

ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ ECOLOGY, BIOCEENOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-191-207>
УДК 593.16



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Ледовые водоросли в условиях современного состояния водно-ледовой среды Арктического бассейна

И.А. Мельников^{1}, Л.С. Житина², В.В. Иванов^{2,3}, А.Б. Тимофеева³*

¹ — *Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия*

² — *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³ — *ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

**migor39@yandex.ru*

Резюме

В современном Северном Ледовитом океане (СЛО) наблюдаются заметные изменения в составе и структуре биологических сообществ, населяющих водно-ледовую среду. За последние два десятилетия в центральных районах СЛО отмечено снижение численности видового состава ледовой флоры и фауны на фоне изменяющейся физической среды их обитания. В условиях современной климатической нестабильности в СЛО важно отслеживать и оценивать их состав, структуру и динамику развития. Важно также сохранять методы обработки собранных материалов для сравнения состояния водно-ледовой биоты в сходных пространственно-временных масштабах бассейна. В настоящем исследовании в качестве индикаторов изменений выбраны центрические и пеннатные диатомовые водоросли, доминирующие в ледовых флористических сообществах. Целью настоящей работы является анализ физического состояния водно-ледовой среды и видового состава ледовых диатомовых водорослей по материалам экспедиций в рамках программы NAVOS на НЭС «Академик Трёшников» в Арктическом бассейне в 2018 и 2021 гг. В задачу полевых работ входили наблюдения за состоянием ледяного покрова в районе проведения экспедиций, отбор ледяных кернов на предмет оценки солевого состава и видового состава водорослей, а также STD-зондирование подледного водного слоя. Анализ собранных материалов показал значительные различия в видовом составе и обилии водорослей между сезонами, что свидетельствует о формировании независимых друг от друга флористических сообществ в современных условиях нестабильной физической среды в центральных районах СЛО, что подтверждает ранее полученные результаты в период 2007–2015 гг. Обсуждаемые материалы получены в короткий период времени и на ограниченных пространствах в зонах продуцирования однолетних льдов на акваториях шельфовых морей и зонах выноса в центральные районы СЛО. Вместе с тем краткосрочные наблюдения дают «мгновенную» информацию о качественном и количественном состоянии ледовых биологических сообществ. Для получения достоверной оценки необходимы длительные наблюдения, которые, возможно, будут организованы в ближайшее время на новых логистических подходах в изучении морской Арктики.

Ключевые слова: Арктический бассейн, водно-ледовая среда, ледовые водоросли, состав, обилие, сходство, разнообразие.

Для цитирования: Мельников И.А., Житина Л.С., Иванов В.В., Тимофеева А.Б. Ледовые водоросли в условиях современного состояния водно-ледовой среды Арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 191–207. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-191-207>.

Поступила 22.04.2022

После переработки 20.05.2022

Принята 06.06.2022

Ice algae in current water-ice environmental condition of the Arctic Ocean

Igor A. Melnikov^{1*}, Ludmila S. Zhitina², Vladimir V. Ivanov^{2,3},
Anna B. Timofeeva³

¹ — Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*migor39@yandex.ru

Summary

In the Arctic Ocean (AO) of today, there are noticeable changes in the composition and structure of biological communities inhabiting the water-ice environment. Over the past two decades, a decrease in the number of species of the sea ice flora and fauna has been noted in the central regions of the AO due to the changing physical environment of their habitat. In view of the current climatic instability in the AO, it is important to monitor and evaluate their composition, structure and dynamics of development. It is also important to preserve the methods of processing the materials collected in order to compare the state of the water-ice biota on similar spatial and temporal scales of the basin. In the present study, centric and pennate diatoms dominating in ice floristic communities were selected as indicators of changes. The aim of the work is to analyze the physical state of the water-ice environment and the species composition of ice diatoms based on the materials of the expeditions within the NABOS program at the Research Vessel (R/V) “Akademik Treshnikov” in the Arctic Basin in 2018 and 2021. The field work included observations of the state of the sea-ice cover in the area of the expeditions, the selection of ice cores to assess the salt composition and species composition of the algae, as well as CTD-sounding of the under ice — water layer. The analysis of the materials collected showed significant differences in the species composition and abundance of algae between the seasons, which indicates the formation of independent floristic communities in the current conditions of unstable physical environment in the central regions of the AO, which confirms the previously obtained results in the period 2007–2015. The materials under discussion were obtained in a short period of time and in limited spaces in the zones of production of annual ice in the waters of the shelf seas and zones of removal to the central regions of the AO. At the same time, short-term observations provide “instant” information about the qualitative and quantitative state of sea-ice biological communities. In order to obtain reliable estimates, long-term observations are needed, which may be organized in the near future based on new logistical approaches to the study of the marine Arctic.

Keywords: Central Arctic Ocean, environmental conditions, ice algae, species composition, abundance, similarity, diversity.

For Citation: Melnikov I.A., Zhitina L.S., Ivanov V.V., Timofeeva A.B. Ice algae in current water-ice environmental condition of the Arctic Ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 191–207. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-191-207>.

Received 22.04.2022

Revised 20.05.2022

Accepted 06.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

В современном Северном Ледовитом океане (СЛО) наблюдаются сокращение площади ледяного покрова [1, 2, 3], изменения в возрастном составе, связанные со

сменой доминирования многолетних льдов доминированием однолетних льдов [4, 5, 6], значительное уменьшение толщины льда [7, 8, 9, 10, 11]. Как следствие изменений в морском ледяном покрове, в СЛЮ отмечено изменение в составе и структуре биологических сообществ, населяющих водно-ледовую среду. Среди важных биологических индикаторов изменений рассматриваются ледовые диатомовые водоросли, доминирующие по численности и биомассе в составе флористических сообществ ледяного покрова центральных районов СЛЮ. Современные знания о таксономическом составе ледовых водорослей в Арктическом бассейне (АБ) в период доминирования многолетних льдов основаны, главным образом, на материалах, полученных в период работ на дрейфующих станциях «Северный полюс-22, 23, 24» в 1975–1982 гг. [12]. Сравнительный анализ данных видового состава ледовых диатомовых водорослей за период 1980–2010 гг. показал, что многолетний лед содержал на 39 % больше видов диатомовых водорослей, чем однолетние льды [13, 14, 15]. Анализ также показал, что до 75 % видов диатомовых водорослей включаются в лед в момент формирования ледовой матрицы, а остальные 25 % включаются в лед из воды во время его дрейфа в Трансарктической зоне выноса из районов формирования в направлении к проливу Фрама. Многолетний мониторинг видового состава ледовой биоты в центральных районах СЛЮ, начиная с МПГ в 2007 г. по настоящее время, показал, что в условиях обновляемой физической среды ежегодно формируются независимые друг от друга биологические сообщества [13, 14, 16, 17, 18]. В условиях современной климатической нестабильности в СЛЮ важно отслеживать и оценивать их состав и динамику развития, а ледовые диатомовые водоросли являются важным индикатором наблюдаемых изменений. Целью настоящей работы является анализ состояния водно-ледовой среды и видового состава ледовых водорослей по материалам экспедиций в рамках программы NABOS на НЭС «Академик Трёшников» в Арктическом бассейне в 2018 и 2021 гг. При обсуждении полученных результатов привлекаются также материалы предыдущих исследований авторов в центральных районах СЛЮ в период 2007–2011, 2015 и 2018 гг. [15, 20, 21, 22].

Анализ результатов проводится здесь без обсуждения причин изменений под влиянием природного или антропогенного факторов. Морские ледовые термины даются в соответствии с номенклатурой ВМО “Sea ice Nomenclature” [23], а термины и номенклатура по ледовой биоте в соответствии с рекомендацией рабочей группы SCOR “Sea Ice Ecology” [24].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований охватывал акваторию в широтном направлении между 78° и 81° с. ш., а меридиональном, соответственно, между 137° в. д. и 173° з. д. (рис. 1) Полевые работы в 2018 г. выполнены на трех полигонах 11, 14 и 15 сентября, а в 2021 г. — 01, 02 и 10 октября. Организация и проведение полевых работ в обеих экспедициях сохранялись, что дает основу для сравнения состояний водно-ледовой биоты в сходных пространственно-временных масштабах бассейна. В дальнейшем изложении для краткости районы работ в экспедициях НЭС «Академик Трёшников» в 2018 и 2021 гг. будут обозначаться как районы А-18 и В-21, а точки проведения полевых работ на полигонах, соответственно, А1, А2, А3 и В1, В2, В3.

Полевые работы выполнялись в момент стоянки у края ледяного поля, к которому швартовалось судно для постановки буев в рамках программы NABOS. Работы включали сбор ледяных кернов и СТД-зондирование 0–50 м водного слоя. В отборе ледяных кернов, последующей первичной и лабораторной обработке использованы методы, принятые в гидро- и криобиологической практике [25, 26, 27]. Керн отбирали с помощью кольцевого бура, делили на кратные слои, каждый ледовый сегмент помещали в отдельные пластиковые емкости и растапливали при комнатной температуре.

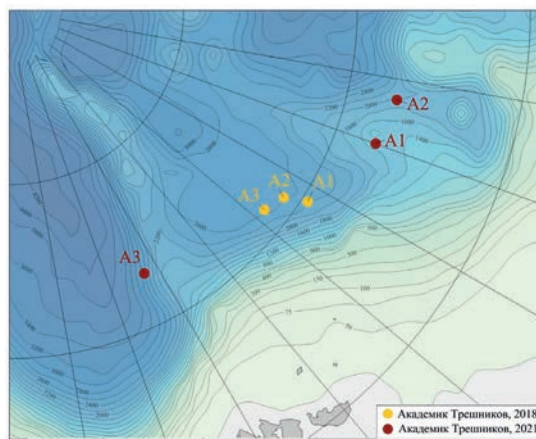


Рис. 1. Положение районов А-18 (желтые точки) и В-21 (красные точки)
 Fig. 1. Location of areas A-18 (yellow dots) and B-21 (red dots).

Таблица 1

Даты, географические координаты и толщина ледяных кернов, отобранных в районах А-18 и В-21

Table 1

Dates, geographical coordinates and ice cores thickness obtained in areas A-18 and B-21

A-18				
Керн №	Дата	Широта	Долгота	Толщина, см
A1	11.09.2018	79° 49' с. ш.	167° 21' в. д.	142
A2	14.09.2018	80° 28' с. ш.	165° 45' в. д.	183
A3	15.09.2018	80° 42' с. ш.	162° 01' в. д.	250
B-21				
Керн №	Дата	Широта	Долгота	Толщина, см
B1	01.10.2021	78° 48' с. ш.	180° 03' з. д.	43
B2	02.10.2021	78° 34' с. ш.	173° 00' з. д.	59
B3	10.10.2021	81° 31' с. ш.	137° 10' в. д.	77

Таблица 2

Даты и географические координаты станций СТД в районах А-18 и В-21

Table 2

Dates and geographical coordinates of CTD stations in areas A-18 and B-21

A-18			
Станция	Дата	Широта	Долгота
A1	10.09.2018	79° 24' с. ш.	168° 84' з. д.
A2	13.09.2018	80° 50' с. ш.	167° 15' в. д.
A3	15.09.2018	80° 39' с. ш.	161° 57' в. д.
B-21			
Станция	Дата	Широта	Долгота
B1	01.10.2021	78° 80' с. ш.	180° 11' з. д.
B2	27.09.2021	78° 59' с. ш.	173° 48' з. д.
B3	09.10.2021	81° 49' с. ш.	137° 42' в. д.

Часть талой воды использовали для измерения солености, а остальной объем — для выделения взвеси на видовой состав ледовых водорослей [28]. Фиксированные пробы хранились на борту судна до времени таксономического анализа в стационарных условиях лабораторий МГУ. Сходство видового состава флористических сообществ оценивали по индексу Серенсена–Чекановского [29]. Вертикальное CTD-зондирования в слое 0–50 м выполняли судовым комплексом SBE в момент стоянки у края ледяного поля с борта судна. Пространственно-временные характеристики точек отбора ледяных кернов и станций CTD представлены в таблицах 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ледяной покров. В современном СЛО изменчивость площади ледяного покрова по-прежнему остается высокой: минимум площади льда в СЛО в сентябре 2018 г. составил 4,57 млн км², а в сентябре 2021 г. — 4,81 млн км² [30, 31, 32]. В рамках программы экспедиции NABOS в 2018 и 2021 гг. по методике, разработанной в ААНИИ [33], выполнялись специализированные ледовые наблюдения за распределением характеристик ледяного покрова, в том числе за толщиной льда по выворотам вдоль борта судна. В дополнение к визуальным наблюдениям для получения достоверного массива данных производились измерения толщины льда с помощью цифрового телевизионного комплекса [34].

Ледовые условия во время экспедиции в 2018 г. были легкими, большая часть пути НЭС «Академик Трёшников» проходила по чистой воде. Только самый восточный отрезок маршрута в Восточно-Сибирском море проходил в зоне сплоченного льда, где и были отобраны три керна на ледовых станциях. В районе проведения ледовых станций А-18 ледовая обстановка характеризовалась сплоченностью более 8 баллов с преобладанием однолетнего льда в форме больших, изредка гигантских ледяных полей (500 м — 2 км и >10 км соответственно). Толщина остаточного однолетнего льда в среднем составляла 70–100 см, изредка 150 см, при большой разрушенности 30–50 см. Для выполнения ледовых станций удалось подобрать обломки ледяных полей, где были отобраны керны А1, А2 и А3 толщиной 70–100 см.

Ледовые условия экспедиции в 2021 г. были сложнее [34], а ледяные керны были отобраны в двух разных районах. Керны В1 и В2 были взяты на обломках полей остаточного льда значительно восточнее, чем в 2018 г. Работы на этом участке маршрута проходили в условиях сплоченного льда, преимущественно 10 баллов с преобладанием молодого и начального, на остаточный лед приходилось в среднем 4 балла, толщиной преимущественно 50–70 см. Толщина поля В1 варьировала от 30–50 до 80 см, в торосах до 1,5 м. Толщина поля В2 изменялась от 40–50 до 120 см, преимущественно 60–70 см, в торосах свыше 1,5 м. Третья ледовая станция с отбором ледяного керна В3 была проведена значительно западнее, в секторе Арктического бассейна к северу от моря Лаптевых во льдах сплоченностью 10 баллов, где остаточного льда наблюдалось до 5–6 баллов. Толщина льда полигона В3 варьировала от 50 до 100 см, в торосах до 2 м и более.

Все отобранные керны в районах А-18 и В-21 представляли собой остаточные после летнего таяния льды, что подтверждается данными по солености, которые характерны для этой возрастной группы льдов: минимальные значения солености в верхних и максимальные значения в нижних слоях (рис. 2).

Подледный водный слой. В 0–50 м слое выявлена двухслойная структура: верхний квазиоднородный слой (15–25 м) практически однороден по солености от 28,5 ‰ в восточных районах до 31 ‰ в западном районе (рис. 3). Начиная с нижней границы однородного слоя, до 50 м наблюдается слой скачка солености: повышение солености при практической неизменности температуры. Значительно отличается от других точка

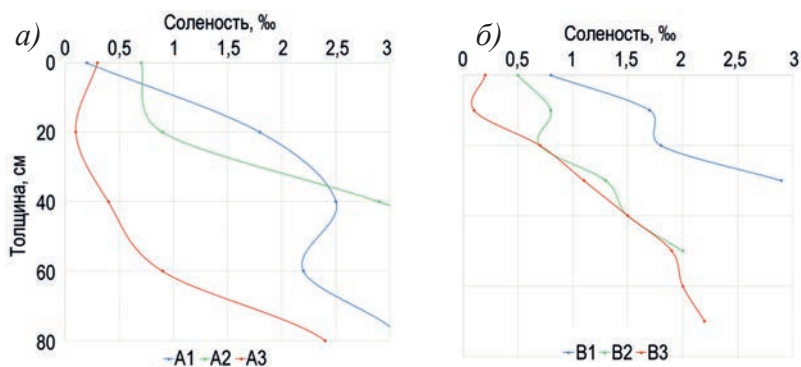


Рис. 2. Распределение солености в толще ледяных кернов в районах А-18 (а) и В-21 (б)

Fig. 2. Salinity distribution of the ice cores in areas A-18 (a) and B-21 (б)

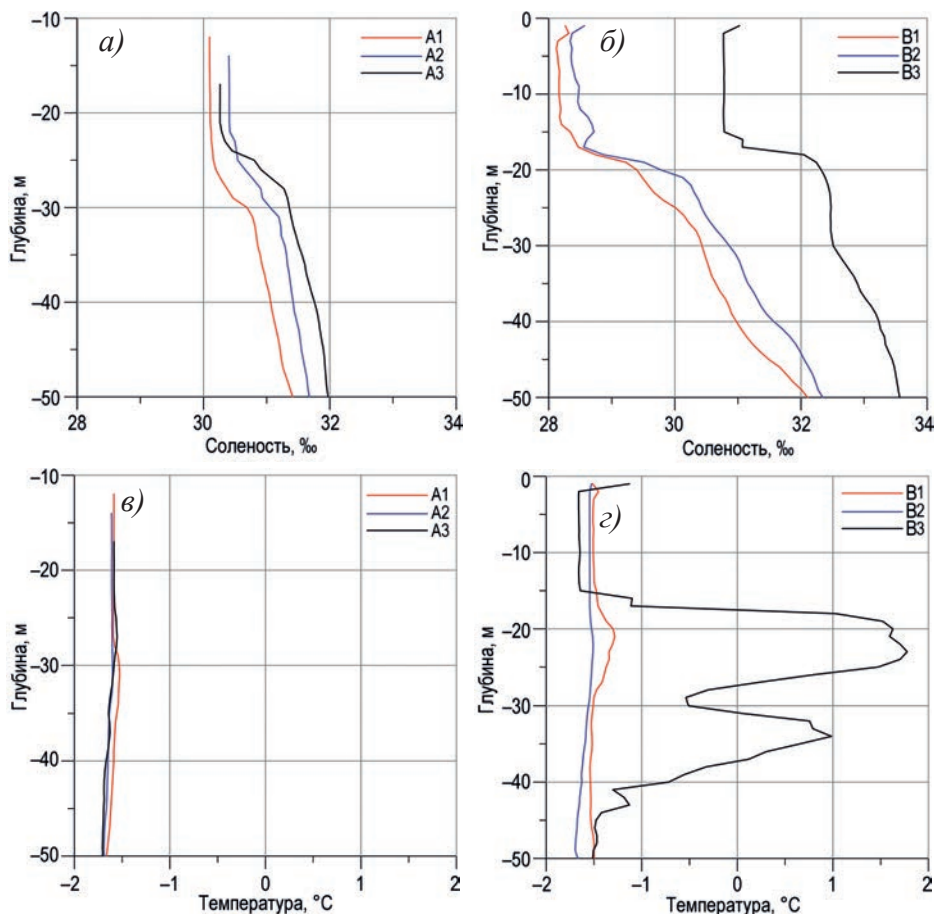


Рис. 3. Распределение солености (а, б) и температуры (в, г) в подледном 0–50 м водном слое в районах А-18 и В-21

Fig. 3. Salinity (a, б) and temperature (в, г) distribution of under the sea ice water layer 0–50 m in areas A-18 and B-21

ВЗ в районе В-21, где летом длительное время наблюдался сильно разреженный лед, а рядом с кромкой — обширные пространства открытой воды. По этой причине в этом районе летом сформировался очень теплый прогретый слой (до глубины 40 м, со средней температурой около 1,5 °С), который в момент выполнения станции активно разрушался вследствие вертикальной конвекции. В остальных районах в летний сезон постоянно присутствовал лед и летний прогрев был незначительным [35].

Таблица 3

Таксономический состав и численность клеток ледовых водорослей (x10³ кл/л) в каждом ледяном керне в районах А-18 и В-21

Table 3

Taxonomic composition and number of ice algae cells (x10³ cells/l) in each ice core in areas А-18 and В-21

Таксон	А-18			В-21		
	А1	А2	А3	В1	В2	В3
Bacillariophyta						
<i>Mediophyceae</i> (центрические)						
<i>Bacterosira bathyomphala</i> (Cleve) Syvertsen et Hasle			0,7			
<i>Chaetoceros constrictus</i> Gran				1,1		
<i>Chaetoceros socialis</i> Lauder			0,1	0,3		
<i>Coscinodiscophyceae</i> (центрические)						
<i>Melosira arctica</i> Dickie		0,1		0,1		
<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightw.		0,1		0,1		0,2
<i>Bacillariophyceae</i> (пеннатные)						
<i>Amphora laevis</i> W. Greg.						0,1
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenb.) Reimann et J.W. Lewin	0,3	0,9	11	6	0,5	6
<i>Diploneis littoralis</i> (Donkin) Cleve				0,6	0,1	11
<i>Entomoneis kjellmanii</i> (Cleve) Poulin et Cardinal	0,1	0,2	0,2	0,1		0,1
<i>Fossula arctica</i> Hasle et al.			4			
<i>Fragilariopsis cylindrum</i> (Grunow) Helmcke et Wilh. Krieg.	3	0,6	29		17	146
<i>Fragilariopsis oceanica</i> (Cleve) Hasle	1	0,4	29			
<i>Hantzschia weiprechtii</i> Grunow	0,1					
<i>Navicula directa</i> (W. Sm.) Bréb.	0,2	0,1	3	0,1	2	0,5
<i>Navicula pelagica</i> Cleve			4			5
<i>Navicula transitans</i> Cleve	0,1		6		0,1	0,1
<i>Navicula vanhoeffenii</i> Gran			2	2	0,4	4
<i>Navicula</i> sp. 1			0,1		0,1	0,1
<i>Nitzschia arctica</i> Cleve					27	0,1
<i>Nitzschia frigida</i> Grunow	79	89	78	47	49	242
<i>Nitzschia pellucida</i> Grunow	1	2	2			0,3
<i>Nitzschia</i> sp.	0,1	1	0,2	0,2	5	62
<i>Pennatae</i> sp.					0,1	5
<i>Pleurosigma clevei</i> Grunow						0,1
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden			1	31	0,6	
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i> (Cleve) H. Perag.				0,3		
<i>Synedropsis hyperborea</i> (Grunow) Hasle et al.	2	4	2	3	0,5	17
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschk.	0,1					
<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenb.) Cleve						0,1
Dinophyta (= Miozoa)						
<i>Amylax triacantha</i> (Jørg.) Sournia	1	0,3	1		0,1	
<i>Gymnodinium wulffii</i> J. Schiller						0,2
<i>Prorocentrum balticum</i> (Lohman) A.R. Loebel.		0,1				
<i>Protoperidinium bipes</i> (Paulsen) Balech	0,1					
<i>Protoperidinium brevipes</i> (Paulsen) Balech						0,2
Cystes	5	3	8	3	20	79
Ochrophyta						
<i>Groenlandiella brevispina</i> Kol	4	6	11	1	1	1
Обилие общее	97	108	191	95	125	581

Ледовая флора. Идентификация видовой принадлежности водорослей в отобранных ядрах проводилась послойно в верхнем, среднем и нижнем слоях. В данном исследовании не ставится цель обсуждения особенностей вертикального распределения водорослей в ледяной толще. Оценка видового состава и численности клеток ледовых водорослей проводилась в целом для каждого ледяного ядра на полигонах А1, А2, А3 в районе А-18 и на полигонах В1, В2, В3 в районе В-21. Данные определений представлены в табл. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые работы в период экспедиций НЭС «Академик Трёшников» в 2018, 2021 гг. пришлось на время минимального развития ледяного покрова Арктического бассейна и проводились в акваториях, граничащих с сибирскими шельфовыми морями, которые П.А. Гордиенко называл морями-производителями льдов, поскольку на акватории этих морей происходит основное ледообразование, а затем вынос льдов в Трансарктический дрейф [36]. Вследствие направленности генерального дрейфа, формирующиеся здесь ледовые флористические сообщества попадают в центральные районы, где включаются в биологическую структуру экосистемы пелагиали СЛО. В соответствии с биогеографическими представлениями о структуре ареалов океанических сообществ [37], в настоящем исследовании районы А-18 и В-21 рассматриваются как основа ареалов, где формируются ледовые флористические сообщества, а Трансарктический дрейф — как нестерильная область их выселения.

Общий список идентифицированных ледовых водорослей в районах А-18 и В-21 насчитывает 36 видов, среди которых доминируют диатомовые водоросли — 29 видов, динофитовые — 6 видов и 1 вид желтозеленых (табл. 3). Среди диатомовых доминировали pennate виды, центрические встречались редко и малочисленно. Появление во льду 11 редких видов, вероятно, связано с включением планктонных водорослей в ледовую матрицу при дрейфе льда через акватории шельфовых сибирских морей, где заметно влияние речных стоков, несущих пресноводную и солоноватоводную флору [38, 39, 40, 41]. Выявленные единичные виды составляют аллохтонную группу флористического сообщества. Основу автохтонной группы

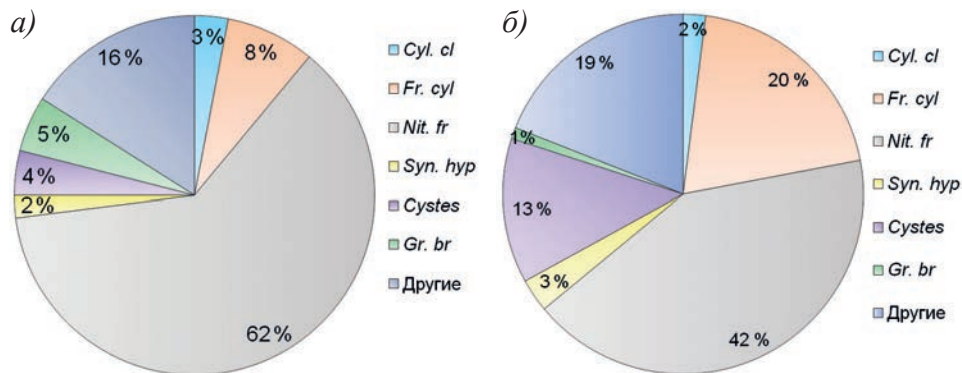


Рис. 4. Доля доминирующих видов (%) в общей численности водорослей в районах А-18 (а) и В-21 (б). Обозначения: *Cylindrotheca closterium* (Cyl. cl), *Fragilariopsis cylindrus* (Fr. cyl), *Nitzschia frigida* (Nit. fr), *Synedropsis hyperborean* (Syn. hyp), Cystes, *Groenlandiella brevispina* (Gr. br)

Fig. 4. The percentage of dominant species (%) in the total number of algae in areas A-18 (a) and B-21 (b). Designations: *Cylindrotheca closterium* (Cyl. cl), *Fragilariopsis cylindrus* (Fr. cyl), *Nitzschia frigida* (Nit. fr), *Synedropsis hyperborean* (Syn. hyp), Cystes, *Groenlandiella brevispina* (Gr. br)

составляют постоянно встречающиеся виды водорослей, как в настоящем исследовании, так и встречавшиеся ранее в ледяном покрове Центрального Арктического бассейна: *Cylindrotheca closterium*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Navicula directa*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia* sp., *Synedropsis hyperborea*, цисты динофитовых и желтозеленая *Groenlandiella brevispina* [13, 15, 19, 20, 42, 43]. В автохтонной группе ледовых водорослей на долю пеннатных диатомей приходится 75 % от общей численности водорослей в районах А-18 и В-21, среди которых на долю двух видов *Nitzschia frigida* и *Fragilariopsis cylindrus* приходится, соответственно, 70 % и 62 % (рис. 4).

При расчете индексов сходства между флористическими сообществами не учитывались 11 видов, единожды встреченных в районах исследования. Учитывались только виды, встреченные 2–3 раза одновременно в каждой из совокупностей водорослей в районах А-18 и В-21 (табл. 4).

Таблица 4

**Индекс видового сходства Соренсена–Чекановского (Ks)
между сообществами ледовых водорослей в районах А-18 и В-21**

Table 4

Sorensen–Chekanovsky Species Similarity Index (Ks) between ice algae communities in areas A-18 and B-21						
Сходство внутри районов А-18 и В-21						
Ледяные керны в районах	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Суммарное число видов	16	15	20	16	16	23
Число общих видов	13			17		
Ks	0,68			0,81		
Сходство между районами А-18 и В-21						
Суммарное число видов	26			29		
Число общих видов	10					
Ks	0,36					

В районе А-18 выявлено 13 общих видов: диатомовые *Cylindrotheca closterium*, *Entomoneis kjellmanii*, *Fragilariopsis cylindrus*, *F. oceanica*, *Navicula directa*, *Navicula transitans*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia pellucida*, *Nitzschia* sp., *Synedropsis hyperborea*, динофитовые *Amylax triacantha*, *Cystes* и желтозеленая *Groenlandiella brevispina*. Индекс видового сходства между сообществами на полигонах А1, А2 и А3 составил 0,68. В районе В-21 выявлено 17 общих видов: диатомовые *Rhizosolenia setigera*, *Cylindrotheca closterium*, *Diploneis litoralis*, *Entomoneis kjellmanii*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Navicula directa*, *Navicula transitans*, *Navicula vanhoeffenii*, *Navicula* sp., *Nitzschia arctica*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia* sp., *Pennatae* sp., *Pseudonitzschia delicatissima*, *Synedropsis hyperborea*, цисты динофитовых и желтозеленая *Groenlandiella brevispina*. Индекс видового сходства между водорослями на полигонах В1, В2 и В3 составляет 0,81.

Между районами А-18 и В-21 индекс видового сходства флористических ледовых сообществ районов составляет 0,36. Из идентифицированных водорослей, соответственно, 26 и 29 видов общими были 10 видов: диатомовые *Cylindrotheca closterium*, *Entomoneis kjellmanii*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Navicula directa*, *Navicula transitans*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia* sp., *Synedropsis hyperborea*, цисты динофитовых и желтозеленая *Groenlandiella brevispina*.

Встает закономерный вопрос: в чем причина или какие факторы среды определяют высокое сходство между флористическими сообществами внутри районов А-18 и В-21 (0,69 и 0,81) и низкое видовое сходство сообществ между районами (0,36).

В 2018 г. полевые работы пришлось на середину сентября, на период завершения сезона таяния, на момент минимума распространения ледяного покрова. В районе еще наблюдалась разрушенность и не наблюдалось интенсивное ледообразование, начальные виды льда встречались редко и только среди достаточно сплоченных однолетних льдов, переживших период таяния. В 2021 г. основные экспедиционные работы пришлось на конец сентября — начало октября, ледообразование уже началось и было достаточно интенсивным, 74 % всего наблюдавшегося в экспедиции льда было вновь образованным, т. е. преобладали молодые и начальные льды [34]. За исключением западной точки В3, точки отбора проб на полигонах в каждом районе располагались компактно. Гидрологические характеристики подледного 0–50 м водного слоя сохранялись в точках А1, А2, А3 и В1, В2, кроме точки В3 в сезон 2021 г., где летом сформировался очень теплый прогретый слой до глубины 40 м (см. рис. 4). Сходные условия состояния водно-ледовой среды внутри районов, вероятно, явилось ключевым фактором, определяющим высокое видовое сходство между флористическими сообществами внутри районов.

Возможной причиной низкого сходства флористических сообществ между районами является климатический фактор, вследствие трехлетней разницы между выполненными исследованиями. Аномалия температуры воздуха (отклонение от среднего за 1961–1990) в летний период 2018 г. составила 0,9 °С. При этом одна из наибольших аномалий наблюдалась в районе исследования экспедиций NAVOS, в Восточносибирском районе северной полярной области, и составила 2,4 °С [31]. В 2021 г. аномалия температуры воздуха летнего периода в широтной зоне 70–85° с. ш. составила 1,2 °С, что несколько больше, чем в 2018 г. В летнем сезоне основная область крупных положительных аномалий температуры находилась в евразийском секторе, а в Восточносибирском районе составила 2,9 °С [32]. Сезон 2021 г. был теплее сезона 2018 г., что, вероятно, отразилось на интенсивности таяния и толщине льда. В среднем толщина отобранного для исследования льда составила 192 см в А-18 и 60 см в В-21, что, соответственно, отразилось на формировании видового разнообразия и обилии водорослей.

Рассмотренные выше данные о физическом состоянии водно-ледовой среды и составе ледовых водорослей касаются районов продуцирования однолетних льдов. В соответствии с биогеографическими представлениями о структуре ареалов океанических сообществ [37], районы А-18 и В-21 можно рассматривать как основу ареалов, где формируются ледовые флористические сообщества, которые затем попадают в Трансарктическую зону и переносятся в центральные районы СЛЮ Трансарктическим течением в направлении к проливу Фрама. Имеющиеся данные мониторинга видового состава ледовых водорослей, полученные в околополюсном районе СЛЮ в апреле 2007–2011, 2015, 2018 гг. [13, 15, 19, 20], позволяют сделать сравнение состояния сообществ в зонах формирования и выноса морского льда. Все полевые и методические подходы сбора и обработки собранных материалов сохранялись. В качестве индикаторов выбраны центрические и пеннатные диатомовые водоросли, доминирующие в составе ледовых флористических сообществ. Данные численности и видового сходства водорослей двух ключевых диатомовых групп Centricae и Pennatae представлены в табл. 5.

Видовой состав водорослей в околополюсном районе — это реплика процессов формирования ледовых флористических сообществ в центральных районах Арктического бассейна. Здесь выявлено заметное различие численности видов в обеих группах за весь период наблюдений, причем оно проявляется как среди центрических от 12 видов до полного их отсутствия, так и среди пеннатных диатомовых от 5 до 27 видов (см. табл. 5). Отмечено также низкое видовое сходство между последова-

Общее количество видов и индексы видового сходства K_s в группах Centricae и Pennatae между последовательными годовыми парами в период исследований в околуполосном районе СЛО в 2007–2011, 2015, 2018 гг.

Table 5

The species total number and species similarity indices K_s in the Centricae and Pennatae groups between consecutive annual pairs during the period of studies in the near-polar region of the AO in 2007–2011, 2015, 2018

Группа	2007	2008	2009	2010	2011	2015	2018
Centricae	12	6	8	7	4	3	NF
Pennatae	24	5	16	10	14	27	5
K_s между годовыми парами наблюдений	0,13	0,17	0,19	0,17	0,13	0,06	

Примечание. NF — не обнаружено.

Note. NF — not found.

тельными годовыми парами в диапазоне 0,06–0,19. Чередование теплых и холодных сезонов в современном СЛО предполагает влияние климатического фактора на формирование видового состава водорослей. Так, выявленное низкое видовое сходство между сообществами в районах А-18 и В-21 (см. табл. 4), формировавшимися в холодный и теплый периоды, может быть косвенным подтверждением влияния этого важного фактора. Кроме того, формирование видового сообщества зависит от того, как происходит образование льда — на открытой воде или на остаточном льду после летнего таяния. В первом случае видовой состав ледового сообщества зависит от разнообразия планктонных водорослей в момент формирования ледовой матрицы, а во втором — от водорослей, сохранившихся во льду после летнего таяния, и водорослей, включающихся в лед из подледного водного слоя по мере его продвижения в зоне Трансарктического дрейфа.

Два керна, отобранные в околуполосном пространстве 5 апреля 2009 г. в пределах одного ледяного массива, составленного из ледяных полей разного генезиса, есть реплика процессов формирования видового состава в октябре предыдущего 2008 г. в Центральном Арктическом бассейне [15].

Первый керн толщиной 198 см имеет текстурные и соленостные признаки, характерные для льда при образовании из морской воды, например, в трещинах и разводьях. Ледообразование проходит в период полярной ночи, когда фотосинтез отсутствует, что отражается на низком качественном и количественном разнообразии планктонных водорослей и, как следствие, на численности и составе ледовых водорослей. Было идентифицировано 5 видов центрических *Chaetoceros compressus*, *C. decipiens*, *C. diadema*, *Rhizosolenia hebetata* f. *semispina*, *Thalassiosira* sp. и 2 вида пеннатных диатомовых водорослей *Cylindrotheca closterium* и *Fragilariopsis oceanica*. В целом для всего керна льда были выявлены виды с высокой численностью клеток в группе Centricae в диапазоне 4,6–5,9 тыс. кл/л и низкой численностью 0,1–0,7 тыс. кл/л в группе Pennatae.

Второй керн представляет собой комбинацию, составленную из остаточного после летнего таяния верхнего слоя льда толщиной 40 см и ниже выросшего за зиму



Рис. 5. Ледяные керны, отобранные в околополюсном районе в пределах одного ледяного массива (05.04 2009, 89° 43,5' с. ш., 41° 06' в. д.). На снимке справа отмечен бурый слой, разделяющий старый и новообразовавшийся слои (объяснения в тексте)

Fig. 5. Ice cores obtained in the near-polar region within the same sea ice massive (05.04 2009, 89°43.5' N, 41°06' E). The right image shows a brown layer separating the old and newly formed layers (explanations in the text)

нового слоя, разделенных бурым слоем толщиной 5–6 см. Появление бурого слоя в толще льда является следствием развития диатомовых водорослей на нижней (морской) поверхности остаточного льда в осенний период. С наступлением похолодания в октябре и дальнейшим зимним нарастанием нового льда на нижней поверхности старого этот бурый (диатомовый) слой оказывается внедренным в структуру ледяного керна, достигшего к апрелю толщины 203 см. Общий список включает 8 центрических и 17 пеннатных диатомовых водорослей. По обилию клеток доминируют пеннатные диатомеи *Fossula arctica*, *Navicula transitans*, *Nitzschia frigida*, *Pseudo-nitzschia* cf. *granii* с численностью 710–18121 тыс. кл/л, а среди центрических *Detonula confervaceae* и *Thalassiosira antarctica* var. *borealis* с численностью 72–316 тыс. кл/л.

Отмечено значительное различие в численности видов между ледяными кернами: 7 видов с доминированием центрических водорослей в первом и 25 видов с доминированием пеннат во втором, причем между сообществами в пределах одного ледяного массива не отмечено ни одного общего вида. Показателен результат наблюдений, выполненных в апреле 2018 г. в околополюсном районе [21] и в настоящем исследовании в сентябре 2018 г. в период работ программы NABOS [22]. В первом случае суммарное число видов составило 5, а во втором — 26 видов, причем общим для обоих наблюдений был только один вид — *Nitzschia frigida*. Выявленные различия свидетельствуют о формировании независимых друг от друга флористических сообществ в современных условиях изменяющейся физической среды в Арктическом бассейне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях современной климатической нестабильности в СЛО важно оценивать состояние биологических сообществ, населяющих водно-ледовую среду. В настоящем исследовании в качестве индикаторов изменений выбраны центрические и пеннатные диатомовые водоросли, доминирующие в ледовых флористических сообществах. Анализ показал значительные различия в видовом составе и обилии водорослей между сезонами, что свидетельствует о формировании независимых друг от друга флористических сообществ в современных условиях изменяющейся

физической среды в центральных районах СЛЮ, что подтверждает ранее полученные наблюдения в период 2007–2011, 2015 и 2018 гг. [14, 15, 16, 17, 19, 21]. Обсуждаемые здесь материалы получены в короткий период времени и на ограниченных пространствах в зонах продуцирования однолетних льдов на акваториях шельфовых морей и зонах выноса в центральные районы СЛЮ. Вместе с тем краткосрочные наблюдения дают «мгновенную» информацию о качественном и количественном состоянии ледовых биологических сообществ. Для получения достоверной оценки необходимы длительные наблюдения, которые, возможно, будут организованы в ближайшее время на новых логистических подходах в изучении морской Арктики.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы Госзадания № 0149–2018–0009.

Благодарности. Настоящее исследование состоялось благодаря поддержке рейсов программой NABOS и ее руководителем И. Поляковым. Все полевые работы в экспедициях выполняли сотрудники ААНИИ А.А. Абрамов, В.Л. Кузнецов и В.В. Поважный. Всем перечисленным сотрудникам выражается глубокая благодарность за организацию, проведение полевых работ и обработку собранных материалов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The article was supported by State Assignment № 0149–2018–0009.

Acknowledgments. This study was carried out with the support by the NABOS program and its head I. Polyakov. All the field work in the expeditions was carried out by the AARI employees Abramov A., Kuznetsov V. and Povazhny V. Deep gratitude is expressed to all the employees listed for organizing and conducting the work and processing the materials collected.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comiso J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover // *J. Clim.* 2012. V. 25. P. 1176–1193. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
2. Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows // *The Cryosphere.* 2018. V. 12 (2). P. 433–453. doi: 10.5194/tc-12-433-2018.
3. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2015. № 1 (103). С. 32–42.
4. Kwok R., Untersteiner N. The thinning of Arctic sea ice // *Phys. Today.* 2011. V. 64. P. 36–41. doi: 10.1063/1.3580491.
5. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // *Исследования Земли из Космоса.* 2013. Т. 4. С. 50–65.
6. Виноградная Е. С., Егорова Е. С., Шевелева Т.В., Юлин А.В. Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде // *Российская Арктика.* 2020. № 9. С. 41–55.
7. Haas C., Howell S. Ice thickness in the Northwest Passage // *Geophysical Research Letters.* 2015. V. 42. № 18. P. 7673–7680. doi: 10.1002/2015GL065704.
8. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // *The Cryosphere.* 2014. V. 11. P. 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.

9. Stroeve J.C., Schroeder D., Tsamados M., Feltham D. Warm winter, thin ice? // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 1791–1809. doi: 10.5194/tc-12-1791-2018.
10. Смоляницкий В.М., Тюряков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66 (3). С. 337–348. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.
11. Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В. Многолетняя изменчивость толщины припая в море Лаптевых по данным полярных станций // *Российская Арктика*. 2021. № 12. С. 62–76. doi: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76.
12. Мельников И.А. Экосистема арктического морского льда. М.: Наука, 1989. 192 с.
13. Мельников И.А. Современная экосистема арктического морского льда: динамика и прогноз // *Доклады РАН*. 2008. Т. 423 (6). С. 817–820.
14. Hop H., Vihtakari M., Bluhm B., Poulin M., von Quillfeldt C.H., Assmy P., Peeken I., Olsen L., Gradinger R., Zhitina L., Melnikov I. Microalgae and other unicellular eukaryotes in drifting sea ice in the Arctic Ocean from the 1980s to 2010 // *Frontiers in Marine Science*. 2020. V. 7 (243). P. 1–18.
15. Мельников И.А., Гогорев Р.М. Оценка состояния экосистемы морского льда центрального Арктического бассейна по данным наблюдений в период проведения МПП // *Наземные и морские экосистемы*. М.: Paulsen, 2011. с. 498–111.
16. Мельников И.А., Житина Л.С., Семенова Т.Н. Современное состояние биоразнообразия морского льда в районе Северного полюса // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. № 4 (110). С. 104–110.
17. Assmy P., Bluhm B., Gradinger R., Hop H., Melnikov I., Olsen L., Peeken I., Poulin M., Vihtakari M., von Quillfeldt C.H., Zhitina L. Unicellular eukaryotes in Sea ice in the central Arctic from the 1980s-2010s: a changing community? // *Frontiers in Marine Science*. 2018. V. 7. Paper 243. doi: 10.3389/fmars.2020.00243.
18. Bluhm B., Hop H., Vihtakari M., Gradinger R., Quillfeldt C., Melnikov I., Collins E., Poulin M., Pedersen T.J. Sea ice biota // *CAFF Monitoring Series Report*. 2017. № 1. P. 33–61.
19. Мельников И.А. Оценка современного состояния и особенностей формирования биоты арктического морского льда: по материалам мониторинга в районе Северного полюса // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2017. Т. 28. № 1. С. 83–97.
20. Мельников И.А. Характеристика биоразнообразия современного морского льда в районе Северного полюса // *Доклады РАН*. 2018. Т. 480 (5). С. 596–600.
21. Мельников И.А. Мониторинг водно-ледовой экологической системы в районе Северного полюса (апрель 2018) // *Российские полярные исследования: Информационно-аналитический сборник*. 2018. Т. 2 (32). С. 13–14.
22. Мельников И.А. Мониторинг водно-ледовой экосистемы центрального Арктического бассейна в период экспедиции на НЭС «Академик Трешников» (август-сентябрь 2018) // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46 (3). С. 16–21.
23. WMO Sea-Ice Nomenclature. WMO, 2014, No. 259.
24. Horner R., Ackley S.F., Dieckmann G.S., Gulliksen B., Hoshiai T., Legendre L., Melnikov I.A., Reeburgh W.S., Spindler M., Sullivan C.W. Ecology of the sea ice biota. Habitat, terminology, and methodology // *Polar Biol*. 1992. V. 12. P. 417–427.
25. Усачев П.И. Микрофлора полярных льдов // *Тр. ИО АН СССР*. 1949. Т. 3. С. 216–259.
26. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука, 1969. Т. 1. 657с.
27. Мельников И.А. Кробиологические наблюдения в Центральном Арктическом бассейне (метод и некоторые результаты исследований) // *Океанология*. 1979. Т. 19 (1). С. 150–155.

28. *Utermöhl H.* Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons (mit besonderer Berücksichtigung des Ultraplanktons) // *Vehr. int. Ver. theor. angew. Limnol.* 1931. V. 5 (2). P. 567–569.
29. *Песенко Ю.А.* Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
30. Обзор гидрометеорологических процессов в северной полярной области 2018 / Под редакцией д-ра геогр. наук А.С. Макарова. СПб.: ААНИИ, 2019. 102 с.
31. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. М., 2019. 79 с.
32. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 г. М., 2022. 104 с.
33. Наблюдения за ледовой обстановкой: Учебное пособие. СПб.: ААНИИ, 2009. 360 с.
34. *Тимофеева А.Б.* Ледовые условия плавания в экспедиции NABOS-2021 в сентябре-октябре 2021 года // *Российская Арктика.* 2021. № 15. С. 54–67.
35. *Ivanov V.* Physical oceanography from CTD measurements during Akademik Tryoshnikov cruise AT2018 to the Arctic Ocean // *PANGAEA.* 2019. doi: 10.1594/PANGAEA.905471.
36. *Гордиенко П.А.* Дрейф льдов в центральной части Северного Ледовитого океана // *Проблемы Севера.* 1958. № 1. С. 3–29.
37. *Беклемишев К.В.* Экология и биогеография океана. М.: Наука, 1969. 291 с.
38. *Окологдов Ю.Б.* Водоросли льдов Восточно-Сибирского моря в мае 1987 г. // *Новости систематики низших растений.* Л.: Наука, 1989. Т. 26. С. 36–41.
39. *Окологдов Ю.Б.* Водоросли льдов моря Лаптевых в мае 1988 и 1989 гг. // *Новости систематики низших растений.* Л.: Наука, 1989. Т. 28. С. 25–31.
40. *Окологдов Ю.Б.* Водоросли льдов Чукотского моря в марте-апреле 1988 г. // *Новости систематики низших растений.* Л.: Наука, 1990. Т. 27. С. 16–20.
41. *Okolodkov Yu.B.* Cryopelagic flora of the Chukchi, East Siberian and Laptev seas // *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.* 1992. V. 5. P. 28–43.
42. *Melnikov I.A., Kolosova L.G., Welch H.E., Zhitina L.S.* Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean // *Deep-Sea Research.* 2002. V. 1 (49). P. 1623–1649.
43. *Ильяш Л.В., Житина Л.С.* Сравнительный анализ видового состава диатомовых водорослей льдов морей Российской Арктики // *Общ. биол.* 2009. Т. 70. № 2. С. 143–154.

REFERENCES

1. *Comiso J.J.* Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. *J. Clim.* 2012, 25: 1176–1193. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
2. *Petty A. A., Stroeve J. C., Holland P. R., Boisvert L. N., Bliss A. C., Kimura N., Meier W. N.* The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows. *The Cryosphere.* 2018, 12 (2): 433–453. doi: 10.5194/tc-12-433-2018.
3. *Alekseev G.V., Radionov V.F., Alexandrov E.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E.* Climate change in the Arctic under global warming. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2015, 1 (103): 32–42. [In Russian].
4. *Kwok R., Untersteiner N.* The thinning of Arctic sea ice. *Phys. Today.* 2011, 64: 36–41. doi: 10.1063/1.3580491.
5. *Ivanov V.V., Alexeev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V.* Does Arctic ocean ice cover become seasonal? *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* Exploring the Earth from Space. 2013, 4: 50–65. [In Russian].

6. Vinogradnaya E.S., Egorova E.S., Sheveleva T.V., Yulin A.V. Variability of the spring old ice and fall residual ice boundary in the Arctic Ocean over the current period of climate changes. *Rossijskaya Arktika*. Russian Arctic. 2020, 9: 41–55. doi: 10.24411/2658-4255-2020-12094. [In Russian].
7. Haas C., Howell S. Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophysical Research Letters*. 2015, 42 (18). doi: 10.1002/2015GL065704.
8. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data. *The Cryosphere*. 2017, 11: 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.
9. Stroeve J.C., Schroeder D., Tsamados M., Feltham D. Warm winter, thin ice? *The Cryosphere*. 2018, 12: 1791–1809. doi: 10.5194/tc-12-1791-2018.
10. Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E. Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 337–348. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348. [In Russian].
11. Timofeeva A.B., Sharatunova M.V. Multiyear variability of the fast ice thickness in the Laptev Sea according to the polar stations data. *Rossijskaya Arktika*. Russian Arctic. 2021, 12: 62–76. doi: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76. [In Russian].
12. Melnikov I.A. *Ekosistema arkticheskogo morskogo l'da*. Ecosystem of Arctic sea ice. Moscow: Nauka, 1989: 192 p. [In Russian].
13. Melnikov I.A. Modern Arctic sea ice ecosystem: dynamics and forecast. Reports of the Russian Academy of Sciences. 2008, 423 (6): 817–820 [In Russian].
14. Hop H., Vihtakari M., Bluhm B., Poulin M., C. von Quillfeldt, Assmy P., Peeken I., Olsen L., Gradinger R., Zhitina L., Melnikov I. Microalgae and other unicellular eukaryotes in drifting sea ice in the Arctic Ocean from the 1980s to 2010. *Frontiers in Marine Science*. 2020, 7 (243): 1–18.
15. Melnikov I.A., Gogorev R.M. Assessment of the sea ice ecosystem conditions in the Central Arctic basin according to observations during the IPY. *Nazemnye i morskije ekosistemy*. Terrestrial and marine ecosystems. Moscow: Paulsen, 2011: 498–111. [In Russian].
16. Melnikov I.A., Zhitina L.S., Semenova T.N. The current sea ice biodiversity conditions of the North Pole region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2016, 4 (110): 104–110. [In Russian].
17. Assmy P., Bluhm B., Gradinger R., Hop H., Melnikov I., Olsen L., Peeken I., Poulin M., Vihtakari M., C. von Quillfeldt, Zhitina L. Unicellular eukaryotes in Sea ice in the central Arctic from the 1980s-2010s: a changing community? *Frontiers in Marine Science*. 2018, 7: 243. doi: 10.3389/fmars.2020.00243.
18. Bluhm B., Hop H., Vihtakari M., Gradinger R., Quillfeldt C., Melnikov I., Collins E., Poulin M., Pedersen T.J. Sea ice biota. In: *CAFF Monitoring Series Report*. 2017, 1: 33–61.
19. Melnikov I.A. Assessment of the current conditions and features of the Arctic sea ice biota formation: based on monitoring data in the North Pole region. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling. 2017, 28 (1): 83–97. [In Russian].
20. Melnikov I.A. Biodiversity characteristics of the recent sea ice in the North Pole region. *Doklady RAN*. Reports of the Russian Academy of Sciences. 2018, 480 (5): 596–600. [In Russian].
21. Melnikov I.A. Monitoring of the water-ice ecological system in the North Pole region (April 2018). *Rossijskie polyarnye issledovaniya: Informacionno-analiticheskiy sbornik*. Russian Polar research: Information and analytical collection. 2018, 2 (32): 13–14. [In Russian].
22. Melnikov I.A. Monitoring of the water-ice ecosystem of the Central Arctic basin during the expedition at R/V “Akademik Treshnikov” (August-September 2018). *Okeanologicheskie issledovaniya*. Oceanological research. 2018, 46 (3): 16–21. [In Russian].
23. WMO Sea-Ice Nomenclature. WMO, 2014, No. 259.