



УДК [582.261.1:551.326.7](265.54.04)

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ СТРУКТУРА
СООБЩЕСТВА МИКРОВОДОРОСЛЕЙ МОРСКОГО ЛЬДА
(ОСТРОВ РУССКИЙ, ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)**

© 2022 г. **Е. А. Юрикова, А. А. Бегун**

Национальный научный центр морской биологии имени А. В. Жирмунского ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация
E-mail: komicitykat@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2021; после доработки 21.09.2021;
принята к публикации 03.03.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.

Впервые для российского побережья Японского моря изучена количественная структура сообщества микроводорослей морского льда. Исследованием охвачены биотопы льда и подлёдного фитопланктона двух бухт острова Русский в зимний период 2020 и 2021 гг. Идентифицировано 88 видов микроводорослей из 50 родов и 7 отделов. Установлено, что сообщество микроводорослей льда характеризовалось большим видовым богатством, чем подлёдный фитопланктон. Среди доминирующих видов наиболее многочисленными были планктонные диатомовые водоросли *Chaetoceros socialis* f. *radians*, *Nitzschia frigida*, *Thalassiosira nordenskiöldii* и *Nitzschia* sp. Диатомеи составляли основу сообщества, достигая в 2020 г. численности 1861,2 кл.·мл⁻¹ в бух. Воевода и 751,2 кл.·мл⁻¹ в бух. Новик, а в 2021 г. — 6846,3 и 17143,1 кл.·мл⁻¹ соответственно. В 2020 г. в бух. Воевода численность клеток была максимальной в верхнем слое ледового керна и постепенно снижалась ближе к границе с подлёдной водой; в бух. Новик она была распределена почти равномерно по всему керну. В 2021 г. в бух. Воевода отмечена противоположная закономерность: в верхних слоях керна численность микроводорослей была минимальной, а по ходу продвижения вниз, к границе с подлёдной водой, она постепенно возрастала. В бух. Новик максимум численности зарегистрирован в верхнем слое керна, притом что распределение по всем слоям было относительно равномерным. Таким образом, показаны различия в количественной структуре микроводорослей льда в зависимости от слоя ледового керна, года и места исследования.

Ключевые слова: количественная структура, микроводоросли, фитопланктон, залив Петра Великого, остров Русский, Японское море

Основным биологическим компонентом ледового покрова морей являются микроводоросли (далее — МВ). Во льду существуют разветвлённые поры и каналы, и в них попадают клетки планктонных и бентосных МВ из подлёдной воды. Некоторые виды оказываются более приспособленными к таким экстремальным условиям обитания и начинают стремительно развиваться (Буйницкий, 1973 ; Мельников, 1989). Это более выражено для многолетних льдов, однако даже в ледовом покрове, образующемся в бухтах только на зимний период, порой прослеживаются существенные отличия от фитопланктона по качественному и количественному составу МВ.

В зимний период продукция МВ в ледовых пробах может составлять до 7,5 % от общей первичной продукции акватории (Dupont, 2012). Во время таяния ледового покрова МВ выступают основным источником пищи для организмов, стоящих на более высоких ступенях трофических

отношений. Уже этим обусловлена важность исследования структуры ледовых сообществ в акваториях с сезонно образующимся ледовым покровом. Залив Петра Великого представляет научный интерес в области изучения МВ морских льдов, поскольку на данной географической широте только в этой акватории способен формироваться ледовый покров, устойчивый в течение продолжительного времени.

Исследования сообществ МВ во льдах Японского моря ограничены в основном изучением физико-химических и продукционных характеристик льда и анализом закономерностей формирования ледовых условий. Первое описание ледовых условий было выполнено Л. И. Шренком в 1869 г. и касалось только Татарского пролива. Публикацией, наиболее близкой в контексте исследуемого объекта в регионе залива Петра Великого, является работа по изучению хлорофилла и первичной продукции МВ, связанных со льдом Амурского залива (Кузнецов, 1980), где автором не только проведён анализ состава фотосинтетических пигментов, но и приведены некоторые данные по видовому составу МВ, а также по их численности. В совместной работе сотрудников Тихоокеанского океанологического института имени В. И. Ильичёва (ТОИ ДВО РАН) и Национального научного центра морской биологии имени А. В. Жирмунского (ННЦМБ ДВО РАН) по изучению продукционных характеристик льда эстуария реки Раздольная в период ледостава указано, что лёд характеризовался значительно меньшим видовым богатством, чем фитопланктон (Звалинский и др., 2010).

Исследования отечественных и зарубежных авторов по сообществам МВ, связанных со льдом, в основном охватывают полярные районы (Рябушко, 2016 ; Arrigo et al., 2014 ; Kauko et al., 2018 ; Werner et al., 2007). Изучение акваторий залива Петра Великого, как и других акваторий российского побережья Японского моря, преимущественно сконцентрировано либо на флористическом составе вод, либо на физико-химических параметрах льда и на его продукционных характеристиках. В настоящее время почти отсутствуют научные сведения о количественных характеристиках связанных со льдом сообществ МВ для российского побережья Японского моря, особенно в различных ледовых горизонтах, что особенно актуально для льдов значительной толщины. Бухты Воевода и Новик представляют большой интерес в связи с наличием там определённых проблем экологического характера. Так, в бух. Воевода действуют марикультурные хозяйства, которые оказывают влияние на функционирование произрастающего в этой акватории взморника *Zostera marina* Linnaeus, 1753 — одного из растений, формирующих местные экологические условия (Барабанщиков и др., 2018). Бух. Новик подвергается антропогенному стрессу, обусловленному бытовыми стоками кампуса Дальневосточного федерального университета. По указанным проблемам существует ряд исследований гидрологической, гидрохимической и экологической направленности, которые, в совокупности с полученными нами данными, могли бы быть расширены в контексте изучения динамики данных акваторий под антропогенным влиянием. На этом основании возник фундаментальный интерес к анализу количественной структуры МВ морского льда в двух близлежащих бухтах острова Русский в течение двух зимних сезонов.

Цель настоящего исследования заключалась в изучении количественной структуры сообщества микроводорослей морского льда в двух бухтах острова Русский (Японское море) в течение зимних периодов 2020 и 2021 гг.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили керны льда и пробы подлёдной воды, которые были отобраны 18.02.2020 в бух. Воевода (43°00'05.6"N, 131°79'30.8"E), 19.02.2020 — в бух. Новик (43°01'38.9"N, 131°88'16.3"E), 25.02.2021 — в обеих бухтах в тех же координатных точках (рис. 1).

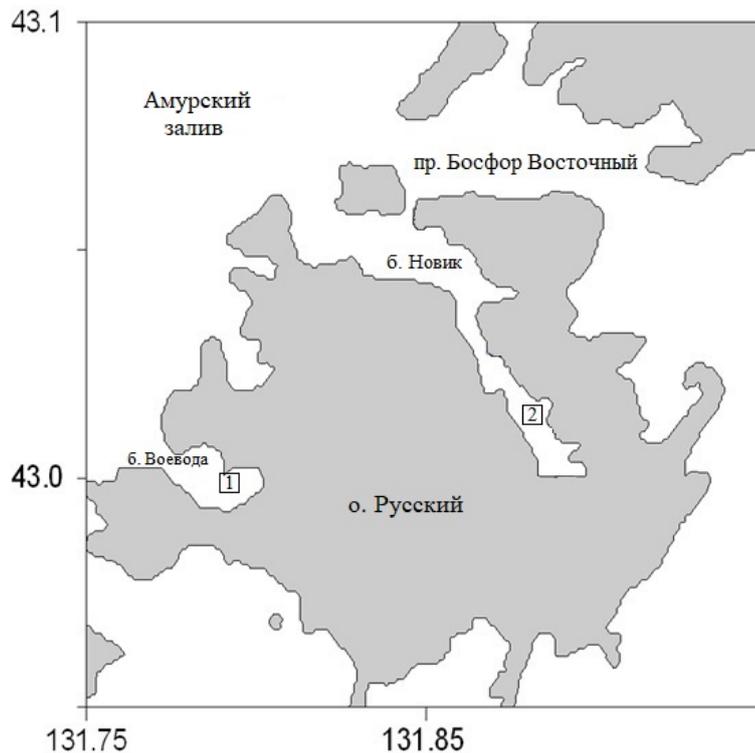


Рис. 1. Станции отбора проб кернов льда и подлёдной воды: 1 — бухта Воевода; 2 — бухта Новик
Fig. 1. Ice core and under-ice water sampling stations: 1, the Voevoda Bay; 2, the Novik Bay

Метеорологические условия в дни отбора проб: безоблачная погода и температура воздуха около $-0,3$ °С. В 2020 г. в акватории бух. Воевода зарегистрировано наличие снежного покрова глубиной около 10 см, в 2021 г. — около 3 см. В акватории бух. Новик в периоды сбора материала снежный покров отсутствовал. Глубина до дна в бух. Воевода в 2020 г. составляла 3 м, в 2021 г. — около 2,5 м. Глубина до дна в бух. Новик в 2020 г. — 7 м, в 2021 г. — 7,5 м.

Ледовые керны отбирали кольцевым буром диаметром 15 см. Затем их распиливали на слои длиной по 10 см и помещали в стерильные пластиковые контейнеры. Длина ледовых кернов в 2020 г. в бух. Воевода составляла 44 см, в бух. Новик — 38 см. Длина в 2021 г. в бух. Воевода — 62 см, в бух. Новик — 64 см (рис. 2).

Кроме отбора кернов, был произведён отбор подлёдной воды с помощью пятилитрового батометра Нискина. Гидрохимический состав проб проанализирован в ТОИ ДВО РАН. Видовая идентификация и определение количественных характеристик МВ проведены в лаборатории морской микробиоты ННЦМБ ДВО РАН.

Керны растапливали при температуре $+24$ °С, затем талую воду разливали в стерильную посуду. Пробы фиксировали 5%-ным раствором йодистого калия в соотношении 2,5 мл йода на 1 л талой воды. В соответствии с методикой Радченко (Радченко и др., 2010), по прошествии 12 дней избыток воды сливали до 100–200 мл остатка с каждого слоя.

Видовую идентификацию МВ проводили с использованием светового микроскопа проходящего света Olympus BX41 с объективом UPLanF1 100×/1.30 (Япония). Для уточнения видового состава материал исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Sigma 300 VP (Великобритания). Очистку панцирей диатомовых водорослей от органических веществ проводили «холодным» и «горячим» способами обработки концентрированной серной кислотой с последующей отмывкой в дистиллированной воде (Рябушко и Бегун, 2015).

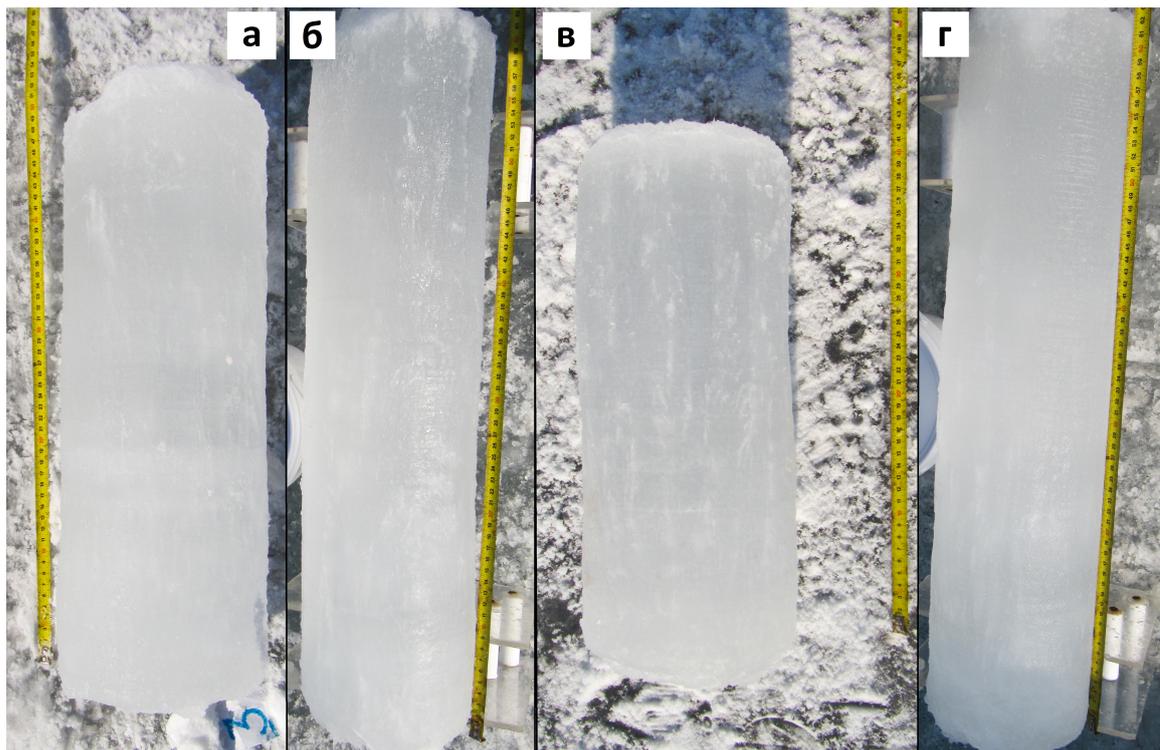


Рис. 2. Ледовые керны из бухт Воевода (а — 2020 г.; б — 2021 г.) и Новик (в — 2020 г.; г — 2021 г.)

Fig. 2. Ice cores from the Voevoda Bay (а, 2020; б, 2021) and the Novik Bay (в, 2020; г, 2021)

Подсчёт клеток проводили в камере Седжвика — Рафтера (Sedgewick–Rafter counting cells) объёмом 1 мл. Биомассу МВ оценивали объёмным методом, используя оригинальные и литературные данные измерений объёма клеток каждого вида (Biovolumes and Size-Classes, 2006 ; Sun & Liu, 2003). Отделы МВ расположены по системе, принятой в работе Г. В. Коноваловой с соавторами (1989). Доминирующими считали виды, плотность которых составляла не менее 20 % от общей плотности (Коновалова, 1984).

Для статистического анализа данных использовали индексы Шеннона и Пиелу. Индекс Шеннона – Винера (H) рассчитывали следующим способом:

$$H = - \sum p_i \ln p_i ,$$

где p_i — доля i -го вида в суммарной плотности.

Индекс выровненности Пиелу (e) вычисляли по формуле:

$$e = H / \ln S ,$$

где H — индекс Шеннона;

S — общее число видов (Мэгарран, 1992).

РЕЗУЛЬТАТЫ

МВ бухт острова Русский были представлены 88 видами из 7 отделов. В ледовом биотопе отмечено большее видовое богатство, чем в биотопе фитопланктона: во льду обнаружено 80 видов из 7 отделов, в фитопланктоне — 40 видов из 5 отделов. По числу видов преобладали роды диатомовых водорослей *Navicula* Bory, 1822, *Nitzschia* Hassall, 1845 и *Protoperidinium* Bergh, 1881, а также динофлагеллята *Gyrodinium* Kofoid & Swezy, 1921.

Анализ количественной структуры МВ льда показал, что наибольшей по численности и биомассе была доля диатомей (табл. 1). Об этом также свидетельствовало повышенное содержание силикатов в пробах воды и льда: значение достигало $3,05 \text{ мкмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ в 2020 г. и $5,53 \text{ мкмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ — в 2021 г.

Таблица 1. Количественные характеристики представителей отделов микроводорослей (N — численность, кл.·мл⁻¹; B — биомасса, мг·м⁻³)

Table 1. Quantitative characteristics of algal divisions representatives (N, abundance, cells·mL⁻¹; B, biomass, mg·m⁻³)

Отдел	Бухта Воевода				Бухта Новик			
	2020 г.		2021 г.		2020 г.		2021 г.	
	N	B	N	B	N	B	N	B
Chrysophyta	15,5	52,6	76,2	243,4	0,3	1,1	0,2	1,7
Bacillariophyta	1861,2	9327,5	6846,3	53 457,8	751,2	9851,4	17 143,1	165 143,0
Cryptophyta	0,0	0,0	4500,0	121,5	0,0	0,0	1714,3	46,3
Dinophyta	11,8	1490,3	1,7	15,1	40,5	438,9	2,6	36,3
Chlorophyta	0,0	0,0	578,0	83,0	0,0	0,0	493,6	71,0
Euglenophyta	0,0	0,0	20,4	211,2	3,8	39,3	1,9	20,0
Harptophyta	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47,9	4,2
Сумма	1888,5	10 870,4	12 022,6	54 132,0	795,8	10 330,7	19 403,6	165 322,5

Доминирующими видами диатомовых водорослей в ледовой флоре были *Chaetoceros socialis* f. *radians* (F. Schütt) Proshkina-Lavrenko, 1963, *Nitzschia frigida* Grunow in Cleve & Grunow, 1880 и *Thalassiosira nordenskiöldii* Cleve, 1873, а также неидентифицированный мелкоклеточный вид рода *Nitzschia*. Менее существенно в 2020 г. были представлены динофлагелляты, среди которых выделялись виды *Amphidinium sphenoides* Wulff, 1919 и *Protoperidinium depressum* (Bailey) Valech, 1974, а в 2021 г. — зелёные водоросли (неидентифицированные виды прازیнофитовых). Наименьший вклад вносили золотистая водоросль *Octactis speculum* (Ehrenberg) F. H. Chang, J. M. Grieve & J. E. Sutherland, 2017 и эвгленовая *Eutreptiella braarudii* Throndsen, 1969. В фитопланктоне обеих бухт в 2021 г. отмечено доминирование криптофитовой водоросли рода *Plagioselmis* Butcher, 1994. Гаптофитовые с относительно невысокими количественными значениями зарегистрированы только в верхних слоях льда в бух. Новик в 2021 г.

Анализ количественного распределения МВ по слоям льда показал: в 2020 г. в бух. Воевода численность клеток была максимальной в верхнем слое ледового керна и постепенно снижалась ближе к границе с подлёдной водой (рис. 3а). В бух. Новик численность была распределена приблизительно равномерно по всему керну (рис. 3б).

При этом численность ледовых МВ в бух. Новик была почти на порядок ниже, чем в бух. Воевода, а в фитопланктоне, напротив, на порядок выше.

В 2021 г. в бух. Воевода зафиксирована в целом противоположная предыдущему году закономерность: в верхних слоях керна численность клеток была минимальной, но с приближением к границе с подлёдной водой она постепенно росла (рис. 4а). Численность МВ во льду превышала этот показатель для предыдущего года почти в 3 раза, а в фитопланктоне — на 3 порядка.

В бух. Новик численность МВ была максимальной в верхнем слое керна, но при этом она относительно равномерно распределилась по всем слоям (рис. 4б). По сравнению со значениями 2020 г., численность во льду и фитопланктоне была выше на порядок. При этом численность клеток во льду на порядок превышала значения в бух. Воевода, а в фитопланктоне она была сопоставимой.

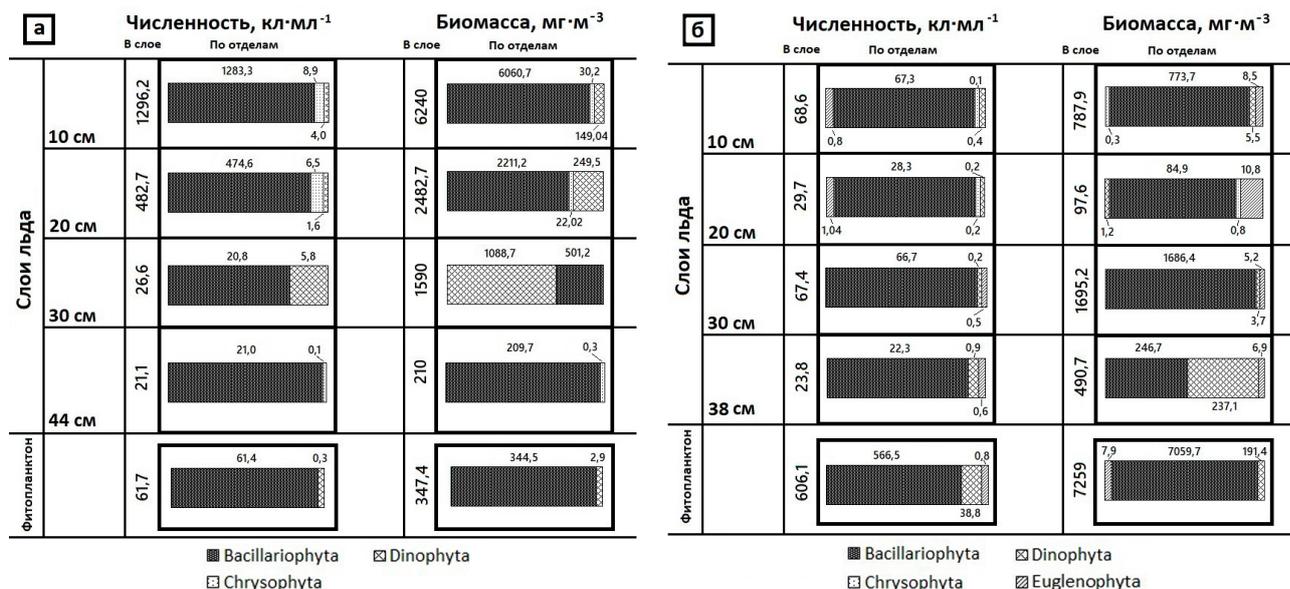


Рис. 3. Диаграммы распределения численности и биомассы отделов микроводорослей по слоям льда и в фитопланктоне в бухтах Воевода (а) и Новик (б) в 2020 г.

Fig. 3. Diagrams of the distribution of microalgal divisions abundance and biomass by ice layers and in phytoplankton in the Voevoda Bay (a) and the Novik Bay (б) in 2020

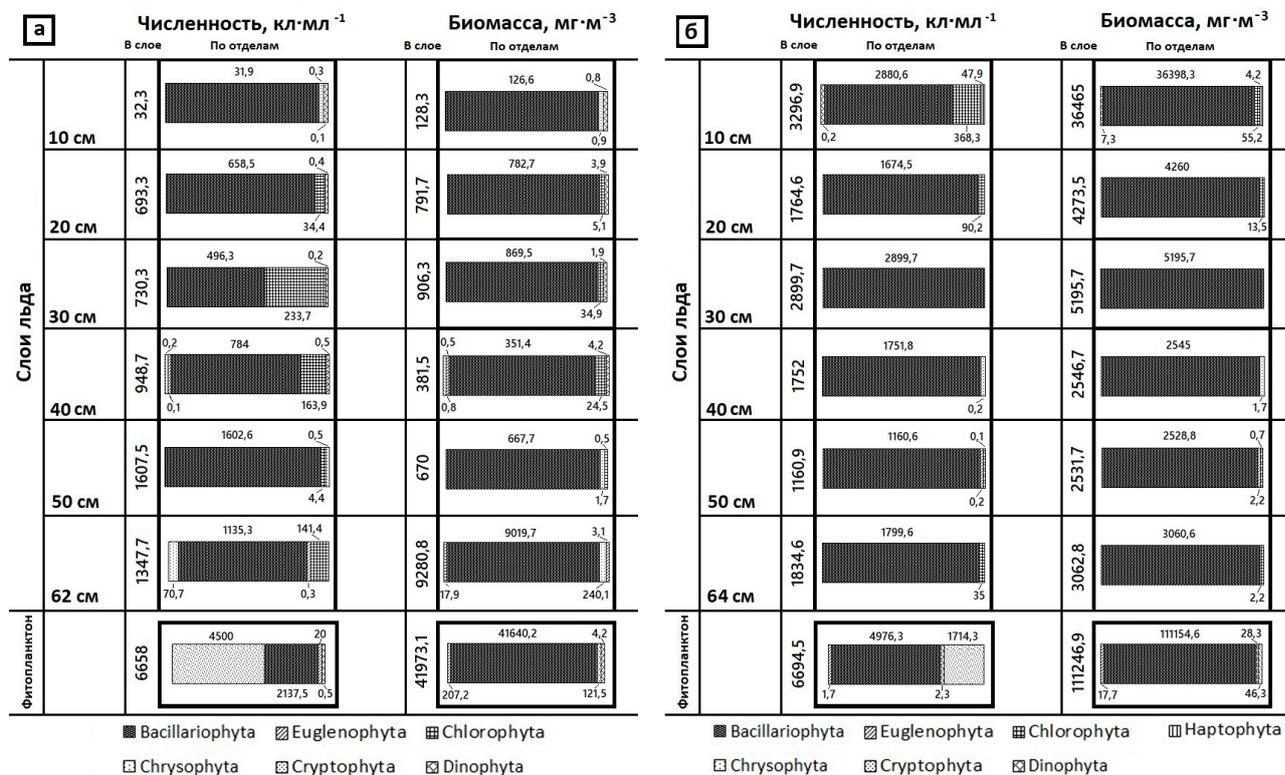


Рис. 4. Диаграммы распределения численности и биомассы отделов микроводорослей по слоям льда и в фитопланктоне в бухтах Воевода (а) и Новик (б) в 2021 г.

Fig. 4. Diagrams of the distribution of microalgal divisions abundance and biomass by ice layers and in phytoplankton in the Voevoda Bay (a) and the Novik Bay (б) in 2021

Анализ количественной структуры МВ льда двух бухт острова Русский в 2020 и 2021 гг. показал более или менее существенные различия в величинах общей численности и биомассы основных доминирующих видов (рис. 5–8).

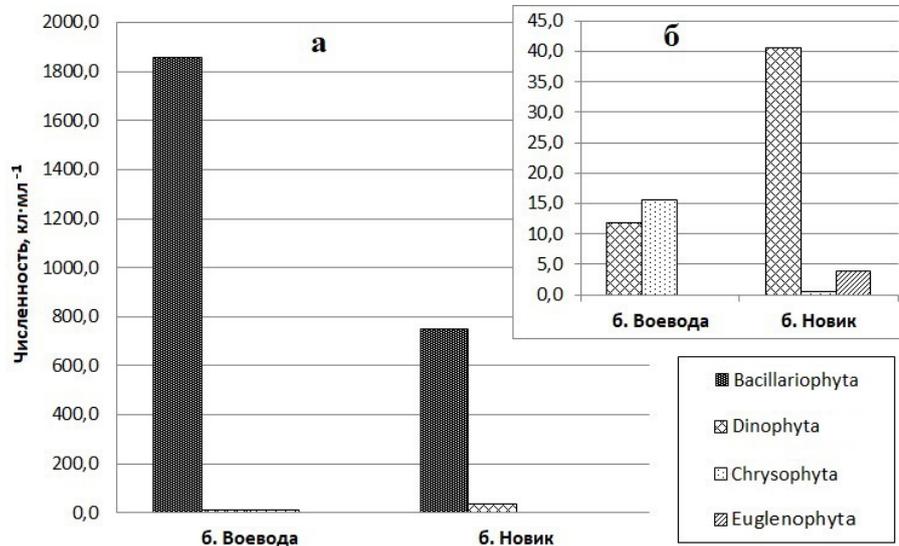


Рис. 5. Диаграммы численности отделов микроводорослей в 2020 г.: а — представителей преобладающих отделов; б — представителей малочисленных отделов

Fig. 5. Diagrams of microalgal divisions abundance in 2020: a, for representatives of prevailing divisions; б, for representatives of small divisions

Численность МВ в ледовых пробах из бух. Воевода в 2020 г. составляла 1826 кл·мл⁻¹, доминировала диатомовая водоросль *N. frigida* (93,12 % от общей численности). Значение в фитопланктоне — 62 кл·мл⁻¹; преобладали диатомеи *Nitzschia* sp. (40,91 %) и *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, 1964 (31,25 %), субдоминировал вид *N. frigida* (10,80 %). Биомасса в ледовом керне составляла 10522,8 мг·м⁻³, в фитопланктоне — 347,5 мг·м⁻³.

О низком видовом богатстве и структурной выровненности сообщества МВ в обоих биотопах свидетельствуют значения индексов видового разнообразия (1,7 для льда и 1,6 для фитопланктона) и выровненности (0,4 и 0,5 соответственно).

В бух. Новик в 2020 г. во льду отмечена на порядок более низкая численность МВ, чем в бух. Воевода, — 189 кл·мл⁻¹. Доминировала диатомовая водоросль *T. nordenskiöldii* с долей в 22,63 % от общей численности, что оказалось выше доли этого вида в бух. Воевода (5 %). Субдоминирующее положение занимали диатомея *Pseudo-nitzschia pungens* (Grunow ex Cleve) Hasle, 1993 (19,12 %), а также виды *N. frigida* (16,32 %) и *C. closterium* (12,90 %). В фитопланктоне численность клеток составляла 606 кл·мл⁻¹, что на порядок выше значения в бух. Воевода; доминировала диатомея *Thalassiosira gravida* Cleve, 1896 (88,83 % от общей численности).

Суммарная биомасса МВ в ледовом керне и фитопланктоне в бух. Новик в 2020 г. была сходна с биомассой в бух. Воевода. В ледовом керне биомасса составляла 3071,7 мг·м⁻³, что гораздо ниже, чем в бух. Воевода. Биомасса в фитопланктоне бухты — 7259,1 мг·м⁻³, что на порядок выше значений, полученных по бух. Воевода.

Видовое богатство МВ в бух. Новик оказалось существенно выше во льду, чем в фитопланктоне, что подтверждено значениями индекса Шеннона — Винера (2,6 для льда и 0,6 для фитопланктона). Существенное различие отмечено и по индексу Пиелу (0,8 и 0,2 соответственно), что говорит о более высоком уровне структурной выровненности во льду по сравнению с таковым в фитопланктоне.

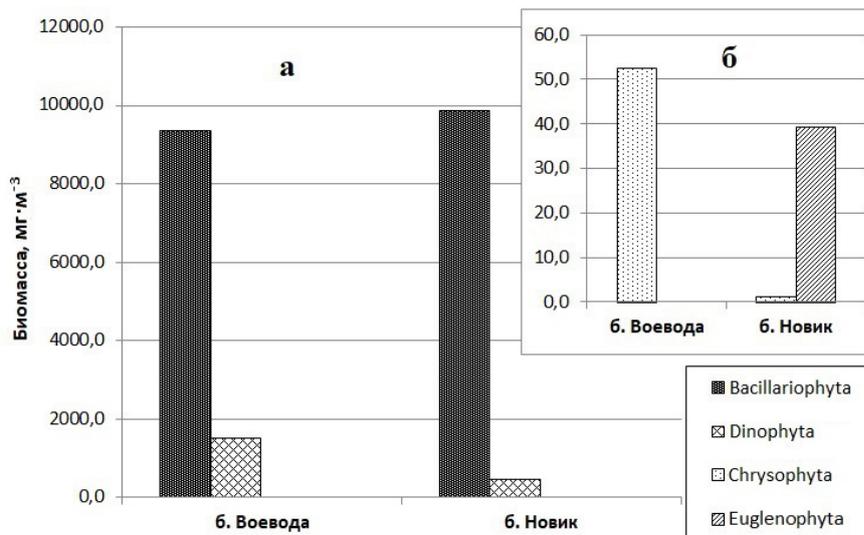


Рис. 6. Диаграммы биомассы отделов микроводорослей в 2020 г.: а — представителей преобладающих отделов; б — представителей отделов с низким обилием

Fig. 6. Diagrams of microalgal divisions biomass in 2020: a, for representatives of prevailing divisions; б, for representatives of small divisions

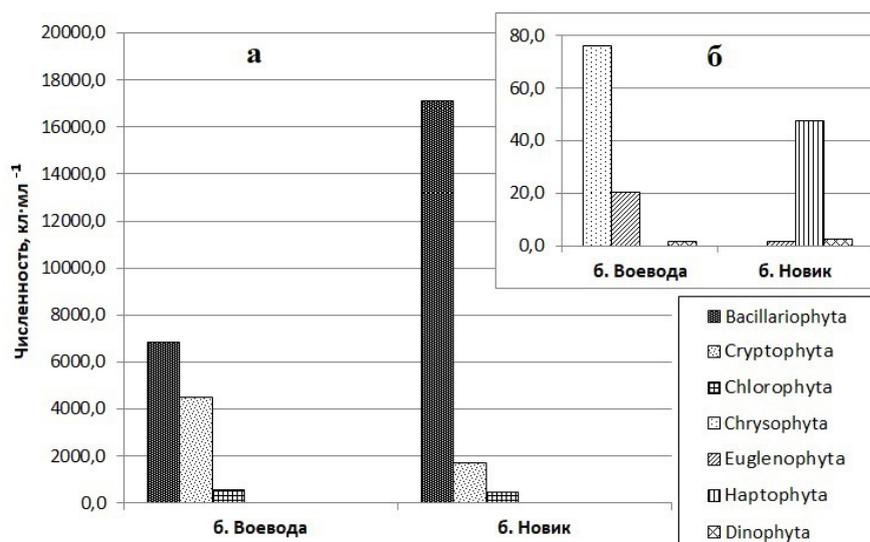


Рис. 7. Диаграммы численности отделов микроводорослей в 2021 г.: а — представителей преобладающих отделов; б — представителей малочисленных отделов

Fig. 7. Diagrams of microalgal divisions abundance in 2021: a, for representatives of prevailing divisions; б, for representatives of small divisions

В 2021 г. в бух. Воевода общая численность клеток оказалась на порядок выше, чем в 2020 г. Так, в ледовом керне она составила $5360 \text{ кл.}\cdot\text{мл}^{-1}$, что на порядок больше значений, полученных для льда бухты в 2020 г. Доминировала диатомовая водоросль *Chaetoceros socialis* f. *radians* (46,22 % от общей численности); среди субдоминантов отмечены *Navicula granii* (Jørgensen) Gran, 1908 (12,29 %), *Nitzschia* sp. (11,34 %) и неидентифицированные празиофитовые водоросли (9,93 %). Численность клеток в фитопланктоне достигла $6658 \text{ кл.}\cdot\text{мл}^{-1}$, что на два порядка превысило показатели для этого биотопа в 2020 г. Доминирующим видом стала криптофитовая водоросль *Plagioselmis* sp. (67,59 %); заметный вклад внесли диатомеи *T. nordenskiöldii* (11,26 %) и *Nitzschia* sp. (7,5 %).

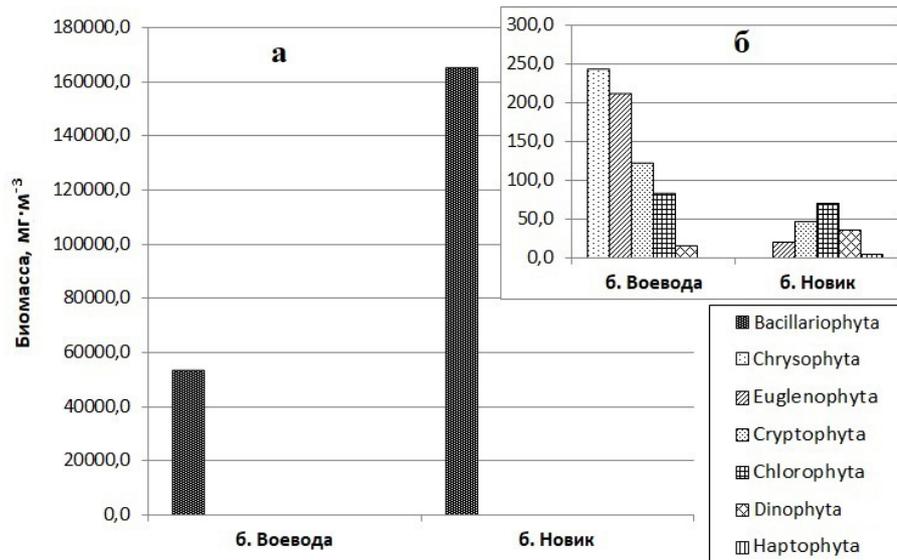


Рис. 8. Диаграммы биомассы отделов микроводорослей в 2021 г.: а — представителей преобладающих отделов; б — представителей отделов с низким обилием

Fig. 8. Diagrams of microalgal divisions biomass in 2021: a, for representatives of prevailing divisions; б, for representatives of small divisions

Биомасса МВ в ледовых пробах составляла $12158,8 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, в фитопланктоне — $41973,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Лёд, по сравнению с фитопланктоном, характеризовался более высоким видовым богатством (значения индекса Шеннона — Виннера составили 2,8 и 1,2 соответственно) и выровненностью (значения индекса Пиелу — 0,7 и 0,4, соответственно).

В бух. Новик в 2021 г. общая численность клеток во льду и фитопланктоне оказалась на порядок выше, чем в 2020 г. В ледовом керне численность составляла $12709 \text{ кл}\cdot\text{мл}^{-1}$; доминировали *Nitzschia* sp. (51,90 %) и *N. frigida* (28,43 %). Менее значительно были представлены *Entomoneis gigantea* var. *decussata* (Grunow) Nizamuddin, 1982 (5,96 %), *Navicula septentrionalis* Cleve, 1896 (4,59 %) и неидентифицированные прازیнофитовые (3,61 %). В фитопланктоне численность составляла $6694 \text{ кл}\cdot\text{мл}^{-1}$; доминировали *T. nordenskiöldii* (34,14 %) и *Plagioselmis* sp. (25,61 %), субдоминировали *N. septentrionalis* (11,95 %), *N. granii* (7,34 %) и *N. frigida* (5,12 %).

Биомасса МВ во льду — $54075,6 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, в фитопланктоне — $111247 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Как и в 2020 г., в 2021 г. в ледовом биотопе видовое богатство и его выровненность оказались выше (значения индексов — 2,8 и 0,8 соответственно), чем в биотопе фитопланктона (значения индексов — 1,8 и 0,6 соответственно).

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование морского льда и подлёдного фитопланктона бухт острова Русский, проведённое в течение двух зимних периодов, показало более или менее существенные различия в количественной структуре сообщества МВ. Наиболее значительные различия в количественной структуре отмечены по годам анализа: в 2020 г. сообщества МВ характеризовались в целом низким видовым богатством. Также зарегистрировано различие в количественных характеристиках биотопов льда и фитопланктона между исследуемыми бухтами. В частности, в бух. Воевода численность и биомасса МВ во льду существенно превышали показатели для фитопланктона, а в бух. Новик наблюдалась противоположная ситуация. Общая численность клеток в бух. Новик была вдвое ниже, чем в бух. Воевода, при этом общая биомасса была сходной.

Видовое богатство и коэффициент выровненности, как и количественная структура, в 2021 г. характеризовались более высокими значениями в обеих бухтах. Различия величин численности МВ в бух. Воевода были несущественными между биотопами льда и фитопланктона, тогда как значение биомассы в подлёдной воде было в 3 раза выше, чем во льду. Несколько иная ситуация наблюдалась в бух. Новик: численность клеток во льду была вдвое выше, чем в фитопланктоне, при этом значение биомассы в фитопланктоне в 2 раза превышало значение во льду. Флора МВ в бух. Новик имела в целом более высокие количественные показатели в обоих биотопах, чем в бух. Воевода. Исключение составлял фитопланктон: его численность была сходной в двух бухтах.

Следует отметить, что в период сбора материала (февраль) ледовые керны не имели визуальной окраски, свидетельствующей о массовом развитии МВ. Однако, по данным В. Х. Буйницкого (1973), проводившего аналогичные работы в Антарктике в 1962 г., численность МВ не всегда отражается на интенсивности окраски льда. В нашем случае отсутствие окраски можно объяснить значительной толщиной ледового покрова, по которому водоросли распределяются в период его формирования. В 2020 и 2021 гг. зарегистрирована существенная толщина ледового покрова бухт острова Русский (от 38 до 64 см), и такие значения нетипичны для большинства исследований молодого льда в полярных регионах. Например, согласно данным недавнего анализа норвежскими учёными молодого арктического льда (Kauko et al., 2018), толщина ледового покрова составляла около 27 см.

Полученные результаты согласуются с литературными данными по количественной структуре сообществ МВ залива Петра Великого в зимний период. По опубликованным материалам, основу ледового и подлёдного сообщества водорослей составляют диатомовые — как по видовому составу, так и по количественной структуре. В разных работах, ввиду различий в метеорологических, гидрохимических и прочих условиях для конкретных акваторий, приведены разные данные об их количественной доле в сообществе (от 50 до 100 % от общей численности). Менее существенно в ледовом биотопе обычно представлены жгутиковые водоросли, преимущественно динофлагелляты; их количественный вклад в 2020 г. был сходен с таковым по литературным данным (Kauko et al., 2018). В 2021 г. вторыми по обилию (после диатомей) были представители зелёных водорослей. Наименьшей была доля золотистых и эвгленовых водорослей, что также сходится с результатами оригинального исследования.

Многие из доминирующих и субдоминирующих видов МВ льда бухт острова Русский были отмечены и в других работах по фитопланктону в зимний период. Так, планктонная диатомовая водоросль *Chaetoceros socialis* f. *radians* неоднократно зарегистрирована в массе в феврале в юго-восточной части Японского моря (Коновалова и др., 1989), в том числе в Амурском заливе (Орлова и др., 2009). Бенто-планктонная диатомея *Cylindrotheca closterium* ранее была указана для фитопланктона (Коновалова и др., 1989) и микрофитобентоса залива Петра Великого (Рябушко, 1990; Ryabushko et al., 2019). Ещё один доминант ледовой флоры — планктонная диатомовая водоросль *Nitzschia frigida* — тоже зафиксирован в числе преобладающих видов ледового биотопа Арктики (Kauko et al., 2018). Массовое развитие этого вида отмечено в акваториях залива Петра Великого (Бегун и др., 2011; Пономарева, 2017). Кроме того, представитель этого рода *Nitzschia* sp. упомянут среди доминирующих видов МВ, связанных со льдом, в Амурском заливе Японского моря (Кузнецов, 1980).

В составе доминирующих МВ морского льда акваторий острова Русский следует выделить планктонную диатомею *Thalassiosira nordenskioeldii*. Этот вид преобладал в подлёдном фитопланктоне в зимне-весенний период, достигая максимальной силы цветения при низких и отрицательных температурах воды в некоторых акваториях залива Петра Великого (Бегун и др., 2011; Коновалова и др., 1989; Шевченко и др., 2020), включая бух. Парис (Пономарева, 2017).

Диатомовые водоросли *Thalassiosira gravida* и виды рода *Pseudo-nitzschia* в зимнее время отмечены в составе доминантов в прибрежных районах залива Петра Великого (Коновалова и др., 1989 ; Орлова и др., 2009 ; Пономарева, 2017), а также в молодом арктическом льду (Kauko et al., 2018). Менее многочисленные в ледовом и планктонном биотопах острова Русский динофлагеллята *Protoperidinium depressum* и диатомея *Coscinodiscus oculus-iridis* Ehrenberg, 1840 ранее были зарегистрированы в акваториях залива Петра Великого в конце зимы и весной (Коновалова и др., 1989).

Впервые для фитопланктона залива Петра Великого зафиксировано доминирование представителей отдела Cryptophyta — видов из рода *Plagioselmis*. Согласно литературным материалам, криптофитовые водоросли этого рода преобладали в бух. Золотой Рог в сентябре (Стоник, 2018). Виды *Plagioselmis* были отмечены также среди МВ планктона Амурского залива, но в число доминирующих они не входили (Орлова и др., 2009).

Другие встреченные в ходе исследования МВ льда упомянуты в составе доминирующих в работе Л. Л. Кузнецова по МВ Амурского залива, связанным со льдом (1980). Среди них золотистая водоросль *Octactis speculum*, а также вид диатомовых *Entomoneis paludosa* (W. Smith) Reimer, 1975, который является представителем того же рода, что и обнаруженный нами в незначительном объёме *Entomoneis gigantea* var. *decussata*.

По литературным данным (Kauko et al., 2018), при формировании морского льда клетки МВ, присутствующие в толще воды, становятся включёнными в состав льда в результате сложных процессов турбулентного перемешивания. Однако рядом исследователей показано, что не только фитопланктон, но и бентос является источником пополнения ледового биотопа (Olsen et al., 2017 ; Ratkova & Wassmann, 2005). Как считают некоторые учёные (Okolodkov, 1992 ; Niemi et al., 2011), по мере формирования молодого льда центральных диатомей становится больше, чем пеннатных. По другим данным (Campbell et al., 2018 ; Galindo et al., 2017), в период образования морского льда центральные диатомовые водоросли начинают количественно преобладать над пеннатными или над динофлагеллятами. Также есть наблюдения, свидетельствующие о том, что в целом доминирование пеннатных диатомей является основной стадией сукцессии во время цветения представителей сообществ ледовой флоры (Leeuwe et al., 2018 ; Leu et al., 2015).

В заливе Восток Японского моря в январе 1980 г. на глубине 0,5 м при температуре воды $-1,2$ °С при образовании ледового покрова на каменистых грунтах максимальная биомасса диатомовых водорослей достигала 2576 мг·м⁻² за счёт бенто-планктонных видов *Odontella aurita* (Lyngbye) C. Agardh, 1832 и *Melosira moniliformis* (O. F. Müller) C. Agardh, 1824, которые, вместе с пеннатными диатомеями *Tabularia tabulata* (C. Agardh) Snoeijs, 1992 и *Licmophora abbreviata* C. Agardh, 1831 и мелкоклеточным видом *Diatomella salina* var. *septata* (Nikolaev) I. V. Makarova, 1968, формировали массовое скопление у самой кромки льда (Рябушко, 1990). Перечисленные виды также обнаружены нами в составе сообществ МВ исследованных бухт, но наш анализ, в противоположность вышеупомянутым результатам, показывает, что основу МВ льда в бухтах острова Русский составляют планктонные диатомовые водоросли из классов Coscinodiscophyceae и Bacillariophyceae. По-видимому, это связано с климатическими особенностями в разные годы, проявляющимися в периоды льдообразования, а также со спецификой факторов абиотической среды локальных местообитаний в каждой из исследуемых акваторий.

Данные нашей работы не позволяют делать выводы о сукцессионных процессах морского льда, поскольку материал был отобран однократно, только в феврале. Вместе с тем в ледовой флоре акваторий острова Русский можно наблюдать смешанный состав жизненных форм МВ, составляющих основу количественной структуры исследуемого льда.

Таким образом, в результате проведённого исследования в ледовый период 2020 и 2021 гг. отмечены различия в количественной структуре МВ морского льда и подлёдной воды бухт Воевода и Новик (иногда — более чем на один порядок). Различия в общей численности и биомассе МВ ледового биотопа зависели от года исследования, изучаемой акватории и слоя льда. Они могли быть связаны с особенностями гидрометеорологического режима, формирующегося в акваториях залива Петра Великого в разные годы, а также со спецификой гидролого-гидрохимических параметров водной среды в каждой из анализируемых акваторий.

Заключение. Впервые для широты залива Петра Великого Японского моря исследована количественная структура сообществ микроводорослей морского льда в двух бухтах острова Русский — Воевода и Новик; идентифицировано 88 видов из 50 родов и 7 отделов. Ледовый биотоп характеризовался более высоким видовым богатством по сравнению с биотопом фитопланктона: во льду отмечено 80 видов из 7 отделов, в фитопланктоне — 40 видов из 5 отделов.

Доминирующими видами диатомовых водорослей в сообществах МВ льда были *Chaetoceros socialis* f. *radians*, *N. frigida*, *T. nordenskioldii* и *Nitzschia* sp. Впервые для залива Петра Великого зарегистрировано преобладание в подлёдном фитопланктоне криптофитовой водоросли рода *Plagioselmis*.

Исследованы основные количественные характеристики МВ двух биотопов и горизонтов ледовых кернов в двух бухтах острова Русский. Установлен достаточно высокий уровень количественного обилия в ледовом покрове бухт Воевода и Новик. В первый год анализа сообщества МВ характеризовались существенно более низкими значениями численности и биомассы МВ, чем во второй. Диатомовые водоросли составляли основу количественной структуры сообщества, достигая в 2020 г. численности 1861,2 кл.·мл⁻¹ для бух. Воевода и 751,2 кл.·мл⁻¹ для бух. Новик; в 2021 г. — 6846,3 и 17143,1 кл.·мл⁻¹ соответственно.

В бух. Воевода в 2020 г. максимальная численность клеток отмечена в верхнем слое ледового керна; она постепенно снижалась ближе к границе с подлёдной водой. В бух. Новик численность была распределена приблизительно равномерно по всему керну. В 2021 г. в бух. Воевода зафиксирована в целом противоположная закономерность: в верхних слоях керна численность МВ была минимальной, а по ходу продвижения вниз, к границе с подлёдной водой, она постепенно возрастала. В бух. Новик максимум численности МВ зарегистрирован в верхнем слое керна, при этом распределение по всем слоям было относительно равномерным.

Таким образом, показаны различия в количественной структуре МВ ледовых проб двух бухт в зависимости от слоя ледового керна, года и места исследования. Требуется продолжение изучения морского льда в заливе Петра Великого, прежде всего в сезонном аспекте: на данной географической широте только в этой акватории способен формироваться ледовый покров, устойчивый в течение продолжительного времени.

Благодарность. Авторы выражают признательность сотрудникам ТОИ ДВО РАН Тищенко П. Я., Семкину П. Ю., Барабанщикову Ю. А. и Сагалаеву С. Г. за помощь в организации и проведении полевых работ. Также авторы благодарят Орлову Т. Ю. и Лазарюка А. Ю. за научную консультацию. Работа проведена на базе ЦКП РК «Морской биобанк» ННЦМБ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барабанщиков Ю. А., Тищенко П. Я., Семкин П. Ю., Михайлик Т. А., Косьяненко А. А. Условия образования лечебных грязей в бухте Воевода (Амурский залив, Японское море) // *Известия ТИНРО*. 2018. Т. 192. С. 167–176. [Barabanshchikov Yu. A., Tishchenko P. Ya., Semkin P. Yu., Mikhailik T. A., Kos'yanenko A. A. Conditions of forming for therapeutic mud in the Voevoda Bay (Amur Bay, Japan Sea). *Izvestiya TINRO*, 2018, vol. 192, pp. 167–176. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-192-167-176>

2. Бегун А. А., Маслеников С. И., Звягинцев А. Ю. Фитопланктон в районе очистных сооружений г. Владивостока (Амурский залив, Японское море) // *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2011. Т. 24. С. 3–12. [Begun A. A., Maslennikov S. I., Zvyagintsev A. Yu. Phytoplankton in treatment facilities area near Vladivostok (Amurskii Bay, Japan Sea). *Nauchnye trudy Dal'rybvтуza*, 2011, vol. 24, pp. 3–12. (in Russ.)]
3. Буйницкий В. Х. *Морские льды и айсберги Антарктики*. Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1973. 256 с. [Buinitskii V. Kh. *Morskie l'dy i aisbergi Antarktiki*. Leningrad : Izd-vo LGU, 1973, 256 p. (in Russ.)]
4. Звалинский В. И., Марьяш А. А., Стоник И. В., Швецова М. Г., Сагалаев С. Г., Бегун А. А., Тищенко П. Я. Продукционные и гидрохимические характеристики льда, подлёдной воды и донных осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // *Биология моря*. 2010. Т. 36, № 3. С. 186–195. [Zvalinsky V. I., Maryash A. A., Stonik I. V., Shvetsova M. G., Sagalaeв S. G., Begun A. A., Tishchenko P. Ya. Production and hydrochemical characteristics of ice, under-ice water and sediments in the Razdolnaya River estuary (Amursky Bay, Sea of Japan) during ice cover period. *Biologiya morya*, 2010, vol. 36, no. 3, pp. 186–195. (in Russ.)]
5. Коновалова Г. В. Структура планктонного фитоценоза залива Восток Японского моря // *Биология моря*. 1984. № 1. С. 13–23. [Konovalova G. V. The structure of plankton phytocenosis of the Vostok Bay in the Sea of Japan. *Biologiya morya*, 1984, no. 1, pp. 13–23. (in Russ.)]
6. Коновалова Г. В., Орлова Т. Ю., Паутова Л. А. *Атлас морского фитопланктона Японского моря*. Ленинград : Наука, 1989. 160 с. [Konovalova G. V., Orlova T. Yu., Pautova L. A. *Atlas morskogo fitoplanktona Yaponskogo morya*. Leningrad : Nauka, 1989, 160 p. (in Russ.)]
7. Кузнецов Л. Л. Хлорофиллы и первичная продукция микроводорослей, связанных со льдом Амурского залива Японского моря // *Биология моря*. 1980. № 5. С. 72–74. [Kuznetsov L. L. Chlorophylls and primary production of microalgae connected with ice of the Amur Bay (Sea of Japan). *Biologiya morya*, 1980, no. 5, pp. 72–74. (in Russ.)]
8. Мельников И. А. *Экосистема арктического морского льда*. Москва : АН СССР, 1989. 192 с. [Mel'nikov I. A. *Ekosistema arkticheskogo morskogo l'da*. Moscow : AN SSSR, 1989, 192 p. (in Russ.)]
9. Мэгарран Э. *Экологическое разнообразие и его измерение*. Москва : Мир, 1992. 184 с. [Megarran E. *Ekologicheskoe raznoobrasie i ego izmerenie*. Moscow : Mir, 1992, 184 p. (in Russ.)]
10. Орлова Т. Ю., Стоник И. В., Шевченко О. Г. Флора микроводорослей планктона Амурского залива Японского моря // *Биология моря*. 2009. Т. 35, № 1. С. 48–61. [Orlova T. Yu., Stonik I. V., Shevchenko O. G. Flora of planktonic microalgae of Amursky Bay, Sea of Japan. *Biologiya morya*, 2009, vol. 35, no. 1, pp. 48–61. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.1134/S106307400901009X>
11. Пономарева А. А. *Структура и динамика фитопланктона в бухте Парис (залив Петра Великого, Японское море)* : дис. ... канд. биол. наук : 03.02.10. Владивосток : НИЦМБ ДВО РАН, 2017. 171 с. [Ponomareva A. A. *Struktura i dinamika fitoplanktona v bukhte Paris (zaliv Petra Velikogo, Yaponskoe more)* : dis. ... kand. biol. nauk : 03.02.10. Vladivostok : NNTsMB DVO RAN, 2017, 171 p. (in Russ.)]
12. Радченко И. Г., Капков В. И., Федоров В. Д. *Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона* : учебно-методическое пособие для студентов биологических специальностей университетов. Москва : Мордвинцев, 2010. 60 с. [Radchenko I. G., Kapkov V. I., Fedorov V. D. *Prakticheskoe rukovodstvo po sboru i analizu prob morskogo fitoplanktona* : uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov biologicheskikh spetsial'nostei universitetov. Moscow : Mordvintsev, 2010, 60 p. (in Russ.)]
13. Рябушко Л. И. Видовой состав, сезонная динамика плотности и биомассы диатомовых водорослей твёрдых грунтов верхней сублиторали залива Восток Японского моря // *Биология моря*. 1990. № 5. С. 3–11. [Ryabushko L. I. Species composition, seasonal dynamics of density and biomass of diatoms on hard rock in the upper sublittoral zone of Vostok Bay (Sea of Japan). *Biologiya morya*, 1990, no. 5, pp. 3–11. (in Russ.)]
14. Рябушко Л. И., Бегун А. А. *Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря* :

- в 2-х т. Симферополь ; Севастополь : Н. Орианда, 2015. Т. 1. 288 с. [Ryabushko L. I., Begun A. A. *Diatoms of Microphytobenthos of the Sea of Japan* : in 2 vols. Simferopol ; Sevastopol : N. Orianda, 2015, vol. 1, 288 p. (in Russ.)]
15. Рябушко Л. И. Состояние изученности микрофитобентоса Аргентинских островов Южного океана (Антарктика) // *Природная среда Антарктики: современное состояние изученности* : материалы II Международной научно-практической конференции, Нарочь, 18–21 мая 2016 г. Минск : Конфидо, 2016. С. 307–311. [Ryabushko L. I. Sostoyanie izuchennosti mikrofitobentosa Argentinskikh ostrovov Yuzhnogo okeana (Antarktika). In: *Prirodnaya sreda Antarktiki: sovremennoe sostoyanie izuchennosti* : materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Naroch, 18–21 May, 2016. Minsk : Konfido, 2016, pp. 307–311. (in Russ.)]
 16. Стоник И. В. Качественный и количественный состав фитопланктона бухты Золотой Рог Японского моря // *Известия ТИНРО*. 2018. Т. 194. С. 167–174. [Stonik I. V. Qualitative and quantitative composition of phytoplankton in the Golden Horn Bay, Japan Sea. *Izvestiya TINRO*, 2018, vol. 194, pp. 167–174. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-194-167-174>
 17. Шевченко О. Г., Тевс К. О., Шулькин В. М. Комплексный мониторинг фитопланктона в мелководной бухте залива Петра Великого (Японское море): динамика хлорофилла «а» и биогенных элементов // *Известия ТИНРО*. 2020. Т. 200, вып. 1. С. 141–154. [Shevchenko O. G., Tevs K. O., Shul'kin V. M. Integrated monitoring of phytoplankton in a shallow inlet of Peter the Great Bay (Japan Sea): Dynamics of chlorophyll *a* and nutrients. *Izvestiya TINRO*, 2020, vol. 200, iss. 1, pp. 141–154. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2020-200-141-154>
 18. Arrigo K. R., Brown Z. W., Mills M. M. Sea ice algal biomass and physiology in the Amundsen Sea, Antarctica. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2014, vol. 2, art. no. 000028 (15 p.). <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000028>
 19. *Biovolumes and Size-Classes of Phytoplankton in the Baltic Sea*. Helsinki : Helsinki Commission, 2006, 144 p. (HELCOM Baltic Sea Environment Proceedings ; no. 106).
 20. Campbell K., Mundy Ch. J., Belzile C., Delaforge A., Rysgaard S. Seasonal dynamics of algal and bacterial communities in Arctic sea ice under variable snow cover. *Polar Biology*, 2018, vol. 41, pp. 41–58. <https://doi.org/10.1007/s00300-017-2168-2>
 21. Dupont F. Impact of sea-ice biology on overall primary production in a biophysical model of the pan-Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, vol. 117, iss. S8, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1029/2011JC006983>
 22. Galindo V., Gosselin M., Lavaud J., Mundy Ch. J., Else B., Ehn J., Babin M., Rysgaard S. Pigment composition and photoprotection of Arctic sea ice algae during spring. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, vol. 585, pp. 49–69. <https://doi.org/10.3354/meps12398>
 23. Kauko H. M., Olsen L. M., Duarte P., Peeken I., Granskog M. A., Johnsen G., Fernández-Méndez M., Pavlov A. K., Mundy Ch. J., Assmy Ph. Algal colonization of young Arctic sea ice in spring. *Frontiers in Marine Science*, 2018, no. 5, art. no. 199 (20 p.). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00199>
 24. Leeuwe M. A. van, Tedesco L., Arrigo K. R., Assmy Ph., Campbell K., Meiners K. M. Microalgal community structure and primary production in Arctic and Antarctic sea ice: A synthesis. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2018, vol. 6, art. no. 4 (25 p.). <https://doi.org/10.1525/elementa.267>
 25. Leu E., Mundy Ch. J., Assmy Ph., Campbell K., Gabrielsen T. M., Gosselin M. Arctic spring awakening – Steering principles behind the phenology of vernal ice algal blooms. *Progress in Oceanography*, 2015, vol. 139, pp. 151–170. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.07.012>
 26. Okolodkov Y. B. Cryopelagic flora of the Chukchi, East Siberian and Laptev Sea. *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Biology*, 1992, vol. 5, pp. 28–43.
 27. Olsen L. M., Laney S. R., Duarte P., Kauko H. M., Fernández-Méndez M., Mundy Ch. J., Rösel A., Meyer A., Itkin P., Cohen L., Peeken I., Tatarek A., Róžańska-Pluta M., Wiktor J., Taskjelle T., Pavlov A. K., Hudson S. R., Granskog M. A., Hop H., Assmy Ph. The seeding of ice algal blooms in Arctic pack ice: The multiyear ice seed repository hypothesis.

- Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, vol. 122, iss. 7, pp. 1529–1548. <https://doi.org/10.1002/2016JG003668>
28. Niemi A., Michel C., Hille K., Poulin M. Protist assemblages in winter sea ice: Setting the stage for the spring ice algal bloom. *Polar Biology*, 2011, vol. 34, pp. 1803–1817. <https://doi.org/10.1007/s00300-011-1059-1>
29. Ratkova T. N., Wassmann P. Sea ice algae in the White and Barents seas: Composition and origin. *Polar Research*, 2005, vol. 24, no. 1–2, pp. 95–110. <https://doi.org/10.3402/polar.v24i1.6256>
30. Ryabushko L. I., Balycheva D. S., Bondarenko A. V., Zheleznova S. N., Begun A. A., Stonik I. V. Different aspects of studying a diatom *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann et Lewin 1964 in natural and laboratory conditions. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 52–62. <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.2.06>
31. Sun J., Liu D. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2003, vol. 25, iss. 11, pp. 1331–1346. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbg096>
32. Werner I., Ikävalko J., Schünemann H. Sea-ice algae in Arctic pack ice during late winter. *Polar Biology*, 2007, vol. 30, pp. 1493–1504. <https://doi.org/10.1007/s00300-007-0310-2>

QUANTITATIVE STRUCTURE OF THE SEA ICE MICROALGAE COMMUNITY (RUSSKY ISLAND, PETER THE GREAT BAY, SEA OF JAPAN)

E. A. Yurikova and A. A. Begun

A. V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation
E-mail: komicitykat@mail.ru

For the Russian coast of the Sea of Japan, a study of the quantitative structure of sea ice microalgae was carried out for the first time. The investigation covered biotopes of ice core and under-ice phytoplankton of two Russky Island bays during winter season of 2020 and 2021. In total, 88 microalgae species from 50 genera and 7 divisions were identified. As found, the ice microalgae flora was characterized by a greater species richness than the phytoplankton biotope. Out of prevailing species, the most abundant ones were planktonic diatoms *Chaetoceros socialis* f. *radians*, *Nitzschia frigida*, *Thalassiosira nordenskiöldii*, and *Nitzschia* sp. Diatoms formed the basis of the community. Specifically, in 2020, their abundance was 1,861.2 cells·mL⁻¹ in the Voevoda Bay and 751.2 cells·mL⁻¹ in the Novik Bay; in 2021, the values reached 6,846.3 and 17,143.1 cells·mL⁻¹, respectively. In 2020 in the Voevoda Bay, cell abundance was maximum in the upper layer of the ice core and gradually decreased closer to a border with under-ice water; in the Novik Bay, it was distributed approximately evenly throughout the core. In 2021 in the Voevoda Bay, the opposite pattern was observed: microalgae abundance was minimal in the upper layers of the ice core and gradually increased as moving down, to a border with under-ice water. In the Novik Bay, maximum microalgae abundance was recorded in the upper layer of the ice core, with a relatively uniform distribution over all layers. Thus, the differences are shown in the quantitative structure of ice microalgae depending on a layer of the ice core, year, and study area.

Keywords: quantitative structure, microalgae, phytoplankton, Peter the Great Bay, Russky Island, Sea of Japan