При этом группы синьги были обнаружены вблизи пролива Маточкин Шар как с западной, так и с восточной стороны архипелага. Мы предполагаем, что часть птиц может двигаться и этим путем, совершая промежуточные остановки у берегов архипелага. В октябре гаги-гребенушки летят крупными стаями (до 1000 особей) от южного побережья Карского моря через пролив Карские Ворота в южную часть Печорского моря, где совершают промежуточные остановки, образуя крупные скопления. До 1000 особей синьги перемещаются из южной части Карского моря, огибая о. Вайгач с севера и юга. В южной части Печорского моря (район Гуляевских кошек) отмечено разделение по срокам осенней миграции гусеобразных: первыми через акваторию пролетают представители рода *Anser* и белощекие казарки. Начало миграции для этих птиц отмечено в сентябре, но к середине месяца она практически закончивается. Позже отмечается пролет утиных (сибирской гаги, гаги-гребенушки, морянки, обыкновенной гаги и представителей рода *Melanitta*) продолжающийся вплоть до первой декады ноября. Гагары летели поодиночке, весной их перемещения в основном связаны с прибрежной зоной, а осенью – более рассеяны по акватории. В южной части Печорского моря пролет гагар наблюдался до ноября.

Уровень антропогенного загрязнения морей российской Арктики. Исследования показали, что в целом моря российской Арктики сохраняют относительно низкий уровень антропогенного загрязнения

за исключением немногочисленных импактных участков. Хозяйственная деятельность на акваториях морей и прилегающей суше, как правило, становится эмитентом регионального и локального масштаба и формирует зоны импактного загрязнения морской среды, главным образом на участках портовой инфраструктуры. Долговременное антропогенное влияние на морскую среду Арктики имеет очаговый характер с формированием очагов техногенного загрязнения в приустьевых областях крупных рек и зонах портовой инфраструктуры. Оценка источников и механизмы переноса загрязняющих веществ дифференцированных по масштабам воздействия на глобальные, региональные и локальные (местные) показывает, что значимость каждого источника изменяется для разных арктических морских бассейнов и даже географических частей моря различна.

Ведущая роль речного стока как источника загрязнений более выражена в морях восточного сектора Арктики вследствие обширности водосборных территорий и объема годового стока (рис. 7). В западном секторе Арктики (Баренцево, Белое и, отчасти, Карское моря) основными источниками являются водный трансокеанический и воздушный трансграничный переносы поллютантов. В открытом море содержание тяжелых металлов, пестицидов и радионуклидов в гидробионтах сохраняется на низком уровне, тенденций к росту не обнаруживается.



Рис. 7. Вынос загрязняющих веществ реками в моря российского сектора Арктики, т/год

Fig. 7. Removal of pollutants by rivers into the seas of the russian sector of the Arctic, tonnes per year

Влияние качества среды на биоразнообразие более всего прослеживается также в импактных зонах хозяйственно освоенных

участков морского побережья. Показательным примером такого влияния является Кольский залив (Баренцево море). При сложившемся геохимическом фоне в открытом море содержание тяжелых металлов, пестицидов и радионуклидов в гидробионтах сохраняется на низком уровне. На примере динамики ^{137}Cs показано, что максимальные антропогенные нагрузки на морскую среду региона отображаются пиками загрязнения морской биоты в среднем через 5 лет.

Исследования, проведенные вблизи пункта временного хранилища радиоактивных отходов в губе Андреева, показали, что инфильтрация радионуклидов с территории хранилища определяет формирование участков импактного загрязнения морской среды вдоль его периметра и не оказывает существенного влияния на радиоэкологическое состояние моря за пределами губы. Основные компоненты техногенной эмиссии с территории хранилища – изотопы ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$. Загрязненные участки формируются в зонах разгрузки дренирующих стоков. Впадины донного рельефа вблизи хранилища аккумулируют терригенный материал, загрязненный ^{137}Cs . Отмечено хроническое загрязнение осадков в губе Андреева, а также импульсные, импактные сбросы радионуклидов в морскую среду. Удельная активность ^{137}Cs в очагах загрязнения в губе в 100 раз выше, чем в побережье моря, а эпизоды импактных сбросов носят разнопериодный характер. Фактор хронического влияния стока радионуклидов с территории хранилища имеет место вблизи него, на акватории губы. Влияние хранилища на прибрежную морскую зону не прослеживается.

Анализ многолетней динамики техногенных радионуклидов в осадках Карского моря показал снижение концентраций ^{90}Sr в 3 раза и ^{137}Cs почти в 5 раз за последние 30 лет. Географические особенности водоема, принимающего 55 % общего стока сибирских рек, а также стратегия его использования для захоронений радиоактивных отходов определило многообразие путей поступления техногенных радионуклидов в море. Максимум поступлений ^{137}Cs дали атмосферные выпадения, а ^{90}Sr – сток сибирских рек.

Для современной радиоэкологической обстановки в водной среде Карского моря характерен диапазон объемной активности ^{137}Cs от следовых значений до 2.5 Бк/м^3 , а ^{90}Sr – от 1 до 15 Бк/м^3 . В донных осадках удельная активность ^{137}Cs также низкая, варьируется в диапазоне от следовой активности ($< 1 \text{ Бк/кг}$) до 11 Бк/кг сухой массы. Удельная активность ^{90}Sr в донных отложениях ниже, чем в водной среде, что обусловлено низкой сорбционной способностью изотопа. Поэтому даже в зоне маргинального фильтра, где происходит осаждение многих радионуклидов, ^{90}Sr не концентрируется.

В осадках Восточно-Новоземельского желоба происходит относительно повышение концентрации ^{137}Cs ($2\text{--}12 \text{ Бк/кг}$). На мелководных участках концентрация ^{137}Cs ниже минимально детектируемой активности и лишь локально регистрируются аналитически значимые величины активности – $0.5\text{--}5 \text{ Бк/кг}$.

Анализ многолетней динамики концентраций радионуклидов в осадках Карского моря выявил, что за последние 30 лет произошло снижение концентраций ^{90}Sr в 3 раза, ^{137}Cs – почти в 5 раз. В целом динамика активности техногенных радионуклидов в Карском море имеет тенденцию снижения до минимальных значений, возможных в “ядерную эпоху”. Современный уровень радиоэкологического загрязнения отражает в основном объем глобальных выпадений ^{137}Cs и ^{90}Sr на акватории Арктики, Северной Атлантики и на водосборных бассейнах сибирских рек. Влияние реально значимых в прошлом региональных источников – сбросов радиохимических комбинатов “Маяк” и “Томск-7”, захоронений на полигонах Новой Земли, в настоящее время в экосистеме Карского моря нивелируется процессами самоочищения и перераспределения.

Для анализа радиоэкологического современного состояния биоты Карского моря исследованы основные представители ихтиофауны и макробентоса. Рыбы в Карском море не накапливают аналитически значимых концентраций радионуклидов. В бентосных организмах основной радионуклидный фон формируется природными радиоизотопами – ^{40}K (92 %) и ^{226}Ra (6 %). Суммарная доля техногенных радионуклидов цезия и стронция не превышает 2 %. Их распределение на разных участках моря сильно варьирует в зависимости от видовой принадлежности животных и условий обитания.

Активность ^{137}Cs достоверно определяется лишь в 20 % проб бентоса. Концентрация этого изотопа не превысила 6.8 Бк/кг сырой массы при среднем показателе 0.3 Бк/кг сухой массы. Максимальным уровнем накопления ^{137}Cs характеризуются ткани голотурии – типичного грунтоеда, обитающего в биотопе тонкодисперсных осадков, для которых свойственна максимальная сорбция этого радионуклида.

В бентосных организмах ^{90}Sr накапливается более равномерно, так как геохимическая миграция этого радионуклида происходит большей частью в водной среде, а избирательное накопление – в костных тканях, которые у бентосных животных отсутствуют. В целом концентрация ^{90}Sr в бентосе Карского моря низкая, варьирует от 0.2 до 2.5 Бк/кг сухой массы, при среднем показателе около 1.3 Бк/кг.

Таким образом, на акватории Карского моря наблюдается низкое содержание техногенных радионуклидов как в донных осадках, так и у представителей фауны. Биологическое обогащение (концентрирование) донных беспозвоночных радионуклидами в открытом море, вне зоны возможных импактных выбросов от прибрежных источников – устьев рек, захоронений, в настоящее время не происходит. В целом радиоэкологическое состояние донной биоты может быть квалифицировано как “чистое”, а степень техногенного радиационного воздействия на биоту – как незначительное.

Математическая модель большой морской экосистемы Баренцева и Белого морей как инструмент для оценки природных рисков и эффективного использования биологических ресурсов. На основе полученных результатов, оценок, базы данных ММБИ и Южного научного центра РАН была разработана интегрированная математическая модель большой морской экосистемы (БМЭ) Баренцева и Белого морей. Модель способна анализировать и прогнозировать изменчивость океанографических характеристик, биологической продуктивности, трофодинамики, развития промысловых популяций. На основе выходных данных можно давать рекомендации по управлению промыслом и оценки экологических рисков от морской деятельности, а также оценивать загрязнение среды и темпы и возможности социально-экономического развития региона.

По мере появления новых данных и технологий возникает необходимость дополнить существующую модель экосистемы или разработать новую, которая может быть применена для анализа и исключения возможных пробелов в исследованиях. Накопленные данные, представленные вместе в количественной модели, позволяют комплексно рассматривать последствия изменений экосистем. Модели экосистем могут быть полезны для выявления важнейших межвидовых и функциональных связей разных групп организмов, оценки чувствительности экосистемы к изменениям, а также для сценарного тестирования таких воздействий как изменение промысловой нагрузки от рыболовства, климата и/или загрязнения среды (например, в результате аварий).

Большие морские экосистемы – участки морского пространства, охватывающие прибрежные воды от устьев рек к морским границам континентального шельфа площадью порядка 200 тыс. км² и более, границы которых определяются на основе четырех экологических критериев: батиметрии, гидрологии, продуктивности и трофических популяционных связей. Концепция БМЭ оказалась продуктивной для управления на основе модульного подхода (рис. 8).

Модуль продуктивности экосистемы. Одним из основных показателей является первичная продукция экосистемы, от уровня которой в итоге зависят запасы рыбных ресурсов. Продуктивность служит также индикатором проблемы прибрежной эвтрофикации. Правильно откалиброванные спутниковые данные могут предоставить информацию по таким параметрам как температура поверхности воды, ее прозрачность, концентрация хлорофилла.

Модуль рыболовства. Изменения в области биоразнообразия и доминирования видов в рыбных сообществах БМЭ возникли в результате чрезмерной эксплуатации, естественных экологических сдвигов в связи с изменением климата и загрязнением прибрежных районов. Эти изменения могут восходить по пищевой сети к вершине – хищникам и каскадом спускаться по пищевой сети до таких компонентов экосистемы как планктон.



Рис. 8. Модульная структура математической модели БМЭ Баренцева и Белого морей

Fig. 8. The module structure of the mathematical model of LME of the Barents and White seas

Модуль загрязнения и “здоровья” экосистемы. В некоторых БМЭ загрязнение и эвтрофикация стали важной причиной изменений в морских рыбных популяциях. Оценка загрязнения окружающей среды и здоровья всей БМЭ является научной проблемой. Для такого широкого понятия как “здоровье” экосистемы однозначное определение отсутствует.

Социально-экономический модуль подчеркивает практическое применение результатов научных исследований в управлении БМЭ и направлен на интеграцию социальных и экономических показателей с учетом анализа других научных оценок, чтобы гарантировать экономическую эффективность предлагаемых мер управления. Предполагается, что экономисты и аналитики тесно сотрудничают с экологами и другими специалистами для выявления и оценок вариантов управления, которые являются научно обоснованными.

Модуль управления. В настоящее время этот модуль развивается на основе демонстрационных проектов нескольких экосистем, для которых управление будет осуществляться более целостно, чем ранее.

Имеются примеры разнообразных проектов управления с экосистемных позиций для БМЭ Желтого моря, Гвинейского и Бенгальского течений, Большого Барьерного рифа и Антарктики. И для Баренцева и Белого морей необходим синтез моделей, учитывающих регионально адаптированные алгоритмы оценки хлорофилла и основанную на экспедиционных исследованиях параметризацию связи скорости роста водорослей с температурой, освещенностью и характером вертикального распределения параметров среды и биомассы фитопланктона.

Заключение. Антропогенное воздействие совместно с климатическими изменениями оказывает заметное влияние на экосистемы арктических морей. Хозяйственная деятельность, в основном регионального и локального масштаба, формирует зоны загрязнения морской среды, главным образом на участках портовой инфраструктуры. В ходе выполнения работ были получены результаты, которые существенно пополнили базы данных по океанографии, гидробиологии, экологии морских организмов. Океанографические исследования выявили наличие увеличенного залива в Баренцево море теплых атлантических вод в последние годы, в связи с этим наблюдалось расширение ареала зеленой водоросли *Ulva fenestrata* и увеличение численности камчатского краба. Следует и далее ожидать проникновения бореально-тропических и бореальных видов организмов в высокоширотные районы арктических морей.

Исследования среды морей российской Арктики показали относительно низкий общий уровень антропогенного загрязнения, который и далее продолжает снижаться. Однако существуют отдельные импактные районы, где уровни остаются высокими. Поэтому необходим постоянный мониторинг состояния биоресурсов и качества окружающей среды, и не только при проведении инженерно-экологических изысканий, но и для создания экологических стандартов и для организации природоохранных и восстановительных мероприятий в российском секторе Арктики. Сведения, полученные в ходе исследований, в купе с построенными математическими моделями, позволят прогнозировать последствия и оценивать возможность восстановления морских и прибрежных экосистем при негативном антропогенном воздействии и климатических изменениях окружающей среды.

Литература

Баканев С.В., Пинчуков М.А., Стесько А.В. Краб камчатский (*Paralithodes camtschaticus* Tilesius, 1815) // Материалы, обосновывающие объемы общих допустимых уловов беспозвоночных животных Северного рыбохозяйственного бассейна на 2016 г. (с оценкой воздействия на окружающую среду). Мурманск: Изд. ПИНРО, 2015. С. 2–14.

Климатические изменения морских экосистем европейской Арктики / Г.Г. Матишов, С.Л. Дженюк, Д.В. Моисеев, А.П. Жичкин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. Т. 3(86). С. 7–21.

Кузьмин С.А., Гудимова Е.Н. Вселение камчатского краба в Баренцево море. Особенности биологии, перспективы промысла. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 236 с.

Митяев М.В. Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. 226 с.

Пинчуков М.А. Камчатский краб // Состояние биологических сырьевых ресурсов Баренцева моря и Северной Атлантики в 2009 г. Мурманск: Изд. ПИНРО, 2009. С. 48–51.

Climate change and distribution shifts in marine fishes / A.L. Perry, P.J. Low, J.R. Ellis, J.D. Reynolds // *Science*. 2005. Vol. 308. P. 1912–1915.

Effects of climate change on global seaweed communities / C.D. Harley, K.M. Anderson, K.W. Demes, J.P. Jorve, R.L. Kordas, T.A. Coyle, M.H. Graham // *J. Phycology*. 2012. Vol. 48(5). P. 1064–1078.

Harley C.D. Climate change, keystone predation, and biodiversity loss // *Science*. 2011. Vol. 334, № 6059. P. 1124–1127.

Parmesan C., Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems // *Nature*. 2003. Vol. 421. P. 37–42.

DOI: 10.37614/2307-5252.2020.11.4.002

УДК 551.35, 551.3 (268.45, 268.46)

М.В. Митяев, М.В. Герасимова

Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск, Россия

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА И ЕГО ПОТОКОВ (МУРМАНСКОЕ И КАРЕЛЬСКОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ) СОТРУДНИКАМИ МУРМАНСКОГО МОРСКОГО БИОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Аннотация

В работе отражены результаты многолетних исследований современной литодинамики на побережьях Баренцева и Белого морей сотрудниками Мурманского морского биологического института.

Ключевые слова: Баренцево море, Белое море, литодинамика, взвешенное вещество, абразия, аэрозоли.

M.V. Mityaev, V.V. Gerasimova

Murmansk Marine Biological Institute RAS, Murmansk, Russia

HISTORY OF STUDYING THE WEIGHED SEDIMENTARY SEDIMENT AND SEDIMENT FLOWS (MURMAN AND KAREL COAST), AT THE MURMAN MARINE BIOLOGICAL INSTITUTE

Abstract

The work reflects the results of many years of research on modern lithodynamics on the coasts of the Barents and White Seas, employees of the Murmansk Marine Biological Institute.

Keywords: Barents Sea, White Sea, lithodynamics, suspended matter, abrasion, aerosols.