

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ БИОТЫ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО ЛЬДА: ПО МАТЕРИАЛАМ МОНИТОРИНГА В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА

И.А. Мельников

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117998, г. Москва, Нахимовский пр., 36; *migor39@yandex.ru*

Резюме. Анализируются результаты наблюдений в районе Северного полюса в 2007-2015 гг. за видовым составом ледовой флоры и фауны с целью оценки современного состояния и особенностей формирования биоты морского льда в современном Северном Ледовитом океане (СЛО). Для оценки состояния видового состава ледовой флоры в качестве индикаторов были выбраны водоросли двух групп диатомовых — *Centricae* и *Pennatae*, связанных с обитанием в толще льда, а видового состава ледовой фауны, обитающей на нижней поверхности льда, соответственно, ракообразные — *Amphipoda* и *Copepoda*. Время и район полевых наблюдений, орудия для отбора водных и ледовых проб, методы лабораторной обработки были едиными для всего периода исследований. Методы таксономического анализа ледовой флоры и фауны были аналогичными таковым, которые использовались ранее в экспедициях на дрейфующих станциях «Северный полюс» в 1975-1981 гг., что дает возможность для сравнения полученных данных в контексте современных климатических изменений. Показано, что количество видов водорослей обеих групп диатомовых, а также обеих групп ракообразных, связанных с обитанием в водно-ледовой среде современного СЛО заметно сократилось, при этом отмечено низкое видовое сходство между растительными и животными сообществами. Выявленные факты свидетельствуют о нестабильном состоянии биоразнообразия современного арктического морского льда, когда в условиях постоянно обновляемой среды, вследствие смены доминирования многолетних льдов сезонными льдами, ежегодно формируются независимые друг от друга сообщества.

Ключевые слова. Северный полюс, морской лед, флора, фауна, видовой состав, сходство, разнообразие.

ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE AND CHARACTERISTICS OF THE FORMATION OF THE ARCTIC SEA ICE BIOTA: ON MATERIALS OF MONITORING IN THE NORTH POLE REGION

I.A. Melnikov

P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovsky Ave, 117998, Moscow, Russia; *migor39@yandex.ru*

Abstract. The article analyzes the results of observations near the North Pole in 2007-2015 for species composition of the ice flora and fauna to assess the current

status and characteristics of the formation of the sea ice biota in the Arctic Ocean. For the assessment of the species composition of the ice flora as indicators were selected algae of the two groups of diatoms — *Centricae* and *Pennatae* inhabiting the thickness of the ice, and species composition of the ice fauna inhabiting the lower ice surface, respectively, of crustaceans — *Amphipoda* and *Copepoda*. The time and area of the field observations, instruments for sampling water and ice samples, methods of laboratory processing were the same for the whole period of research. Methods of taxonomic analysis of ice flora and fauna were similar to those previously used in expeditions at drifting stations "North Pole" in 1975-1981, which gives the opportunity for comparison of the data obtained in the context of modern climate change. It is shown that the species number of algae diatoms in both groups, and both groups of crustaceans associated with living in a water-ice environment of modern Arctic Ocean decreased remarkably, while there was a low species similarity between plant and animal communities. The facts testify to the unstable status of biodiversity the modern Arctic sea ice, when in a constantly updating environment, due to a change in the dominance of multiyear ice to seasonal ice, is annually formed independent from each other communities.

Keywords. North Pole, sea ice, flora, fauna, species composition, similarity, diversity.

Введение

Наблюдаемое в последние два десятилетия потепление в Арктике привело к заметному сокращению ледяного покрова в Северном Ледовитом океане (СЛО) как по площади, так и по толщине (Johannessen et al., 1999; Nghiem et al., 2007; Polyakov et al., 2012; Rothrock et al., 1999; Vinnikov et al., 1999 и др.). Одновременно отмечена смена доминирования многолетних льдов сезонными льдами, и в настоящее время доля многолетних льдов по разным оценкам составляет 6-8% площади ледяного покрова СЛО. Вследствие интенсивного таяния морского льда, в пределах поверхностного водного слоя происходит накопление талой воды, гидрологические и гидрохимические характеристики которой изменились: вода стала более теплой и более пресной в сравнении с аналогичными характеристиками до начала активного таяния льда (Carmack et al., 1995; Cavaliere et al., 1997; Morison et al., 1998; McPhee et al., 1998 и др.). Особенно заметные изменения физической среды были выявлены в Американо-Арктическом суббассейне в период проведения круглогодичного эксперимента SHEBA (Surface Heat Budget in the Arctic Ocean) в 1997-1998 гг. и, как следствие, выявлены изменения в составе биологических сообществ, связанных с обитанием в водно-ледовой среде (Melnikov et al., 1998). Последующие наблюдения, проводившиеся в Американо-Арктическом суббассейне (собственные неопубликованные данные экспедиции «Арктика-2000» на нэс «Ак. Федоров» в районе поднятия Менделеева и в море Бофорта на дрейфующей станции ICESX в 2003 г.), подтвердили изменения в видовом составе ледовой биоты, выявленные ранее в эксперименте SHEBA. Закономерно возник вопрос: являются ли наблюдаемые изменения в Американо-Арктическом

суббассейне локальными проявлениями или они характерны для других районов СЛО, и, в частности, его центральных районов? Для получения ответа на поставленный вопрос необходимо проведение постоянных наблюдений за видовым составом ледовой биоты в одном географическом районе. Такие наблюдения были организованы в околополюсном районе, где, начиная с Международного полярного года в 2007 г., проводится ежегодный мониторинг видового состава водно-ледовой биоты.

Почему у Северного полюса? Известно, что морские льды, образующиеся в Американо-Северном суббассейне СЛО, выносятся, главным образом, Трансарктическим дрейфом через Северный Полюс в Северную Атлантику. При организации ежегодного мониторинга в околополюсном районе можно получать данные, характеризующие биологический состав водно-ледовой экосистемы, сформировавшейся ранее в других районах СЛО. Это, своего рода, реплика тех процессов, которые формировали ледовую матрицу в прошлые сезоны, например, в круговороте Бофорта или на шельфе Чукотского и Восточно-Сибирского морей, откуда льды дрейфуют в направлении к Северному полюсу за 1,5-2 года, поэтому данные о видовом составе могут быть индикаторами изменений и «рассказать» о состоянии биоты морского льда в современном СЛО.

В основу статьи положены материалы, полученные в период работ Панарктической ледовой дрейфующей экспедиции (ПАЛЭКС, 2007-2011 гг.) и дрейфующей станции «Северный полюс-2015», на предмет изучения видового состава биоты водно-ледовой экосистемы. Анализ полученных результатов наблюдений за видовым составом ледовой флоры и фауны проводится здесь с целью оценки современного состояния и особенностей формирования биоты морского льда в современном СЛО. Для оценки состояния видового состава ледовой флоры в качестве индикаторов были выбраны водоросли двух групп диатомовых — *Centricae* и *Pennatae*, связанных с обитанием в толще льда, а видового состава ледовой фауны, обитающей на нижней поверхности льда, соответственно, ракообразные — *Amphipoda* и *Copepoda*. Их выбор в качестве индикаторов биоразнообразия современного морского льда связан с тем, что виды этих групп были самыми массовыми в составе постоянных обитателей водно-ледовой экосистемы в период доминирования многолетних льдов в ледяном покрове СЛО в середине 80-х прошлого столетия (Мельников, 1989).

В статье морские ледовые термины даются в соответствии с «Международной номенклатурой морских льдов» (Волков, Трешников, 1969), а термины и номенклатура по ледовой биоте в соответствии с рекомендацией рабочей группой SCOR “Sea Ice Ecology” (Horner et al., 1992).

Методы и материалы

Район наблюдений охватывал акваторию – в широтном направлении от географического полюса до 88° с.ш., а меридиональном, соответственно, между 150° в.д. и 60° з.д. (рис. 1)

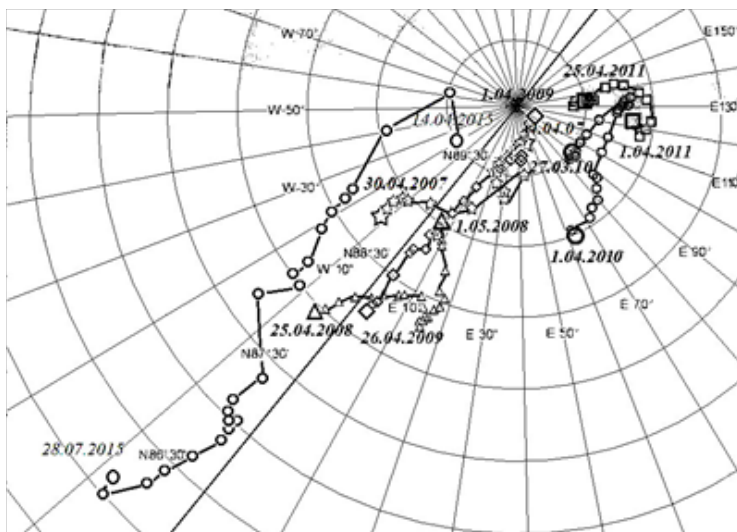


Рисунок 1. Район исследований в период работ ПАЛЭКС в апреле 2007-2011 гг. и в период дрейфа станции «Северный полюс-2015» в апреле-июле 2015 г.

Отбор ледовых кернов на предмет изучения видового состава ледовой флоры проводили с помощью механического керноотборника с внутренним диаметром 12 см в пределах ледового поля, на котором располагались дрейфующие станции. Ледяной керн делили на кратные секции по 10 или 20 см в зависимости от толщины льда. Пробу каждой секции керна помещали в пластиковые контейнеры и затем растапливали при комнатной температуре. Для выделения клеток водорослей из расплава, методом обратной фильтрации воду пропускали через нуклеопоровый фильтр с размером пор 1 мк. Сконцентрированную до объема 50 мл пробу фиксировали формалином до концентрации 1%.

Сбор ледовой фауны осуществлялся с нижней поверхности льда с помощью планктонного сачка с входным отверстием 40 x 20 см и фильтрующим конусом из планктонного сита с ячейей 150 мкм. Длина лова составляла от 10 до 20 м. Все ловы выполнялись так, чтобы выдыхаемый водолазом воздух не попадал на облавливаемую поверхность. Для этих целей сачок максимально удалялся от водолаза в момент лова. После окончания лова под водой перекрывали входное отверстие сачка, пробу поднимали на поверхность, переводили в полиэтиленовые банки и фиксировали формалином до концентрации 4%.

В настоящем исследовании были использованы методы, общепринятые в гидробиологической (Киселев, 1969) и криобиологической практике (Усачев, 1949; Horner et al., 1992). Сходство видового состава фито- и зооценозов оценивали по индексу Соренсена (Sorensen, 1948). Время, район наблюдений, организация полевых работ, орудия для отбора водных и ледовых проб, количество собранных проб, а также методы лабораторной обработки были едиными для всего периода исследований, что дает основу для сравнительного качественного и количественного анализа собранных материалов. Кроме того, использованные методы лабораторной обработки собранных проб на предмет

таксономического анализа ледовой флоры и фауны в период работы ПАЛЭКС были аналогичными таковым, которые использовались ранее в экспедициях на СП-22, 23 и 24 в 1975-1981 гг. (Мельников, 1989), что, в свою очередь, дает возможность для сравнения полученных данных в контексте современных климатических изменений в СЛО.

Результаты

Ледовая флора. Общий список идентифицированных диатомовых водорослей за весь период исследования насчитывает 85 видов, среди которых на долю центрических водорослей приходится 24, а пеннатных, соответственно, 61 вид. Динамика численности видов в каждой группе водорослей была неоднородна. Так, у диатомовых в группе *Centricae* отмечено устойчивое снижение с 12 видов в 2007 г. до 3 видов в 2015 г., а в группе *Pennatae*, напротив, первоначальное значительное снижение количества видов с 24 в 2007 г. до 5 видов в 2008 г. сменилось заметным восстановлением численности до 27 видов в 2015 г. (табл.1). Коэффициенты видового сходства Соренсена между диатомовыми сообществами, включавшие виды обеих групп, для последовательных годовых пар наблюдений изменялись в пределах 0.13-0.19. Сходство видового состава всего списка идентифицированных диатомовых водорослей за весь период наблюдений с 2007 по 2015 гг. с видовым составом водорослей в каждый год наблюдений составило 0.04. Такое низкое значение сходства между сообществами объясняется тем, что среди всех выявленных 85 видов диатомовых водорослей за весь период наблюдений, только три вида – *Chaetoceros socialis*, *Fragilariopsis cylindrus* и *Nitzschia frigida* были общими и встречались постоянно во всех исследованных пробах льда. Субдоминанты диатомовых – *Chaetoceros compressus*, *Chaetoceros diadema*, *Cylindrotheca closterium*, *Navicula transitans*, *Navicula directa*, *Nitzschia arctica*, *Nitzschia polaris* встречались 3-4 раза, а остальные виды встречались в пробах льда 1-2 раза за весь период наблюдений.

Таблица 1. Общее количество видов диатомовых водорослей в группах *Centricae* и *Pennatae* для каждого года наблюдений и коэффициенты видового сходства Соренсена между последовательными годовыми парами и в целом за период с 2007 по 2015 гг. (пояснения в тексте)

Группа	2007	2008	2009	2010	2011	2015
<i>Centricae</i>	12	6	8	7	4	3
<i>Pennatae</i>	24	5	16	10	14	27
Коэффициент Соренсена между годовыми парами наблюдений	0.13					
		0.17				
			0.19			
				0.17		
					0.13	
Коэффициент Соренсена между сообществами за период с 2007 по 2015 гг.	0.04					

Ледовая фауна. Общее число идентифицированных видов беспозвоночных, связанных с обитанием в контактном слое «вода-лед» и встреченных за весь период наблюдений, насчитывает 25 видов, среди которых доминируют *Copepoda* (14) и *Amphipoda* (5), а остальные - *Euphausiacea*, *Decapoda*, *Ostracoda*, *Chaetognatha*, *Pteropoda* и *Appendicularia* представлены по одному виду в каждой группе. Коэффициенты видового сходства Соренсена между сообществами, включавшие виды обеих групп ракообразных – *Amphipoda* и *Copepoda*, для последовательных годовых пар наблюдений изменялись в пределах 0.15-0.5, а между всеми сообществами в целом для всего периода наблюдений составил 0.08 (табл.2). Такое низкое значение видового сходства между сообществами этих двух групп ракообразных объясняется тем, что среди постоянных обитателей фауны у нижней поверхности льда только два вида - амфипода *Apherusa glacialis* и циклопоида *Oithona similis* - отмечены на всех стадиях развития животных за весь период наблюдений. Другие виды автохтонной группы, такие, как *Gammarus wilkitzkii*, *Onisimus glacialis*, *Cyclopina guilelmi* и *Eusirus holmi* встречались редко и в единичных экземплярах. Аналогичная ситуация наблюдается у *Copepoda*, в которой также отмечено снижение числа видов с 14, встреченных у льда в период 2007-2011, до 5 видов в 2015 г.

Таблица 2. Количество видов ледовой фауны, связанной с обитанием на нижней (морской) поверхности льда, и коэффициенты видового сходства Соренсена между последовательными годовыми парами и в целом за период с 2007 по 2015 гг. (пояснения в тексте)

Группа	2007	2008	2009	2010	2011	2015
<i>Amphipoda</i>	1	1	1	2	1	4
<i>Copepoda</i>	2	4	2	12	12	5
Коэффициент Соренсена между годовыми парами наблюдений	0.5					
		0.5				
			0.24			
				0.15		
Коэффициент Соренсена между сообществами за период с 2007 по 2015 гг.	0.08					

Обсуждение

В чем причина выявленных различий между видовым составом растительных сообществ, несмотря на единство района и времени наблюдений, сходство метеорологических условий и физических параметров льда? За весь период, 2007-2011 и 2015 гг., отмечено незначительное колебание средней толщины льда в пределах 140-180 см. В этой размерной группе величины солености по всей толще льда изменялись в пределах 5-8‰, что характерно для солености сезонного льда (собственные неопубликованные данные). Исходя из сходства метеорологических условий и физических параметров льда, можно предполагать о сходных условиях и, возможно, едином районе его формирования. Так, Восточно-Сибирское и Чукотское моря называют

морями вноса сезонных льдов в Арктический бассейн (Гордиенко, 1958), куда они вовлекаются и переносятся Трансарктическим течением к Северному полюсу и далее к проливу Фрама. При средней скорости дрейфа 5.2 км/сутки (данные дрейфа экспедиции “Fram 2014-2015” в Трансарктической зоне), за время с октября (начало ледообразования) по апрель (время наблюдений), лед покрывает расстояние от Чукотского и Восточно-Сибирского морей, где он образуется, до Северного полюса, где его наблюдали. Вследствие современного потепления, акватории этих морей, как и другие районы Американо-Сибирского суббассейна СЛО, заметно теряют лед в летний период и к осени, т.е. к моменту начала ледообразования, открытые ото льда пространства становятся здесь ареной формирования льда. Независимо от того, как происходит образование льда – на открытой ото льда воде или на остаточном льду после летнего таяния – видовой состав растительного сообщества сезонного (зимнего) льда будет полностью зависеть от видового разнообразия водорослей водного слоя (фитопланктона) в момент формирования ледовой матрицы. По мере продвижения льда в зоне Трансарктического дрейфа происходит механическое включение клеток фитопланктона из подледного водного слоя в лед, что определяет формирующийся видовой состав ледовой флоры. Поскольку в последнее десятилетие наблюдается заметное сокращение морского ледяного покрова и, следовательно, увеличение площади акваторий открытых ото льда водного пространства, то роль фитопланктона в летний безледовый период в СЛО по отношению к его роли в период закрытого льдом океана, несомненно, возрастает, вследствие возрастающей доступности света для фотосинтеза водорослей. Происходящие в настоящее время перестроение в ледяном покрове СЛО со смены доминирования многолетних льдов на доминирование сезонных льдов и одновременно – возрастание площади открытых ото льда водных пространств, может быть причиной нестабильности функционирования современной экосистемы СЛО. В этот переходный период от ледового к безледовому функционированию экосистемы, формирование видового состава фитопланктона может иметь нестабильный случайный характер. Следует также отметить, что формирование ледовой матрицы происходит в полярную ночь, когда фотосинтез отсутствует. В этот период качественный и количественный состав фитопланктона беден, что определяет малочисленность и неоднородность видового состава ледовых водорослей и, вероятно, может быть причиной низкого видового сходства между растительными сообществами льда, которое наблюдается в настоящее время в районе Северного полюса.

Выявленное различие между видовым составом беспозвоночных животных, обитающих в контактном слое «вода-лед», является очевидным фактом. Как изменялись физические характеристики водного подледного слоя за период наблюдений и можно ли считать их определяющими в формировании видового состава ракообразных *Amphipoda* и *Copepoda*? По данным STD-зондирования, проводившиеся в последнее десятилетие на дрейфующих станциях в районе Северного полюса в позднезимний сезон (апрель), соленость и температура в слое 0-50 м изменялись в пределах 30.5-32.9‰ и, соот-

ветственно, минус 1.74-1.81°C (С.В. Писарев, ИО РАН, личное сообщение). Такие незначительные межгодовые колебания солености (около 2‰) и температуры (0.07°C), вероятно, не могут быть причиной избирательного отбора тех или иных видов животных из планктона к обитанию у льда, поскольку ракообразные этих групп эвригалинные и эвритермные организмы, приспособленные к обитанию в широком диапазоне изменений абиотических факторов. Если физическая среда обитания животных у льда не является определяющей в формировании видового состава фауны, то, возможно, что географический фактор может играть более важную роль в этом процессе. Как и в случае с ледовой флорой, первоначальное заселение льда фауной происходит при ледообразовании на акваториях Чукотского и Восточно-Сибирского морей и затем продолжается по мере роста льда и его продвижения к Северному полюсу в зоне Трансарктического течения. На долю *Amphipoda* и *Copepoda* приходится 76% численности всех идентифицированных видов и они составляют основу двух экологических группировок криопелагического биоценоза экосистемы морского льда: автохтонной и аллохтонной, т.е. постоянных и временных обитателей у льда (Мельников, Куликов, 1980). Представители первой группы – амфиподы – это животные, связанные с обитанием у твердого субстрата, в данном случае, у поверхности льда, а второй – копеподы, временное пребывание которых у льда связано с сезонными стадиями развития животных в разные периоды года.

В настоящее время нет ясных представлений о том, как формируется видовой состав ледовой фауны, составленной из постоянных и временных обитателей, соответственно, амфипод и копепод, которых мы наблюдаем в районе Северного полюса. Можно предполагать, что амфиподы заселяют лед на начальной стадии его формирования. Если заселение фауны происходит на акваториях Чукотского и Восточно-Сибирского морей, откуда начинается Трансарктический дрейф льда в сторону Северного полюса, то можно рассматривать два наиболее вероятных процесса: 1) после полного разрушения льда, с которым были ранее связаны амфиподы, животные переходят на некоторое время к планктонному образу жизни, а осенью при новом ледообразовании снова возвращаются из планктона к обитанию у льда; 2) в случае сохранения остаточного льда после летнего таяния, те животные, которые были ранее связаны с нижней поверхностью, остаются по-прежнему в контактной зоне «вода-лед» и сохраняются в этом биотопе по мере дальнейшего роста и дрейфа льда в океане. Среди выявленных 5 видов амфипод, только *Apherusa glacialis* встречалась у льда постоянно в течение всего периода наблюдений, *Gammarus wilkitzkii* был встречен у льда дважды, а остальные – *Onisimus glacialis*, *Cyclopina guilelmi* и *Eusirus holmi* были встречены только один раз за весь период наблюдений в 2015 г. Эти факты свидетельствуют о разном характере процессов заселения льда амфиподами на начальных стадиях развития льда, что, в свою очередь, определяет неоднородность и низкое видовое сходство фауны автохтонной группы.

Видовой состав копепод, составляющих основу аллохтонной группы ледовой фауны, полностью зависит от видового состава зоопланктона поверхност-

ной арктической водной массы, с которой контактирует лед по мере дрейфа от шельфа Чукотского и Восточно-Сибирского морей к Северному полюсу. Общее количество видов и видовой состав копепод, выявленных за весь период наблюдений у льда и подо льдом, совпадало. Однако, среди идентифицированных 14 видов копепод в водном 0-50 м слое и в контактном слое «вода-лед», только циклопоида *Oithona similis* встречалась в течение всего периода наблюдений; другие массовые виды планктона поверхностной водной массы – *Calanus glacialis*, *Metridia longa*, *Paraeuchaeta glacialis*, *Spinocalanus longicornis*, *Microcalanus pygmaeus* встречались у льда редко и, особенно, в период 2007-2009 гг. Обращает на себя внимание заметный тренд к уменьшению видового сходства между фаунами копепод в период 2010-2011 гг. По сути, в этот период у льда формировались разные по видовому разнообразию сообщества. Различие между количеством видов и низкое видовое сходство можно объяснить, с одной стороны, межгодовой изменчивостью видового состава зоопланктона поверхностной водной массы, с которой контактирует лед, с другой – изменениями гидрофизических факторов, воздействующих на динамику подледных течений, вертикальное перемешивание, морфологию морской поверхности льда и др. Наблюдаемая с 2007 г. динамика ледяного покрова в СЛО, имеющая устойчивую тенденцию к уменьшению толщины и площади льдов, вероятно, влияет на интенсивность современных гидрологических процессов подо льдом, что отражается на распределении копепод в поверхностной арктической водной массе и в контактной зоне «вода-лед», что, в конечном счете, отражается на их видовом составе.

Сравнение данных о видовом составе биоты морского льда по материалам SHEBA в Американо-Сибирском суббассейне в 1997-1998 гг. с аналогичными данными, полученными в этом районе в период дрейфа ледовых станций «Северный Полюс-22, 23 и 24» в 1975-1981 гг., показало, что количество видов ледовых диатомовых водорослей заметно уменьшилось, причем одновременно возросла доля динофитовых водорослей. Резко сократилось количество видов беспозвоночных животных, таких как нематоды, копеподы, амфиподы, турбеллярии, доминировавшие ранее в толще многолетних льдов (Мельников, 1989). Аналогичные изменения в составе биоты отмечены также в последнее десятилетие в прибрежных арктических экосистемах, например, в Канадском Арктическом архипелаге (Comeau et al., 2013), во фьордах Шпицбергена (Beuchel, Lønne, 2002; Dalpadado et al., 2013; Нор, Pavlova, 2008), в Гренландском море (Werner et al., 2004) и др. Однако трудно оценить, насколько отмеченные изменения имеют устойчивый тренд, поскольку формирование и функционирование прибрежных и пелагических ледовых экосистем принципиально различаются, чтобы проводить сравнение о наблюдаемых изменениях в видовом составе биоты. Кроме того, эти наблюдения проводились эпизодически, непродолжительное время, не были связаны временем и пространством наблюдений, в отличие от многолетнего мониторинга биоты в одном географическом пространстве у Северного полюса, о котором идет речь в настоящей статье.

Выявленные низкое сходство в биоразнообразии морского льда особенно ярко проявляется для всего периода наблюдений с 2007 по 2015 гг.:

0.04 и 0.08, соответственно, для растительных и животных сообществ (Табл. 1 и 2). Можно предполагать, что в современном СЛО, на открытых ото льда акваториях, в условиях постоянно обновляемой среды ежегодно формируются независимые друг от друга сообщества. Нестабильный характер касается обоих сообществ, несмотря на то, что флора более консервативна по отношению к фауне, поскольку первая связана с внутрикристаллической матрицей льда, а последняя - с гидродинамичной системой в зоне контакта «вода-лед». Различия в биоразнообразии морского льда особенно заметны при сравнении современных данных с данными наблюдений предыдущих десятилетий. На рис. 2 показано количество видов диатомовых водорослей в группах *Centricae* и *Pennatae* и беспозвоночных животных в группах *Amphipoda* и *Copepoda* за периоды 1975-1981 гг. и 2007-2015 гг.

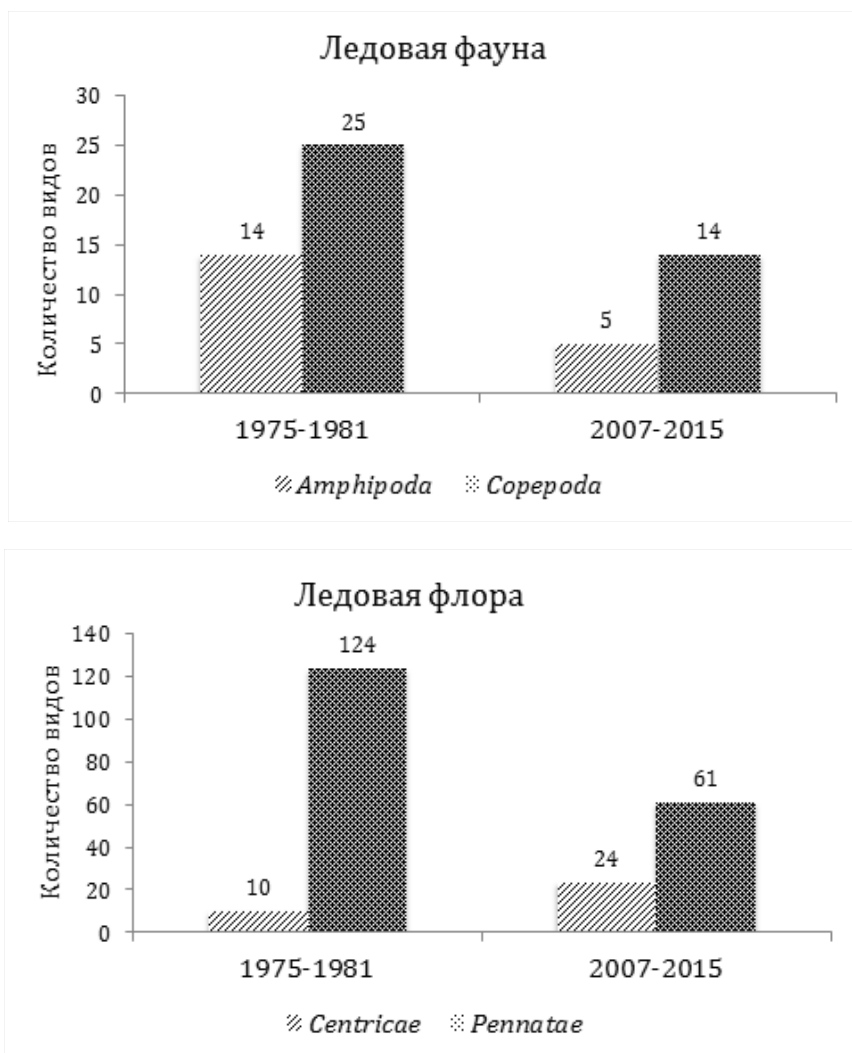


Рисунок 2. Количество видов флоры и фауны морских льдов, выявленное в период наблюдений в Антициклональном круговороте Бофорта (1975-1981) и в районе Северного полюса (2007- 2015)

Первый (1975-1981) соответствует наблюдениям в Антициклональном круговороте Бофорта в период доминирования многолетних льдов, а второй (2007-2015) – в районе Северного полюса – в период доминирования сезонных льдов. Видно, что за прошедшие три десятилетия количество видов пеннатных водорослей уменьшилось вдвое, в то время как количество видов у центрических водорослей вдвое возросло. Аналогичный тренд в сторону уменьшения численности видов отмечен у амфипод и копепод, соответственно, втрое и вдвое. Выявленные факты свидетельствуют о нестабильном состоянии биоразнообразия современного арктического морского льда в СЛО, когда в условиях постоянно обновляемой среды, вследствие смены доминирования многолетних льдов сезонными льдами, ежегодно формируются независимые друг от друга сообщества.

Выводы

На основе многолетнего мониторинга морского льда в районе Северного полюса выявлены изменения в качественном и количественном составе биоты. Индикаторами для оценки состояния биоты во льду были выбраны диатомовые водоросли двух групп *Centricae* и *Pennatae*, а в контактной зоне «вода-лед» — ракообразные — *Amphipoda* и *Copepoda*. Показано, что количество видов водорослей обеих групп диатомовых, а также обеих групп ракообразных, населяющих водно-ледовую среду современного СЛО заметно сократилось, при этом отмечено низкое видовое сходство между растительными и животными сообществами. Выявленные факты свидетельствуют о нестабильном состоянии биоты водно-ледовой экосистемы, а вероятной причиной нестабильности может быть влияние климатических изменений в современном СЛО, когда в условиях постоянно обновляемой физической среды, вследствие смены доминирования многолетних льдов сезонными льдами, ежегодно формируются разные по видовому составу растительные и животные сообщества.

Благодарности

Данная работа выполнена в рамках проектов РФФИ (15-05-03738) и РФФИ/РГО-а (17-05-41197).

Список литературы

Волков Н.А., Трешников А.Ф. 1969. О новой международной номенклатуре морских льдов. – Проблемы Арктики и Антарктики, № 32, с. 17-29.

Гордиенко П.А. 1958. Дрейф льдов в центральной части Северного Ледовитого океана. – Проблемы Севера, № 1, с. 23-34.

Киселев И.А. 1969. Планктон морей и континентальных водоемов. – Л., Наука, 657 с.

Мельников И.А., Куликов А.С. 1980. Криопелагическая фауна Центрального Арктического бассейна. - В сб.: Биология Центрального Арктического бассейна. – М., Наука, с. 97-111.

Мельников И.А. 1989. Экосистема арктического морского льда. – М., Институт океанологии АН СССР, 191с.

Усачев П.И. 1949. Микрофлора полярных льдов. – В сб.: Труды ИО АН СССР, т. 3, с. 216-259.

Beuchel F. and O.J. Lønne. 2002. Population dynamics of the sympagic amphipods *Gammarus wilkitzkii* and *Apherus aglacialis* in sea ice north of Svalbard. – *Polar Biology*, vol. 25, pp. 241-250.

Carmack, E.C., R.W. Macdonald, R.G. Perkin, F.A. McLaughlin and R.J. Pearson. 1995. Evidence for warming of Atlantic water in the southern Canadian Basin of the Arctic Ocean: Results from the Larson-93 expedition.– *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, pp. 1061-1064.

Cavaliere D.J., P. Gloersen, C.L. Parkinson, J.C. Comiso, and H.J. Zwally. 1997. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes. – *Science*, vol. 278, pp. 1104-1106.

Comeau A.M., B. Philippe, M. Thaler, M. Gosselin, M. Poulin and C. Lovejoy. 2013. Protists in Arctic drift and land-fast sea ice. – *Journal of Phycology*, vol. 49, No.2, pp. 229-240.

Dalpadado P., H. Hop, J. Rønning, V. Pavlov, E. Sperfeld, F. Buchholz, A. Rey, and A. Wold. 2013. Distribution and abundance of euphausiids and pelagic amphipods in Kongsfjorden, Isfjorden and Rijpfjorden (Svalbard) and changes in their importance as key prey in a warming marine ecosystem. – *Polar Biology*, vol. 39, pp. 1765-1784.

Hop H. and O. Pavlova. 2008. Distribution and biomass transport of ice amphipods in drifting sea ice around Svalbard. – *Deep-Sea Research. Part II*, vol. 55, pp. 2292-2307.

Horner R. et al. 1992. Ecology of the sea ice biota. 1. Habitat, terminology, and methodology. – *Polar Biology*, vol. 12, pp. 417-427.

Johannessen O.M., E.V. Shalina, M. Miles. 1999. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation. – *Science*, vol. 286, pp.1937-1939.

McPhee M., Stanton, T.P., Morison, J.H. and Martinson, D.G. 1998. Freshening of the upper ocean in the Arctic: is perennial sea ice disappearing? – *Geophysical Research Letters*, vol. 25, pp.1729-1732.

Melnikov I.A., Kolosova L.G., Welch H.E. and L.S. Zhitina. 2002. Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean. – *Deep-Sea Research*, vol.1, No. 49, pp.1623-1649.

Melnikov I.A., B. Sherr, P. Wheeler, and H. Welch. 1998. Preliminary biological and chemical oceanographic evidence for a long-term warming trend in

the Arctic Ocean (current materials of the SHEBA Ice Camp, Beaufort Sea). In: Proceedings of the Arctic Change Workshop. – Seattle, University of Washington, June 1997, Report #8, August 1998, p. 60.

Morison J.H., M. Steele, R. Andersen. 1998. Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the nuclear submarine USS Pargo. – Deep-Sea Research, vol.45, pp.15-38.

Nghiem S.V., I.G. Rigor, D.K. Perovich, P. Clemente- Colón, J.W. Weatherly and G. Neumann. 2007. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. – Geophysical Research Letters, vol.34, No.19, pp. 34-39.

Polyakov I.V., J.E. Walsh and R. Kwok. 2012. Recent changes of Arctic multiyear sea-ice coverage and the likely causes. – Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 93, pp. 145-151.

Rothrock, D.A., Y. Yu, and G.A. Maykut. 1999. Thinning of the Arctic sea-ice cover. Geophysical Research Letters, vol. 26, No. 23, pp. 3469-3472.

Serreze M.C. and J.A. Maslanik. 1997. Polar Processes in Global Climate, 13-15 Nov 1996, Cancun, Mexico, pp.110- 112. – American Met. Soc., Boston, 1997.

Sorensen, T. 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. – Biologiske Skrifter / Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, vol. 5, pp. 1-34.

Vinnikov K.Y., A. Robok, R. Stouffer, J. Walsh, C. Parkinson, D. Cavalieri, J. Mitchell, D. Garrett, and V. Zakharov. 1999. Global warming and northern hemisphere sea ice extent. – Science, vol. 286, No. 5446, pp. 1934-1937.

Werner I., H. Auel and R. Kiko. 2004. Occurrence of *Anonyxsarsi* (*Amphipoda: Lysianassoidea*) below Arctic pack ice: an example for cryobenthic coupling? – Polar Biology, vol. 27, pp. 474-481.

References

Volkov N.A., Treshnikov A.F. 1969. O novoj mezhdunarodnoj nomenclature morskikh l'dov [About the new international nomenclature of sea ice]. *Problemy Arktiki i Antarktiki – Problems of the Arctic and Antarctic*, no.32, pp. 17-29.

Gordienko P.A. 1958. Drejf l'dov v central'noj chasti Severnogo Ledovitogo okeana [Drift ice in the Central Arctic ocean]. *Problemy Severa – Problems Of The North*, no. 1, pp. 23-34.

Kiselev I.A. 1969. Plankton morej I kontinental'nyh vodoemov [Plankton of seas and continental water bodies]. Leningrad, Science, vol. 1, 657 p.

Mel'nikov I.A., Kulikov A.S. 1980. Kriopelagicheskaja fauna Central'nogo Arkticheskogo bassejna [Cryopelagic fauna of the Central Arctic basin]. *V sb.*

«*Biologija Central'nogo Arkticheskogo bassejna*» [Biology of the Central Arctic basin]. Moscow, Science, pp. 97-111.

Mel'nikov I.A. 1989. *Jekosistema arkticheskogo morskogo l'da* [The Arctic sea ice ecosystem]. Moscow, Institute of Oceanology, USSR Academy of Sciences Publ., 191 p.

Usachev P.I. 1949. Mikroflora poljarnyh l'dov [The microflora of polar ice]. *Trudi IO AN USSR – In sat: Proceedings of IO as USSR*, vol. 3, pp. 216-259.

Beuchel F. and O.J. Lønne. 2002. Population dynamics of the sympagic amphipods *Gammarus wilkitzkii* and *Apherus aglacialis* in sea ice north of Svalbard. – *Polar Biology*, vol. 25, pp. 241-250.

Carmack, E.C., R.W. Macdonald, R.G. Perkin, F.A. McLaughlin and R.J. Pearson. 1995. Evidence for warming of Atlantic water in the southern Canadian Basin of the Arctic Ocean: Results from the Larson-93 expedition. – *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, pp. 1061-1064.

Cavaliere D.J., P. Gloersen, C.L. Parkinson, J.C. Comiso, and H.J. Zwally. 1997. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes. – *Science*, vol. 278, pp. 1104-1106.

Comeau A.M., B. Philippe, M. Thaler, M. Gosselin, M. Poulin and C. Lovejoy. 2013. Protists in Arctic drift and land-fast sea ice. – *Journal of Phycology*, vol. 49, No.2, pp. 229-240.

Dalpadado P., H. Hop, J. Rønning, V. Pavlov, E. Sperfeld, F. Buchholz, A. Rey, and A. Wold. 2013. Distribution and abundance of euphausiids and pelagic amphipods in Kongsfjorden, Isfjorden and Rijpfjorden (Svalbard) and changes in their importance as key prey in a warming marine ecosystem. – *Polar Biology*, vol. 39, pp. 1765-1784.

Hop H. and O. Pavlova. 2008. Distribution and biomass transport of ice amphipods in drifting sea ice around Svalbard. – *Deep-Sea Research. Part II*, vol. 55, pp. 2292-2307.

Horner R. et al. 1992. Ecology of the sea ice biota. 1. Habitat, terminology, and methodology. – *Polar Biology*, vol. 12, pp. 417-427.

Johannessen O.M., E.V. Shalina, M. Miles. 1999. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation. – *Science*, vol. 286, pp.1937-1939.

McPhee M., Stanton, T.P., Morison, J.H. and Martinson, D.G. 1998. Freshening of the upper ocean in the Arctic: is perennial sea ice disappearing? – *Geophysical Research Letters*, vol. 25, pp.1729-1732.

Melnikov I.A., Kolosova L.G., Welch H.E. and L.S. Zhitina. 2002. Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean. – *Deep-Sea Research*, vol.1, No. 49, pp.1623-1649.

Melnikov I.A., B. Sherr, P. Wheeler, and H. Welch. 1998. Preliminary biological and chemical oceanographic evidence for a long-term warming trend in

the Arctic Ocean (current materials of the SHEBA Ice Camp, Beaufort Sea). In: Proceedings of the Arctic Change Workshop. – Seattle, University of Washington, June 1997, Report #8, August 1998, p. 60.

Morison J.H., M. Steele, R. Andersen. 1998. Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the nuclear submarine USS Pargo. – Deep-Sea Research, vol.45, pp.15-38.

Nghiem S.V., I.G. Rigor, D.K. Perovich, P. Clemente-Colón, J.W. Weatherly and G. Neumann. 2007. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. – Geophysical Research Letters, vol.34, No.19, pp. 34-39.

Polyakov I.V., J.E. Walsh and R. Kwok. 2012. Recent changes of Arctic multiyear sea-ice coverage and the likely causes. – Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 93, pp. 145-151.

Rothrock, D.A., Y. Yu, and G.A. Maykut. 1999. Thinning of the Arctic sea-ice cover. Geophysical Research Letters, vol. 26, No. 23, pp. 3469-3472.

Serreze M.C. and J.A. Maslanik. 1997. Polar Processes in Global Climate, 13-15 Nov 1996, Cancun, Mexico, pp.110- 112, American Met. Soc., Boston, 1997.

Sorensen, T. 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. – Biologiske Skrifter / Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, vol. 5, pp. 1-34.

Vinnikov K.Y., A. Robok, R. Stouffer, J. Walsh, C. Parkinson, D. Cavalieri, J. Mitchell, D. Garrett, and V. Zakharov. 1999. Global warming and northern hemisphere sea ice extent. – Science, vol. 286, No. 5446, pp. 1934-1937.

Werner I., H. Auel and R. Kiko. 2004. Occurrence of *Anonyxsarsi* (*Amphipoda: Lysianassoidea*) below Arctic pack ice: an example for cryobenthic coupling? – Polar Biology, vol. 27, pp. 474-481.

Статья поступила в редакцию: 26.03.2017 г.

После переработки: 28.04.2017 г.