

ЭКОСИСТЕМЫ МОРСКОГО ЛЬДА И ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В АРКТИКЕ¹

© 2005 г. И. А. Мельников

Институт океанологии РАН, Москва 117997

e-mail: migor@online.ru

Статья принята к печати 25.05.2004 г.

В последние два десятилетия в Арктике наблюдается четкий температурный тренд в сторону потепления. Потепление привело к уменьшению ледового покрова в Северном Ледовитом океане (СЛО) как по площади, так и по толщине вследствие более интенсивного таяния. В пределах поверхностного слоя 0–30 м происходит накопление талой воды, гидрологические и гидрохимические характеристики которой заметно изменились: это более теплая и пресная вода с меньшим содержанием питательных веществ. Наличие устойчивого термоклина на глубине 30–35 м, ослабляющего вертикальное перемешивание вод, препятствует активному обмену между богатыми биогенными веществами водами, лежащими глубже термоклина, и бедными подледными водами, что сказывается на качественном и количественном составе фито- и зоопланктона верхнего океана. Наблюдаемые климатические изменения и связанные с ними изменения ледовой среды привели к заметным перестройкам в составе, структуре и функционировании биологических сообществ, населяющих морской лед и подледный слой поверхностной водной массы. Сравнительный анализ материалов, собранных в антициклональном круговороте СЛО в период дрейфа ледовых станций "Северный Полюс-22" (1975–1981) и SHEBA (1997–1998), показал, что за последние два десятилетия численность видов ледовых диатомовых водорослей заметно уменьшилась, причем одновременно возросла роль пресноводных водорослей. Резко сократилась численность доминировавших ранее в толще многолетних льдов беспозвоночных животных, таких как нематоды, копеподы, амфиподы и турбеллярии. Выявленные изменения позволяют предполагать, что современная экосистема "морской лед – верхний океан" перестраивается с типично морской на солоноватоводную экологическую систему. Основной причиной таких изменений, вероятно, можно считать глобальное потепление в Арктике.

Ключевые слова: Арктика, морской лед, климат, изменения, биота.

Sea ice–upper ocean ecosystems and global changes in the Arctic. I. A. Melnikov (Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow 117997)

During the last two decades, in the Arctic Region there is a clear temperature trend towards warming. The warming leads to a reduction of the Arctic ice cover (in area and in thickness) because of increased melting. Melt water is accumulated within the 0–30 m layer, markedly changing its hydrological and hydrochemical characteristics: this water is warmer and fresher and contains lower concentrations of nutrients. Stable thermocline at the 30–35 m depth weakens vertical mixing of water and hampers active exchange between nutrient-rich water lying below the thermocline and nutrient-poor under-ice water. This affects the qualitative and quantitative composition of phyto- and zooplankton of the upper ocean. The climate change and related changes in the ice environment cause marked alterations in the composition and structure of the biological communities of sea ice and under-ice surface water. Comparative analysis of materials collected in the Arctic anticyclonic gyre at the drift-ice stations "Nothorn Pole-22" (1975–1981) and SHEBA (1997–1998) shows that over the last two decades the number of species of ice diatoms has markedly decreased and the role of fresh-water algae has increased. The abundance of nematodes, copepods, amphipods, and turbellarians, which were the dominant forms in perennial ice, has also decreased sharply. The results suggest that the present-day sea ice–upper ocean ecosystem is changing from typically marine to brackish-water ecological system. The main reason for these changes is probably global warming in the Arctic Region. (Biologiya Morya, Vladivostok, 2005, vol. 31, no. 1, pp. 3–10).

Key words: Arctic Region, sea ice, climate, change, biota.

Морской арктический ледовый покров является ключевым компонентом экосистемы Северного Ледовитого океана (СЛО). Как прослойка между двумя различными физическими средами – водой и воздухом – лед оказывает существенное влияние на поддержание термодинамического равновесия между океаном и атмосферой вследствие изменения его среднеравновесной толщины, причем равновесие этой системы поддержи-

вается и определяется стабильностью климатической системы в Арктике (Зубов, 1945). В последние два десятилетия наблюдается четкий температурный тренд в сторону потепления. Как следствие потепления в СЛО отмечено заметное уменьшение площади и толщины ледового покрова, повышение температуры и опреснение поверхностных арктических вод (Carmack et al., 1995; Serreze, Maslanik, 1997; McPhee et al., 1998;

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-05-64357) и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF 2363-MO-02).

Morison et al., 1998, и др.). Климатические изменения и связанные с ними изменения ледовой среды обусловили перестройки в составе, структуре и функционировании биологических сообществ, населяющих морской лед и подледный слой поверхностной арктической водной массы (Melnikov et al., 1998, 2002; Melnikov, Kolosova, 2001). Причина данных перемен в изменении гидрофизических и гидрохимических характеристик поверхностных вод, контактирующих с морским ледовым покровом: так, средняя соленость в слое 0–30 м за последние два десятилетия уменьшилась почти на 4‰, а его температура повысилась на 0.2°C (McPhee et al., 1998).

Основная цель настоящей работы – показать, как реагируют экосистемы морского льда и подледного слоя на глобальные изменения в Арктике. Для этого необходимо рассмотреть и проанализировать состав, структуру и особенности функционирования экосистемы морского льда и контактирующих с ним вод верхнего океана. В данной статье "верхним океаном" условно названы воды перемешанного слоя выше термоклина мощностью 0–30 м, характеристики и динамика которых связаны с морским ледовым покровом.

Для проведения сравнительного анализа использованы материалы, полученные с разницей в два десятилетия в антициклональном круговороте СЛО на дрейфующих станциях "Северный Полюс-22 и 23" (СП) в 1975–1981 гг. (Мельников, 1989) и на дрейфующей станции SHEBA (Surface Heat Budget of the Arctic Ocean) в 1997–1998 гг. (Kolosova, Melnikov, 2001; Melnikov et al., 2001, 2002; Melnikov, Kolosova, 2001). К обсуждению результатов привлечены также данные STD-профилирования, полученные на ледовой станции AIDJEX, дрейфовавшей в антициклональном круговороте в 1975–1976 гг. (McPhee et al., 1998). Результаты сравнительного анализа ключевых экосистем обсуждаются мною в двух разделах: первый посвящен экосистеме морского льда, второй – экосистеме верхнего океана.

ЭКОСИСТЕМА МОРСКОГО ЛЬДА

Площадь, распространение и толщина ледового покрова

По имеющимся данным, в конце 70-х гг. прошлого столетия (Атлас океанов, 1980) площадь ледового покрова в СЛО в период его максимального развития составляла 8.26 млн. км² (март), а в период минимального – 6.90 млн. км² (сентябрь), т.е. потери льда во время летнего ледотаяния составляли 1.36 млн. км².

Морской ледовый покров СЛО неоднороден по составу: его центральный глубоководный Арктический бассейн (АБ) постоянно занят мощными многолетними льдами (более 80% площади), в то время как мелководные окраинные моря покрываются сезонными льдами, образующимися зимой на открытой воде их акваторий после летнего таяния. В последние два десятилетия наблюдается заметное смещение кромки льда к северу приблизительно на 2–3 градуса, что подтверждает

спутниковую информацию о сокращении площади ледового покрова начиная с 70-х гг. (Cavaliere et al., 1997). Так, в Канадской Арктике площадь, занятая многолетними льдами, сократилась почти на 30%, а в целом для Арктического бассейна уменьшение площади ледового покрова составляет $2.9 \pm 0.4\%$ за десятилетие (Parkinson et al., 1999).

Хорошо известно, что арктический морской лед является тонким и чувствительным индикатором климата: чем теплее, тем интенсивнее таяние, и, напротив, чем холоднее, тем активнее и мощнее нарастание его толщины. Находясь в условиях высокого температурного градиента между холодной атмосферой и теплым океаном, лед непрерывно изменяет свою толщину вследствие летнего стаивания сверху и зимнего компенсационного нарастания снизу. Зубов (1945) ввел в морское ледоведение понятие о среднеравновесной толщине морского льда в СЛО. Ее предельное значение (Н) определяется количеством градусо-дней мороза (R), т.е. суммой отрицательных температур воздуха (индекс холода) за все время нарастания льда в заданном районе. Зависимость между ними выражается формулой $H = 2.7\sqrt{R}$ (Зубов, 1945). Это выражение включает условие о стационарности льда, а следовательно, о стабильности климата в СЛО. Однако в СЛО число градусо-дней мороза колеблется от 5000 на шельфе до 8000 в центральных районах, поэтому в каждом географическом районе будет формироваться своя определенная толщина, а колебания относительно ее средней величины, в свою очередь, будут служить мерой климатических изменений, обуславливающих дисбаланс равновесной толщины. Так, в районе антициклонального круговорота (Канадский сектор СЛО) индекс холода R уменьшился с 7000 в 1974–1975 гг. до 6200 в 1997–1998 гг., соответственно, и толщина многолетнего льда уменьшилась от средних значений 3 м (Бузуев, 1968; Koerner, 1973; Wadhams, 1983; Мельников, 1989, и др.) до 1.4–2.1 м (Perovich et al., 1999; Melnikov, 2000).

Таким образом, уменьшение продолжительности холодного периода, с одной стороны, и возрастание количества тепла, поступающего из атмосферы на ледовую поверхность, – с другой, способствовали сокращению площади и толщины арктического ледового покрова от его среднеравновесного значения 3 м в 70-е гг. до 1.5–2 м в настоящее время. Анализ данных, полученных с американских субмарин, показывает, что толщина морского льда в центральных районах СЛО в течение последних 20 лет уменьшилась на 43% (Rothrock et al., 1999). При таких темпах уменьшения толщины ледового покрова и его площади уже в ближайшее десятилетие ожидается сокращение доминирования многолетнего морского льда в АБ и возрастание роли сезонных льдов, формирующихся на открытой воде в зимний период. Другими словами, ледовый покров СЛО будет приобретать черты ледового покрова Южного океана, в котором доминируют сезонные льды (более 80% площади ледового покрова Антарктики), формирующиеся на его акватории зимой и тающие ле-

том, т.е. со временем Арктика будет приобретать черты, характерные для Антарктики.

Гидрохимические компоненты

Показатели солености многолетнего льда со станции SHEBA почти в 2 раза ниже, а однолетнего льда в 2 раза выше таковых со станции СП-22 (табл. 1). Наиболее любопытной особенностью распределения кремния в толще как многолетнего, так и однолетнего льда на станции SHEBA являются очень низкие значения концентрации, которые на порядок ниже таковых на СП-22: 3.76 и 2.18 мкг-ат/л соответственно в многолетнем и однолетнем льду на СП-22 и 0.40 и 0.28 мкг-ат/л на станции SHEBA. Такое высокое различие может быть вызвано потерей кремния с талой водой вследствие ее активного выноса из льда в подстилающую лед морскую воду, а также интенсивного внутриобъемного таяния льда в летний период на станции SHEBA, в то время как на станции СП-22 подобного мощного таяния не наблюдалось. Потеря кремния с талой водой, в свою очередь, может быть причиной более низкой численности видов диатомовых (основных потребителей кремния при фотосинтезе) на станции SHEBA по сравнению с их численностью на СП-22.

Концентрация хлорофилла *a* в толще многолетнего льда на станции SHEBA была в 2 раза ниже, а однолетнего в 3 раза выше, чем на СП-22. В течение зимы концентрация хлорофилла *a* в многолетнем льду на станции SHEBA не претерпевала заметных изменений. С октября по февраль концентрация колебалась от 0.3 до 0.5 мг/м², в марте она достигла значения 1.2 мг/м² (весенний максимум цветения водорослей), а затем снизилась до величин, отмеченных в зимний период. Заметный рост концентрации хлорофилла *a* наблюдался летом в июле–августе, когда ее величины достигли 2 мг/м² (летний максимум). В осенний период (сентябрь) концентрация хлорофилла *a* упала до значений, зарегистрированных в предыдущий осенний сезон, — около 0.4 мг/м². Выявленная динамика хлорофилла *a* отражает зимнюю и летнюю стадии сукцессии ледовой флоры, в которой зарегистрировано 17 видов из группы Bacillariophyta, 5 — Dinophyta и по одному виду из групп Silicoflagellatae, Chlorococcales и Chrysophyta.

Ледовая биота

Общий список ледовых водорослей, идентифицированных на станциях СП-22 и SHEBA, насчитывает 110 видов, из них 84 вида, или 76% от общего числа, обнаружено на станции СП-22 и лишь 26 видов, или 23%, — на станции SHEBA (табл. 2). Преобладание морских диатомовых над другими группами водорослей является отличительной особенностью фитоценоза морских льдов на станции СП-22. Пресноводные водоросли (в основном из группы Chlorophyta) встречались на СП-22 только в талой воде снежниц, развивающихся в летний период на верхней поверхности многолетнего льда или в верхних отделах этого льда. Важной особенностью фитоценоза многолетнего и однолетнего льда

на станции SHEBA является заметное преобладание пресноводных водорослей из групп Pyrrophyta, Chlorophyta и Chrysophyta над морскими диатомовыми водорослями, причем первые распределены по всей вертикальной толще как многолетнего, так и однолетнего льда. Среди диатомовой флоры доминировали *Cylindrotheca closterium*, *Leptocyclus minimus*, *Navicula vanhoefii* и *Nitzschia neofrigida* (63% численности клеток), а среди Chrysophyta — *Groenlandiella brevispina* (31%).

Интригующей особенностью морских льдов со станции SHEBA можно считать полное отсутствие интестициальной фауны. Если в толще многолетнего льда на станции СП-22 отмечены такие группы, как Tintinnoidea, Nematoda, Turbellaria, Copepoda, Amphipoda и Acarina, численность которых достигала 1000 экз/м³ (Мельников, 1989), то в ледовых пробах со станции SHEBA не было обнаружено ни одного живого экземпляра из перечисленных выше групп (табл. 3). Во всех исследованных пробах зафиксированы лишь единичные створки мертвых фораминифер, фрагменты тел тинтиннид, нематод и копепод.

Выполненный сравнительный анализ данных, полученных на станциях СП-22 и SHEBA, позволяет сделать следующие выводы:

1. Популяции ледовых диатомовых водорослей, идентифицированных во всех типах морского льда в период дрейфа станции SHEBA, малочисленны как по количеству видов, так и по численности клеток.

2. Пресноводные водоросли, идентифицированные ранее на СП-22 только в пределах верхней поверхности многолетнего морского льда, в настоящее время распределены по всей его толще (SHEBA).

3. Беспозвоночные животные, такие как нематоды, копеподы, амфиподы и турбеллярии, по численности и биомассе доминировавшие в толще многолетнего льда в период дрейфа станции СП-22 (1975–1981), не обнаружены в пробах морских льдов на станции SHEBA (1997–1998).

Выявленные изменения в составе и структуре сообществ, населяющих морской лед, вероятно, можно объяснить возросшей интенсивностью таяния ледового покрова в последние два десятилетия.

ЭКОСИСТЕМА ВЕРХНЕГО ОКЕАНА

Гидрологические особенности

Вследствие интенсивного таяния морского льда наблюдаются опреснение и потепление поверхностных вод, контактирующих с ледовым покровом. Начиная с середины 70-х гг. соленость воды в одном и том же районе антициклонального круговорота в Канадской Арктике СЛО в слое 0–30 м снизилась от 30–31‰ (СП-22, 1975–1981 и AIDJEX, 1975) до 27–28‰ (SHEBA, 1997–1998), а температура воды в этом слое повысилась на 0.2°C (McPhee et al., 1998) (см. рисунок). Сток пресных талых вод способствовал формированию подо льдом мощной солоноватой прослойки до глубины 30–35 м и образованию острого термоклина. Важной особенностью гидрологического режима в районе дрейфа

Таблица 1. Толщина льда, время и место сбора проб, физические и химические значения, полученные для многолетнего и однолетнего льда, по сборам на дрейфующих станциях СП-22 и SHEBA

Проба	Толщина, см	Время сбора	Широта	Долгота	Соленость, ‰	Кремний, мкг-ат/л	Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л
СП-22, многолетний лед							
1	404(11)	15.02.80	77°53' N	153°49' E	2.02±1.69	6.10±2.11	0.45±0.44
2	350(9)	11.03.80	78°17' N	153°35' E	2.42±1.43	2.60±0.53	0.23±0.18
3	163(5)	31.03.80	78°21' N	153°07' E	5.60±2.14	3.51±4.05	0.18±0.22
4	199(6)	01.04.80	78°22' N	153°01' E	5.07±0.48	2.21±0.43	0.09±0.01
5	162(5)	04.04.80	78°22' N	152°30' E	5.52±0.86	3.93±0.50	0.06±0.04
6	339(11)	18.04.80	78°35' N	151°52' E	3.17±0.56	3.20±1.33	0.61±0.34
7	211(4)	20.04.80	78°39' N	151°48' E	4.86±4.21	4.68±2.39	0.24±0.18
Среднее					4.09±1.62	3.76±1.62	0.35±0.20
СП-22, однолетний лед							
1	104(3)	23.01.80	77°40' N	154°99' E	0.99±0.09	1.90±0.69	0.05±0.01
2	114(4)	01.02.80	77°48' N	153°54' E	0.84±0.19	Нд	Нд
3	129(4)	26.02.80	78°05' N	154°36' E	0.88±0.22	1.98±0.33	0.09±0.07
4	167(4)	28.02.80	78°07' N	153°54' E	1.28±0.25	2.67±0.70	0.06±0.03
Среднее					0.99±0.19	2.18±0.57	0.06±0.03
SHEBA, многолетний лед							
1	244(10)	27.10.97	75°17' N	143°31' W	Нд	Нд	0.12±0.08
2	235(12)	12.11.97	76°09' N	146°26' W	1.43±0.96	0.12±0.16	0.24±0.19
3	185(9)	28.11.97	75°07' N	147°33' W	1.67±1.08	0.16±0.14	0.09±0.15
4	216(11)	10.12.97	75°44' N	150°25' W	2.16±1.36	Нд	0.31±0.53
5	178(9)	29.12.97	75°17' N	149°59' W	2.62±1.60	0.72±0.43	0.13±0.05
6	177(9)	12.01.98	74°51' N	150°25' W	2.97±1.87	0.74±0.37	0.11±0.05
7	260(13)	27.01.98	74°51' N	155°38' W	2.10±1.30	0.46±0.27	0.31±0.32
8	281 (14)	18.02.98	74°54' N	157°50' W	2.55±1.58	0.35±0.22	0.05±0.04
9	417(21)	09.03.98	75°28' N	160°18' W	2.08±0.95	0.08±0.05	0.17±0.13
10	287(15)	29.04.98	75°57' N	166°13' W	2.50±2.02	0.45±0.37	0.09±0.09
11	291(14)	25.05.98	76°24' N	167°11' W	0.94±0.50	0.56±0.18	0.11±0.13
Среднее					2.10±1.32	0.40±0.24	0.16±0.16
SHEBA, однолетний лед							
1	62(6)	19.10.97	75°20' N	144°29' W	0.41±0.19	Нд	0.20±0.07
2	66(6)	27.10.97	75°17' N	143°31' W	0.58±0.32	Нд	0.46±0.50
3	77(7)	11.11.97	76°09' N	146°23' W	1.74±0.89	0.08±0.01	0.13±0.10
4	79(8)	26.11.97	76°13' N	147°43' W	3.03±1.85	0.36±0.27	0.41±0.25
5	116(6)	12.12.97	75°41' N	150°44' W	2.42±1.54	Нд	0.14±0.09
6	95(9)	27.12.97	77°17' N	149°57' W	2.86±1.56	0.44±0.26	0.10±0.11
7	137(7)	11.01.98	74°53' N	150°12' W	2.86±1.62	0.45±0.19	0.05±0.02
8	150(8)	24.01.98	74°38' N	153°25' W	3.42±1.99	0.14±0.05	0.06±0.04
9	132(7)	16.02.98	74°53' N	157°50' W	3.31±1.58	0.11±0.03	0.13±0.07
10	171(9)	09.03.98	75°28' N	160°18' W	3.39±1.75	0.05±0.03	0.12±0.08
11	142(7)	29.04.98	75°57' N	166°13' W	Нд	0.25±0.09	0.18±0.16
12	138(7)	25.05.98	76°24' N	167°11' W	Нд	0.67±0.28	0.20±0.16
Среднее					2.40±1.33	0.28±0.13	0.18±0.13

Примечание. Нд – нет данных; в скобках – количество слоев.

станции SHEBA было устойчивое и продолжительное существование термоклина в течение всей зимы мощностью 2–3 м на глубине между 30 и 35 м, что, вероятно, являлось своеобразным физическим барьером для турбулентного перемешивания вод, контактирующих с ледовой поверхностью и лежащих глубже 35 м (McPhee et al., 1998).

Гидрохимические компоненты

Концентрация минеральных форм фосфора и кремния в поверхностном слое воды (в целом для слоя 0–30 м) была значительно ниже, чем в воде глубже термоклина (табл. 4). В зимний период (ноябрь–февраль) концентрация минеральных форм кремния и фос-

Таблица 2. Число видов водорослей, идентифицированных в ледовых пробах, собранных на дрейфующих станциях СП-22 (1979–1980) и SHEBA (1997–1998) в Канадском секторе Арктики

Таксон	СП-22	SHEBA
Bacillariophyta	79	18
Dinophyta	Ho	5
Chrysophyta	Ho	1
Chlorophyta	Ho	1
Silicoflagellatae	5	1

Примечание. Ho – не обнаружены.

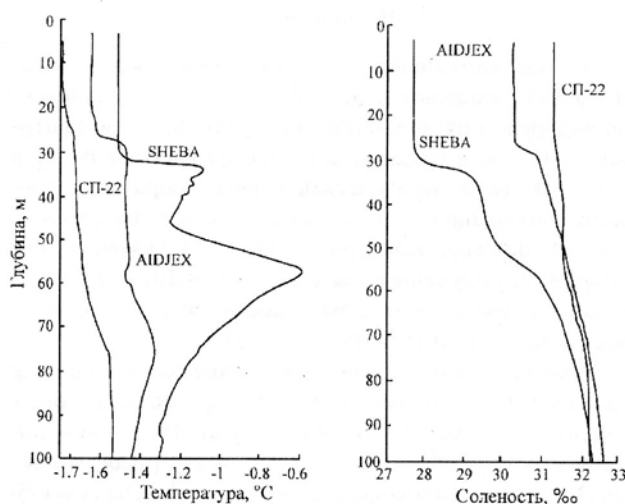
фора в воде выше термоклина (в среднем для поверхностного водного слоя 0–30 м) составляла соответственно 4.8 и 0.72 мкг-ат/л, в летний период (март–сентябрь) – соответственно 8.0 и 0.94. Ниже термоклина (в среднем для подповерхностного водного слоя 30–100 м) концентрация этих элементов зимой достигала 15.6 (Si) и 1.27 (P) мкг-ат/л, летом – 23.8 (Si) и 1.56 (P) мкг-ат/л. Среднегодовые значения концентраций минеральных форм фосфора и кремния в водном столбе 0–100 м за два десятилетия уменьшились в среднем на 10%: с 0.012 мкг-ат P/м² (СП-22) до 0.011 мкг-ат/л P/м² (SHEBA) и с 0.16 до 0.13 мкг-ат Si/м² соответственно. Среднесезонные концентрации минеральных форм кремния и фосфора уменьшились в пределах поверхностных и подповерхностных вод неравномерно: в слое 0–30 м на станции SHEBA в 2.4 раза (зима) и в 1.7 раза (лето) по сравнению с теми же периодами на станции СП-22, а в слое 30–100 м их соотношение составило 1.6 и 0.8 соответственно. И хотя среднегодовые величины концентраций биогенных форм кремния и фосфора в слое 0–100 м уменьшились незначительно (около 10%), есть основание говорить о том, что в прошедшие два десятилетия в пределах антициклонального круговорота в море Бофорта происходило заметное перестроение гидрохимического режима поверхностных арктических вод, контактирующих с морским ледовым покровом, связанное, очевидно, с изменением интенсивности и характера как гидрологических, так и биологических процессов.

Средние значения зимних концентраций хлорофилла *a* изменились незначительно: 0.067 мкг/л

Таблица 3. Число видов ледовой фауны, выявленных в толще многолетнего льда в антициклональном круговороте Бофорта (СП-22, 1979–1980 и SHEBA, 1997–1998)

Таксон	СП-22	SHEBA
Protozoa	3	Ho
Foraminifera	1	1
Acarina	1	Ho
Nematoda	2	Ho
Turbellaria	1	Ho
Harpacticoida	1	Ho
Amphipoda	1	Ho

Примечание. Ho – не обнаружены.



Температура и соленость в столбе воды 0–100 м в антициклональном круговороте Бофорта в период дрейфа ледовых станций СП-22 (21 октября 1975 г.), AIDJEX (1 октября 1975 г.) и SHEBA (23 октября 1987 г.) (Мельников, 1989; McPhee et al., 1998).

(SHEBA) и 0.061 мкг/л (СП-22), в то время как летняя концентрация возросла с 0.22 мкг/л (СП-22) до 0.34 мкг/л (SHEBA), т.е. на 55%. Рост концентрации хлорофилла *a* на станции SHEBA составил 0.273 мкг/л за летний период 1998 г., а на СП-22 (лето 1977 г.) его концентрация увеличилась на 0.159 мкг/л. Следовательно, за двадцатилетний период различие между продукциями хлорофилла *a* на станциях SHEBA и СП-22 составило 0.114 мкг/л. Рост продукции хлорофилла *a* в подстилающей лед воде (приблизительно на 30%) обусловлен, вероятно, интенсификацией процесса фотосинтеза подо льдом. Причиной увеличения среднесезонных концентраций хлорофилла *a* в воде подо льдом может быть заметное уменьшение средней толщины ледового покрова, что, несомненно, могло сказаться на увеличении проникновения под лед солнечной радиации, активизирующей фотосинтез подледного фитопланктона.

Таблица 4. Среднесезонные величины концентраций минерального кремния (Si), фосфора (P) и концентрация хлорофилла *a* в слоях 0–30 и 30–100 м в Канадском секторе Арктики по сборам на дрейфующих станциях СП-22 (1975–1976) и SHEBA (1997–1998)

Станция	Слой, м	Si, мкг-ат/л		P, мкг-ат/л	
		зима	лето	зима	лето
SHEBA	0–30	4.75	8.0	0.72	0.94
	30–100	15.6	23.8	1.27	1.56
СП-22	0–30	11.4	13.2	1.13	0.76
	30–100	19.0	20.0	1.56	1.16
Станция	Слой, м	Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л			
		зима	лето	продукция	
SHEBA	0	0.067	0.34	0.273	
СП-22	0	0.061	0.22	0.159	

Фитоценоз

В Северном Ледовитом океане, поверхность которого занята мощным ледовым покровом, одноклеточные водоросли развиваются как в водной толще (фитопланктон), так и среди кристаллов на границе раздела "вода–лед" (криопелагическая флора), образуя колоссальные скопления диатомовых на нижней поверхности льда (Мельников, Бондарчук, 1987; Melnikov, 1989). Материалы, полученные на станциях SHEBA и СП-22, позволяют сравнить видовой состав фитоценозов за прошедшие два десятилетия (табл. 5).

Общий список водорослей, развивающихся в воде подо льдом, насчитывает 85 видов, среди которых 64 вида – диатомовые (Bacillariophyta), 19 видов – динофитовые (Dinophyta), по одному виду хризифитовых (Chrysophyta) и силикофлагеллат (Silicoflagellatae). Общими для фитоценозов станций СП-22 и SHEBA являются только 6 видов: среди диатомовых – *Diploneis litoralis*, *Nitzschia laevisissima*, *N. longissima* и *Thalassionema nitzschiioides*, динофитовых – *Dinophysis arctica* и силикофлагеллат – *Dictyocha speculum* var. *octonarius*, т.е. индекс сходства Жаккара между видовым составом обоих фитоценозов составляет менее 10%. Численность диатомовых водорослей снизилась с 46 видов на СП-22 до 22 видов на SHEBA, причем значительно сократилась численность пеннатных диатомовых водорослей: с 31 вида на СП-22 до 11 видов на SHEBA. На фоне снижения численности видов диатомовых в составе фитоценоза на станции SHEBA отмечено заметное увеличение численности видов динофитовых водорослей (19 видов), из которых только один вид (*Dinophysis arctica*) отмечен ранее на СП-22. Из собственных (Мельников, 1989) и литературных данных (Ширшов, 1936; Усачев, 1961; Kawamura, 1967; Беляева, 1980, и др.) известно, что диатомовые водоросли доминируют в составе фитопланктона центрального Арктического бассейна, а роль динофитовых, синезеленых и зеленых водорослей ничтожно мала, поэтому появление значительного количества видов из группы Ругтотифы в воде подо льдом может служить индикатором наблюдаемых гидрологических и гидрохимических изменений, происходящих в настоящее время в поверхностных арктических водах.

Хорошо известен факт образования больших скоплений диатомовой водоросли *Melosira arctica*, развивающейся на нижней поверхности морского льда (Уса-

чев, 1946). Во время водолазных работ на дрейфующих станциях "Северный Полюс" в 70-х гг. прошлого столетия эти скопления наблюдали в различных географических районах СЛО (Мельников, Бондарчук, 1987). Скопления *M. arctica* начинали развиваться на поверхности льда в конце весны (апрель–май), были устойчивы к подледным течениям и сохранялись в зоне контакта вода–лед до конца полярного лета. Подобные скопления обнаружены и летом 1998 г. в период дрейфа ледовой станции SHEBA в Канадском секторе СЛО, однако их развитие имело принципиально иной характер.

Дело в том, что в 70-е гг. таяние льдов, а следовательно, образование и распространение талой (пресной) воды подо льдом не имело такого мощного проявления, как в настоящее время. В 70-е гг. соленость воды в зоне контакта лед–вода была не ниже 15‰ (Мельников, 1989), скопления диатомовой водоросли *M. arctica* были толерантны к такой солености и развивались у льда в течение всего периода ледотаяния. Летом 1998 г. в районе дрейфа станции SHEBA наблюдалось сильное и продолжительное таяние (май–июль). Это привело к значительному накоплению пресной воды подо льдом, в результате чего скопления *M. arctica* оказались в воде с соленостью 1–3‰, что, вероятно, явилось причиной их полного разрушения в конце июля. Весьма любопытно, что в период накопления пресной воды подо льдом (конец июня) началось развитие пресноводного вида водорослей *Ulothrix implexa* (Ulothrichales, Chlorophyceae), образовавшего мощные скопления вдоль ватерлинии ледокола "Des Groseilliers", дрейфовавшего с ледовой станцией SHEBA. Известно, что *U. implexa* имеет широкий диапазон экологических адаптаций и развивается в эстуариях, где факторы среды характеризуются экстремальной дневной и сезонной изменчивостью (Lokhorst, 1978). Например, *U. implexa* часто встречается в приливо-отливной зоне устьев рек, где во время прилива находится в морской воде, а в отлив – в пресной. Сочетание лимнологических и океанологических условий среды в летний период 1998 г. на ледовой станции SHEBA способствовало параллельному развитию скоплений, образованных типично морской водорослью *M. arctica* и пресноводной *U. implexa*. Развитие последней продолжалось вплоть до выхода ледокола из района дрейфа в октябре 1998 г. Данных о развитии *U. implexa* под дрейфующими льдами в высоких широтах Арктического бассейна нет, однако появление таких скоплений на искусственном субстрате может служить косвенным свидетельством изменений, происходящих в составе биологических сообществ в воде подо льдом.

Зооценоз

В состав фауны, обитающей непосредственно у нижней поверхности льда (криопелагическая фауна), входят 75 видов, это 68% от общего списка всех идентифицированных животных, обитающих в водном слое 0–1000 м (Kolosova, Melnikov, 2001). Доминируют в этом биотопе Copepoda (30 видов) и Amphipoda (14 видов). Остальные группы представлены 1–2 видами. Вы-

Таблица 5. Число видов водорослей, развивающихся на границе раздела вода–лед в пробах, собранных на дрейфующих станциях СП-22 (зима 1979–1980) и SHEBA (зима 1997–1998) в Канадском секторе Арктики

Таксон	СП-22	SHEBA
Bacillariophyta	46	22
Dinophyta	1	19
Chrysophyta	Но	1
Chlorophyta	Но	1
Silicoflagellatae	1	1

Примечание. Но – не обнаружены.

явленная численность видов в обоих случаях близка, однако из 64 видов, отмеченных на СП-22, и из 52 видов, встреченных на станции SHEBA, общими являются только 26 видов, или 35% от общего списка криопелагической фауны (табл. 6). Число видов по группам составляет: Copepoda в целом – 17 видов, или 50% (причем общих Calanoida – 40%, Cyclopoida – 80% и Harpacticoida – 75%); Amphipoda – 7 видов, или 29%; остальных ракообразных – Ostracoda и высших раков Mysida, Isopoda, Euphausida, Decapoda – только по 2 вида. Хотя общих видов не было в таких таксонах, как Hydrozoa, Ctenophora, Polychaeta, Turbellaria, Nematoda, Chaetognatha и среди личинок беспозвоночных, тем не менее наибольшее различие касается самой характерной группы криопелагического биоценоза – Amphipoda: из 15 видов амфипод, найденных в толще воды 0–1000 м, у морской поверхности льда на СП-22 обнаружено 14 видов, а на SHEBA – только 5 видов.

По данным наблюдений за распределением криопелагической фауны подо льдом на дрейфующих станциях СП-22 и СП-23 следует (Melnikov, 1989), что, за исключением двух летних месяцев (июль–август), в течение всего года численность видов фауны на нижней поверхности льда остается на одном уровне. Как известно, характерной особенностью арктического зоопланктона являются сезонные вертикальные миграции, охватывающие глубины от нижней границы атлантической водной массы до поверхностной арктической (Grainger, 1965; Harding, 1966; Павштикс, 1977; Кособокова, 1981, и др.). Вероятно, поэтому изменение численности видов криопелагической фауны в летний сезон происходит вследствие подъема животных с глубины к поверхности льда и последующего их спуска осенью обратно на глубину. Вертикальные миграции животных оказывают влияние на качественный состав аллохтонной экологической группировки криопелагической фауны, т.е. на состав временных обитателей, биотопически связанных с нижней поверхностью льда. Как было показано по наблюдениям на СП-22 и СП-23 (Мельников, Куликов 1980), с этим биотопом связана автохтонная экологическая группировка, в состав которой входят амфиподы (6 видов), копеподы (2 вида), полихета и мизиды (по одному виду). Из 10 видов автохтонной фауны, выявленной на СП-22, на станции SHEBA отмечено только 6 видов, при этом численность массовых видов амфипод (*Gammarus wilkitzkii*, *Apherusa glacialis* и *Pseudalibrotus nansenii*) заметно снизилась. Одновременно возросла доля представителей аллохтонной группировки – типичных планктеров копепод, а также аппендикулярий, медуз и личинок донных беспозвоночных, ранее не встречавшихся в коллекциях криопелагической фауны со станций СП-22 и СП-23 (Melnikov, 1989).

ВЫВОДЫ

Таким образом, за прошедшие два десятилетия в пределах антициклонального круговорота СЛО произошли заметные изменения видового состава и струк-

Таблица 6. Число видов криопелагической фауны, выявленной в пробах, собранных на дрейфующих станциях СП-22 (зима 1979–1980) и SHEBA (зима 1997–1998)

Таксон	СП-22	SHEBA
Protozoa	2	3
Hydrozoa	2	3
Syphonophora	1	1
Ctenophora	1	1
Turbellaria	Но	1
Nematoda	1	Но
Nemertini	1	1
Polychaeta	2	2
Ostracoda	1	1
Copepoda	17	17
Cyclopoida	6	5
Harpacticoida	4	3
Mysida	1	1
Isopoda	2	Но
Amphipoda	14	5
Euphausida	1	1
Decapoda	2	Но
Gastropoda	2	2
Chaetognatha	2	2
Appendicularia	2	3

Примечание. Но – не обнаружены.

туры сообществ, связанных с морским льдом и подледным водным слоем. Из нескольких факторов, определяющих эти изменения, наиболее важными являются: 1) дренаж пресной талой воды сквозь ледовую толщу; 2) распреснение поверхностного подледного слоя воды; 3) формирование острого термоклина на глубине 30–35 м, ослабляющего вертикальное перемешивание вод.

На основании вышеизложенного можно заключить:

1. Потепление в Арктике в результате более интенсивного таяния привело к уменьшению ледового покрова как по площади, так и по толщине;

2. Как следствие таяния, в последние два десятилетия происходит интенсивное накопление пресной талой воды в пределах поверхностного слоя 0–30 м;

3. Гидрологические и гидрохимические характеристики воды поверхностного слоя заметно изменились: это более теплая и пресная вода с меньшим содержанием питательных веществ;

4. Наличие острого термоклина препятствует активному обмену между лежащими глубже термоклина водами, богатыми биогенными веществами, и бедными подледными водами, что заметно сказывается на качественном и количественном составе фито- и зоопланктона верхнего океана.

Есть основание предполагать, что современная взаимосвязанная экосистема "морской лед – верхний океан" вследствие этих действующих факторов перестраивается с типично морской на солоноватоводную экологическую систему. Основной причиной таких из-

менений, вероятно, можно считать глобальное потепление Арктики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Гл. ред. Атласов океанов. Центр. картограф. Произв. ВМФ СССР. 1980. 184 с.
- Беляева Т.Ф. Фитопланктон района дрейфа станции "Северный Полюс-22" // Биология центрального Арктического бассейна. М.: Наука. 1980. С. 133–142.
- Бузев А.Я. Некоторые статистические закономерности распределения толщин многолетнего льда // Тр. Аркт. и антаркт. НИИ. 1968. Т. 287. С. 76–84.
- Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: ГУСМП. 1945. 360 с.
- Кособокова К.Н. Зоопланктон Центрального Арктического бассейна: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИО АН СССР. 1981. 24 с.
- Мельников И.А. Экосистема арктического морского льда. М.: ИО АН СССР. 1989. 191 с.
- Мельников И.А., Бондарчук Л.Л. К экологии массовых скоплений колониальных диатомовых водорослей под арктическим дрейфующим льдом // Океанология. 1987. Т. 27, вып. 2. С. 317–321.
- Мельников И.А., Куликов А.С. Криопелагическая фауна Центрального Арктического бассейна // Биология Центрального Арктического бассейна. М.: Наука. 1980. С. 97–111.
- Павитикс Е.А. Сезонные изменения возрастного состава популяций веслоногих рачков Calanoida в Арктическом бассейне // Исслед. фауны морей. 1977. Т. 19, вып. 27. С. 56–73.
- Усачев П.И. Биологические показатели происхождения льдов в Карском море, море Лаптевых и в проливах архипелага Земля Франца-Иосифа // Тр. ИО АН СССР. 1946. Т. 1. С. 113–150.
- Усачев П.И. Фитопланктон у Северного Полюса (по сборам П.П. Шишова на СП-1 1937–1938 под начальством И.Д. Папанина) // Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва. 1961. Т. 11. С. 69–81.
- Шишов П.П. Планктон как индикатор ледового режима моря // Науч. работы экспедиции на ледоколе "Красин" в 1935 г. Л.: Главсевморпуть. 1936. С. 59–73.
- Carmack E.C., Macdonald R.W., Perkin R.G. et al. Evidence for warming of Atlantic water in the southern Canadian Basin of the Arctic Ocean: Results from the Larson-93 expedition // Geophys. Res. Lett. 1995. Vol. 22. P. 1061–1064.
- Cavaliere D.J., Gloersen P., Parkinson C.L. et al. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes // Science. 1997. Vol. 278. P. 1104–1106.
- Grainger H. Zooplankton from the Arctic Ocean and adjacent Canadian waters // J. Fish. Res. Board Can. 1965. Vol. 22, no. 2. P. 543–564.
- Harding G.C.H. Zooplankton distribution in the Arctic Ocean with the notes on life cycles. Master's thesis. McGill Univ. 1966. 28 p.
- Kawamura A. Observations of the phytoplankton in the Arctic Ocean in 1964 // Inform. Bull. Plankton. Jap. Comm. Number Dr. Matsues. 1967. P. 71–89.
- Koerner R.M. The mass balance of the sea ice of the Arctic Ocean // J. Glaciol. 1973. Vol. 12, no. 65. P. 137–142.
- Kolosova E.G., Melnikov I.A. Seasonal population dynamics of dominant copepod species in the Canada Basin of the Arctic Ocean // Proc. Arctic Reg. Center. 2001. Vol. 3. P. 177–186.
- Lokhorst G.M. Taxonomic studies on the marine and brackish-water species of *Ulothrix* (Ulotricales, Chlorophyceae) in Western Europe // Blumea. 1978. Vol. 24. P. 191–299.
- McPhee M., Stanton T.P., Morison J.H., Martinson D.G. Freshening of the upper ocean in the Arctic: is perennial sea ice disappearing? // Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25. P. 1729–1732.
- Melnikov I.A. Ecology of Arctic Ocean cryopelagic fauna // The Arctic seas: climatology, oceanography, geology and biology. New York: Van Nostrand Reinhold. 1989. P. 235–255.
- Melnikov I.A. The Arctic sea ice ecosystems and global warming // Impacts of changes in sea ice and other environmental parameters in the Arctic: Rep. of the Marine Mammal Commission Workshop, 15–17 February 2000. Girdwood, Alaska. 2000. P. 94–110.
- Melnikov I.A., Kolosova E.G. The Canada Basin zooplankton in recent environmental changes in the Arctic Ocean // Proc. Arctic Reg. Centre. 2001. Vol. 3. P. 165–176.
- Melnikov I.A., Kolosova E.G., Welch H.E., Zhitina L.S. Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean // Deep-Sea Res. 2002. Vol. 49, pt. 1. P. 1623–1649.
- Melnikov I.A., Sheer B., Wheeler P., Welch B. Preliminary biological and chemical oceanographic evidence for the long-term warming trend in the Arctic Ocean (current materials of the SHEBA Ice Camp, Beaufort Sea) // SEARCH Workshop, August, 1998. Univ. of Washington. 1998.
- Melnikov I.A., Zhitina L.S., Kolosova E.G. The Arctic sea ice biological communities in recent environmental changes // Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue. 2001. Vol. 54. P. 409–416.
- Morison J., Steele M., Anderson R. Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the Nuclear Submarine USS *Pargo* // Deep-Sea Res. 1998. Vol. 45, pt. 1. P. 15–38.
- Parkinson C.L., Cavaliere D.J., Gloersen P. et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996 // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 20837–20856.
- Perovich D.K., Andreas E.L., Curry J.A. et al. Year on ice gives climate insights // EOS. 1999. Vol. 80, no. 41. P. 481–486.
- Rothrock D.A., Yu Y., Maykut G.A. Thinning of the Arctic sea ice cover // Geophys. Res. Lett. 1999. Vol. 26. P. 3469–3472.
- Serreze M.C., Maslanik J.A. Polar Processes in Global Climate, 13–15 Nov. 1996, Cancun, Mexico. Boston: Amer. Met. Soc. 1997. P. 110–112.
- Wadhams P. Sea ice thickness distribution in Fram Strait // Nature. 1983. Vol. 305, no. 5903. P. 108–111.