

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БИОРАЗНООБРАЗИЯ МОРСКОГО ЛЬДА В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА

д-р биол. наук И.А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>, канд. биол. наук Л.С. ЖИТИНА<sup>2</sup>,  
канд. биол. наук Т.Н. СЕМЕНОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>— Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: migor39@yandex.ru

<sup>2</sup>— Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, e-mail: lgitina@mail.ru

В условиях современного потепления климата морской ледяной покров Северного Ледовитого океана (СЛО) заметно сокращается, и с конца 1990-х гг. наблюдается постепенная смена доминирования многолетних льдов сезонными льдами. В настоящее время доля многолетних льдов по разным оценкам составляет около 6–8 % его площади и доминирование сезонных льдов стало очевидным фактом, что подтверждается как спутниковой информацией о площади и толщине льда в целом для всего океана, так и полевыми морфометрическими измерениями толщины льда в различных районах СЛО. Как следствие перестроения в качественном составе ледяного покрова, ожидаются возможные изменения в составе и структуре биологических сообществ, населяющих морской лед. Целью данной работы является анализ результатов наблюдений за видовым составом ледовой флоры и фауны в околополюсном районе СЛО за период 2007–2015 гг., который проводится здесь без обсуждения причин изменений под влиянием природного или антропогенного факторов.

*Ключевые слова:* Центральный Арктический бассейн, морской лед, ледовая флора, ледовая фауна, видовой состав, численность видов, сходство, разнообразие.

Полевые работы по сбору водных и ледовых проб были выполнены в околополюсном районе СЛО в период проведения Панарктической ледовой дрейфующей экспедиции (ПАЛЭКС) в апреле 2007–2011 гг. (Мельников, 2007; 2008; 2010) и в апреле 2015 г. на дрейфующей станции «Северный полюс-2015». Район работ охватывает акваторию — в широтном направлении от географического полюса до 88° с.ш., а в меридиональном между 135° в.д. и 60° з.д. (рис. 1).

Время и организация полевых работ, использованные орудия для отбора проб, а также методы лабораторного анализа собранного материала были едиными за весь период наблюдений. Отбор ледовых кернов на видовой состав ледовой флоры проводили с помощью механического керноотборника с внутренним диаметром 12 см в пределах ледового поля, на котором располагались дрейфующие станции. Отбор проб на видовой состав ледовой фауны проводили под ровным недеформированным льдом во время водолазных погружений, используя сачок с входным отверстием 40 × 20 см и фильтрующим конусом из капронового сита с размером ячеек 150 мкм. Для оценки динамики 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,

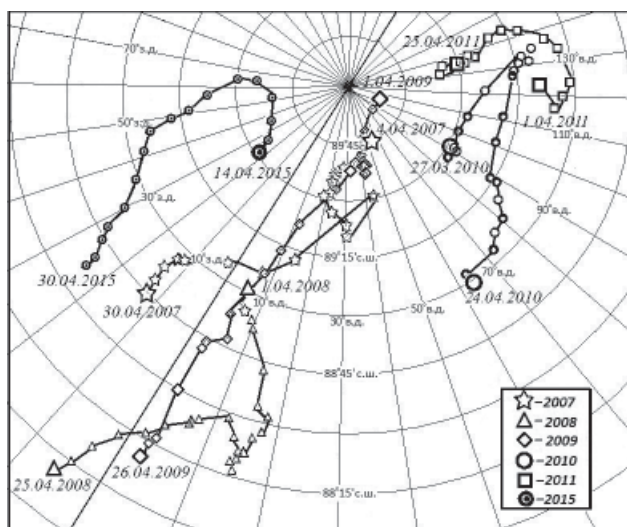


Рис. 1. Дрейф экспедиций в околополюсном районе СЛО в апреле 2007–2011 гг. и апреле 2015 г. (пояснения в тексте).

что виды этих групп были самыми массовыми в составе постоянных обитателей водно-ледовой экосистемы в период доминирования многолетних льдов в ледяном покрове СЛО (Мельников, 1989). Для оценки общности между видами в группах использовали коэффициент сходства Соренсена. Данные о собранном материале представлены в табл. 1.

*Ледовая флора.* Общий список идентифицированных диатомовых водорослей за весь период исследования насчитывает 85 видов, среди которых на долю центрических водорослей приходится 24 вида, а пеннатных — 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. 2). Коэффициент видового сходства Соренсена между диатомовыми сообществами, включавший виды обеих групп, для последовательных годовых пар наблюдений изменялся в пределах 0,13–0,19, а между всеми сообще-

Таблица 1

**Время, координаты начала и завершения наблюдений, количество ледовых кернов для анализа видового состава флоры и количество водных проб для анализа видового состава подледной фауны**

Год наблюдений	Координаты		Количество проб	
	с.ш.	в.д. / з.д.	Флора	Фауна
2007	89° 34' – 88° 55'	21° 01' – 07° 11' в.д.	10	1
2008	88° 28' – 88° 17'	17° 42' – 14° 59' в.д.	5	1
2009	89° 45' – 89° 43'	44° 12' – 41° 06' в.д.	2	1
2010	89° 27' – 89° 28'	88° 46' – 106° 27' в.д.	2	3
2011	89° 04' – 89° 08'	132° 13' – 136° 22' в.д.	4	1
2015	89° 31' – 88° 00'	20° 40' – 11° 19' з.д.	5	5

Таблица 2

**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 для всего периода наблюдений**

Группа	2007	2008	2009	2010	2011	2015
Centricae	12	6	8	7	4	3
Pennatae	24	5	16	10	14	27
Коэффициент Соренсена между годовыми парами наблюдений	<b>0,13</b>					
		<b>0,17</b>				
			<b>0,19</b>			
				<b>0,17</b>		
					<b>0,13</b>	
Коэффициент Соренсена между сообществами для всего периода наблюдений	<b>0,04</b>					

ствами в целом для всего периода наблюдений составил 0,04. Такие низкие значения видового сходства между сообществами объясняются тем, что среди всех выявленных 85 видов диатомовых водорослей 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*, *Navicula* sp., *Nitzschia arctica*, *Nitzschia polaris* — встречались 3–4 раза, а остальные виды были встречены в пробах льда всего 1–2 раза за весь период наблюдений.

В чем же 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 солёности по всей толще льда изменялись в пределах 5–8 ‰, что характерно для солёности сезонного льда. Исходя из сходства метеорологических условий и физических параметров льда, можно сделать вывод 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 сезонного 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 (Околотков, 1989; 1990). По мере продвижения льда в зоне Транс-

арктического дрейфа происходит механическое включение клеток фитопланктона из подледного водного слоя в лед, что определяет формирующийся будущий видовой состав ледовой флоры. Поскольку в последнее десятилетие наблюдается заметное сокращение морского ледяного покрова, а следовательно, увеличение площади водной поверхности, свободной от льда (Алексеев и др., 2010), 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 перестроения 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 современных пелагической и ледовой экосистем СЛО. В этот переходный период от ледового к безледовому функционированию экосистемы формирование видového 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 видového состава ледовых водорослей и, вероятно, может быть причиной низкого видového сходства между растительными сообществами льда, которое наблюдается в настоящее время в районе Северного полюса.

*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 (Мельников, Семенова, 2013). Коэффициент видového сходства Соренсена между сообществами, включавший виды обеих групп ракообразных — Amphipoda и Copepoda, для последовательных годовых пар наблюдений изменялся в пределах 0,15–0,5, а между всеми сообществами в целом для всего периода наблюдений составил 0,08 (табл. 3). Такие низкие значения видového сходства между сообществами этих двух групп ракообразных объясняются тем, что среди постоянных обитателей фауны у

Таблица 3

**Количество видов ледовой фауны, связанной с обитанием на нижней (морской) поверхности льда и коэффициенты видového сходства Соренсена между последовательными годовыми парами и в целом для всего периода наблюдений**

Группа	2007	2008	2009	2010	2011	2015
Amphipoda	1	1	1	2	1	4
Copepoda	2	4	2	12	12	5
Коэффициент Соренсена между годовыми парами наблюдений	<b>0,5</b>					
		<b>0,5</b>				
			<b>0,24</b>			
				<b>0,15</b>		
					<b>0,18</b>	
Коэффициент Соренсена между сообществами для всего периода наблюдений	<b>0,08</b>					

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. Такой ключевой вид автохтонной фауны, как *Gammarus wilkitzkii*, был встречен дважды в 2010 г. Аналогичная ситуация наблюдается у Copepoda, в которой также отмечено заметное различие численности видов за весь период наблюдений.

Выявленное межгодовое различие в видовом составе 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, которые проводились в последнее десятилетие на дрейфующих станциях в центральных районах СЛО в позднелетний сезон (Писарев, 2008), соленость и температура в слое 0–50 м изменялись в пределах 30,5–32,9 ‰ и, соответственно, минус 1,74–1,81 °С. Такие незначительные межгодовые колебания солености (около 2 ‰) и температуры (0,07°С), 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 видами фауны 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 (Тимофеев, 1995). 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, Семенова, 2013). Представители первой группы — амфиподы — это животные, связанные с обитанием у твердого субстрата, в данном случае у поверхности льда, а второй — копепоиды, временное пребывание которых у льда связано с сезонными стадиями развития животных в разные периоды года (Павштик, 1977).

В настоящее время нет ясных представлений о том, как формируется видовой состав ледовой фауны, составленной из постоянных и временных обитателей, соответственно, амфипод и копепоид, 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 (рис. 2) 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 по одному разу за весь период наблюдений в 2015 г. Эти факты свидетельствуют о разнохарактерности процессов заселения амфипод на начальных стадиях развития льда, что, в свою очередь, определяет неоднородность и низкое видовое сходство фауны данной автохтонной группы.

Видовой состав копепод, составляющих основу аллохтонной группы ледовой фауны, полностью зависит от видового состава зоопланктона поверхностной 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, особенно редко — 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 (Алексеев и др., 2010), вероятно, влияет на интенсивность современных гидрологических процессов подо льдом, что отражается на распределении копепод в поверхностной арктической водной массе и в зоне взаимодействия «вода–лед», что в конечном счете отражается на их видовом составе, т.е. на биоразнообразии данных экосистем.

*Данная работа выполнена в рамках проекта РФФИ 15-05-03738. Авторы выражают благодарность сотруднику БИН РАН Р.М. Гогореву за помощь в обработке проб ледовой флоры по материалам ПАЛЭКС-2008 г., сотрудникам ИО РАН А.Г. Тимонину за оказанную помощь в обработке планктона по материалам ПАЛЭКС-2007 г. и С.В. Писареву за предоставленные данные по гидрофизике, полученные в период ПАЛЭКС-2007–2011 гг.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Балакин А.А. Изменение климата в морской Арктике в начале XX века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 22–33.
- Гордиенко П.А. Дрейф льдов в центральной части Северного Ледовитого океана // Проблемы Севера. 1958. № 1. С. 5–29.
- Мельников И.А. Экосистема арктического морского льда. М.: ИО АН СССР, 1989. 191 с.
- Мельников И.А. Панарктическая ледовая дрейфующая экспедиция // Океанология. 2007. Т. 47 (6). С. 952–954.

- Мельников И.А.* Исследования на дрейфующей ледовой станции в апреле 2008 г. // *Океанология*. 2008. Т. 48 (6). С. 952–953.
- Мельников И.А.* Панарктическая ледовая дрейфующая экспедиция (апрель 2009) // *Океанология*. 2010. Т. 50 (2). С. 953.
- Мельников И.А., Семенова Т.Н.* Характеристика криопелагической фауны современного морского ледового покрова Центрального Арктического бассейна // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013. № 4 (98). С. 14–24.
- Околовцов Ю.Б.* Ледовая флора Восточно-Сибирского моря (по сборам в мае 1987 г.) // *Novotates Systematicae Plantarum non Vascularium*. 1989. Т. 26. С. 36–41.
- Околовцов Ю.Б.* Ледовая флора Чукотского моря (по сборам в марте–апреле 1988 г.) // *Novotates Systematicae Plantarum non Vascularium*. 1990. Т. 27. С. 16–20.
- Павитикс Е.А.* Сезонные изменения возрастного состава популяций веслоногих рачков Calanoida в Арктическом бассейне. Исследование фауны морей. Зоол. ин-т АН СССР. Л.: Наука, 1977. Т. 19 (27). С. 56–72.
- Писарев С.В.* Температурно-соленостные характеристики водных масс котловины Амундсена в Арктическом бассейне: изменения, начавшиеся в 1990-е годы продолжают // *Природные процессы в полярных областях Земли / Отв. ред. В.М. Котляков*. Москва: ИГ РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 88–94.
- Тимофеев С.Ф.* Зоопланктон и водные массы Северного Ледовитого океана // *Влияние Гольфстрима на жизнь в пелагиали арктических морей*. Апатиты, 1995. С. 72–85.
- Melnikov I.A.* Ecology of Arctic Ocean cryopelagic fauna / Herman I (Ed.) // *The Arctic seas: climatology, oceanography, geology and biology*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989. P. 235–255.

*I.A. MELNIKOV, L.S. ZHITINA, T.N. SEMENOVA*

## **RECENT CONDITION OF THE SEA ICE BIODIVERSITY WITHIN THE NORTH POLE REGION**

In conditions of modern climate warming, the sea ice cover of the Arctic Ocean has been shrinking, and since the late 90's there have been a gradual shift of dominance of multiyear ice to seasonal ice. As a result of the rebuild in the qualitative composition of the ice cover, it is necessary to expect possible changes in the composition and structure of biological communities that inhabit the sea ice. The aim of this work is the analysis of the species composition of the sea ice flora and fauna, which based on the result of observations in the North Pole area of the Arctic Ocean for the period 2007–2015. This analysis is held here without discussion of causes of changes under the influence of natural or anthropogenic factors.

*Keywords:* Central Arctic Basin, sea ice, cryoflora, cryofauna, species composition, species number, similarity, diversity.