

МАССОВОЕ РАЗВИТИЕ МАКРОКОЛОНИЙ *MELOSIRA ARCTICA* НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА

Сапожников Ф.В.¹, Калинина О.Ю.², Рейхард Л.Е.¹, Соловьев Б.А.³,
Коуэн А.⁴, Фармер Л.⁴

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия,
e-mail: fil_aralsky@mail.ru, mollusc@mail.ru

²Географический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234, Россия,
e-mail: bio-energysu@mail.ru

³Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, 119071,
Россия, e-mail: solovyev.boris@gmail.com

⁴Polar Citizen Science Collective, Leicester, UK
e-mail: alex.cowan@cantab.net, lauren.e.farmer@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.08.2019, одобрена к печати 21.11.2019

В начале августа 2019 г. в районе Северного полюса, наблюдали массовое развитие сообществ ледовой флоры на поверхности многолетнего льда. Макроагрегаты из волокон толщиной 0.5–0.8 см, компактно переплетавшихся и формировавших мозговидные структуры размером до 10–15 см, имели бледно-розовую окраску и покрывали дно пресноводных луж-снежиц обширными полями. Агрегаты были сформированы диатомовыми таксоценозами на основе колоний *Melosira arctica*, их полимерного матрикса, а также еще 35 таксонов морских и солоноватоводно-морских диатомей, некоторые из которых также выполняли структурообразующие функции. С высокой вероятностью, развитие агрегатов происходило в точках протаивания вершин поровых каналов во льду, через которые осуществлялась подпитка губчатых сплетений альгоценозов соленой водой. Явление формирования и массового развития таких макроструктур описывается впервые.

Ключевые слова: Северный полюс, Арктика, ледовая флора, агрегаты микроорганизмов, диатомеи

Макроколонии центрической диатомеи *Melosira arctica* хорошо известны ученым, чьи темы исследований прямо или косвенно связаны с экосистемами морей Арктики (Полякова, 1988; Legendre et al., 1992; Gosselin et al., 1997). В летне-осенний период в некоторых районах арктических морей происходит массовое развитие этого вида. Как правило, явление связано со сплошными ледяными полями и, соответственно, охватывает определенные участки в пределах летних границ области плавучих льдов. Размножаясь в виде длинных цепочковидных колоний, клетки этой диатомеи способны формировать на нижней поверхности двухлетнего и многолетнего льда буро-зеленые пряди. Их длина может достигать полутора метров, а площадь, покрываемая такими макроструктурами, – сотен квадратных метров. До сих пор доподлинно не известно, какие факторы способствуют массовому развитию этого вида на «изнанке» плавучих льдин. Тем не менее, анализ вертикального

распределения микрофитов в толще двух- и многолетних льдов показывает, что *M. arctica* проникает по поровым каналам в глубину льда в крайне ограниченных количествах. В средних и верхних слоях толщи таких льдин, как правило, массово размножаются клетки подвижной диатомеи *Nitzschia frigida*, формирующие обильно ветвящиеся цепочковидные колонии и, зачастую, заполняющие по летнему времени эти каналы целиком – почти до самой верхней поверхности льда. Прочая диатомовая флора, ассоциированная с плавучими льдами и способная обильно развиваться как среди колоний *M. arctica*, как в нижней, так и в средней частях толщи льда, тоже доходит до области верхних ветвей поровых каналов. Но в незначительных количествах. Однако, речь идет о подвижных видах, имеющих приспособления для активной локомоции и способных самостоятельно достигать этого слоя за счет перемещения по твердым поверхностям. Случаи обнаружения центрических диатомей в верхней области ветвления поровых каналов крайне редки. Явления массового развития центрической диатомовой флоры на верхней поверхности плавучих льдов описаны: это происходит при растрескивании льда и напитывании морской водой нижнего слоя снега, покрывающего лед. С водой приходит и подледная флора, и фитопланктон – эти микрофиты начинают размножаться в намокшем и просоленном снегу. Кроме того, планктонная и подледная флора, включая *M. arctica*, способна развиваться в лужах-снежницах «melt ponds» открытого типа: в том случае, если эти лужи протаивают сквозь всю толщу льда и открываются в толщу морской воды (Lee et al., 2011). Для таких снежниц описано формирование макроагрегаций *M. arctica* в виде буро-охристых прядей на нижней поверхности льда, покрывающего сверху открытые, а потому осолоненные, лужи. На ледяном дне снежниц также были отмечены фрагменты агрегатов *M. arctica* – в основном деградирующие – в маленьких лунках, протаявших под ними (Fernandez-Mendez et al., 2014). В обоих вариантах наличие макроколоний было отмечено только в воде при солености, близкой к 30 ppt.

4 августа 2019 г., в ходе одного из туристических рейсов АЛ «50 лет Победы» в район Северного полюса, периодически осуществляемых в летний период, было отмечено явление массового развития макроколоний *M. arctica* на верхней поверхности многолетнего льда. Явление наблюдали примерно в двух милях от точки Северного Полюса, в лужах-снежницах с талой (пресной) водой, глубиной до 15–20 см (рис. 1А), а также на поверхности снега толщиной до 15 см (рис. 1Б, В), покрывавшего лед. При этом макроколонии были распределены по ледяному дну обширных луж относительно регулярно и области (поля), покрытые ими, достигали 10–20(30) м по наибольшей протяженности. Группа туристов, совершавшая пешие маршруты по льду с российскими и британскими гидами, зафиксировала присутствие таких пятен на расстояниях примерно 100–200 м друг от друга. Между полями пятен они наблюдали множество луж, в которых развития колоний отмечено не было.

Заслуживают отдельного рассмотрения сам характер макроколоний, их макроморфология, а также пространственная организация этих агрегатов на уровне особенностей микроструктуры. В отличие от массивных «парусообразных»

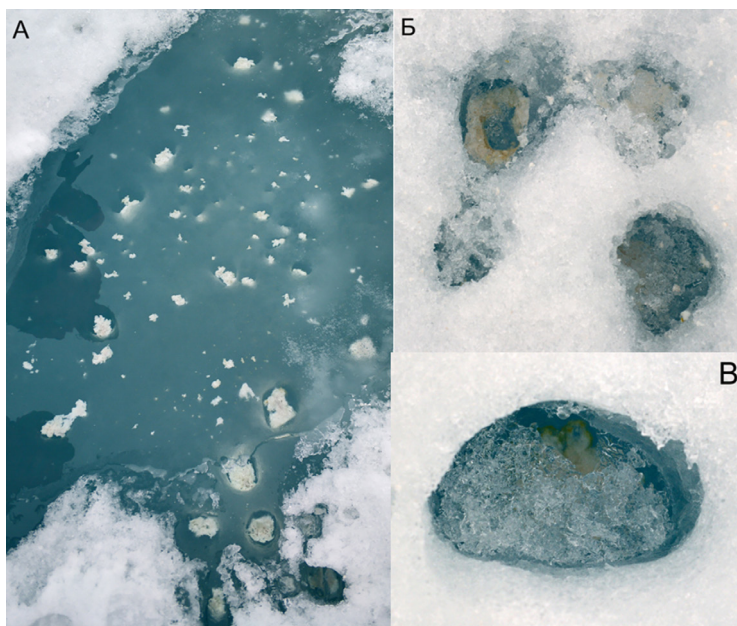


Рис. 1. Внешний вид макроагрегатов ледовой флоры, сформировавшихся на ледяном дне луж-снежниц (А) и в тонком слое снега, покрывавшего лёд (Б, В).

и прядевидных макрообразований, развивающихся на нижней поверхности льда, колонии *M. arctica* на дне ледяных луж имели форму волокон бледно-розового цвета, толщиной до 0,5-0,8 см, густо переплетавшихся между собой и формировавших мозговидные макроструктуры до 10–15 см по наибольшей оси (рис. 2А). И на льду, и на снегу макроколонии располагались в лунках, протаявших, с высокой вероятностью, за счёт изменения альбедо вокруг макроколоний в процессе их

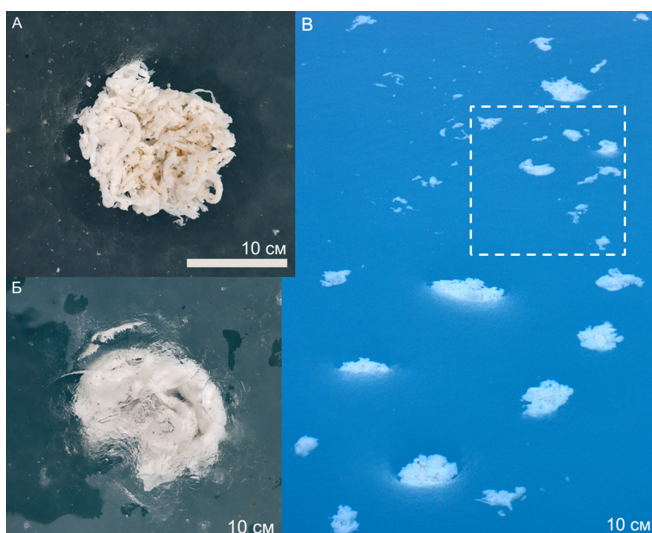


Рис. 2. Агрегаты ледовой флоры, сформированные на основе колоний *M. arctica* и выделяемого ими экзополимерного матрикса: (А) мозговидная структура, образованная переплетением волокон макроколоний, (Б) крупный агрегат в лунке, под пленкой новообразованного льда, (В) группа мелких агрегатов (выделена пунктиром), развивающихся среди крупных и покрытых сверху тонким слоем льда.

роста, а также в результате накопления тепла самими колониями в ходе активных биохимических реакций, сопровождающих массовое развитие диатомей. Некоторые лунки с крупными колониями покрывал сверху тонкий слой новообразованного льда (рис. 2Б), но в большинстве из них агрегаты лежали открыто. Между крупными агрегатами отмечали присутствие более мелких и совсем маленьких, погружённых в лунки подобающих размеров и прикрытых сверху тонкой ледяной корочкой (рис. 2В). Оценочная биомасса колоний могла достигать в местах массовых скоплений нескольких сотен граммов на 1 м². Это утверждение базируется, во-первых, на плотности диатомовых макроколоний вместе с их полимерным матриксом, превышающей для большинства видов, включая *M. arctica*, 1 г/см³, благодаря чему они тонут в морской воде. Во-вторых, визуальная оценка площади проективного покрытия агрегатов на 1 м², сделанная по снимкам, и их толщины, достигающей 3–4 см, позволяет примерно оценить их биомассу с учетом плотности.

Макроколонии были отобраны для анализа ручным методом, с использованием резиновых перчаток, максимально бережно, чтобы избежать повреждения их пространственной организации. Материал отбирали в трех разных снежниках, заключали в банки ПЭТ и фиксировали на месте 70%-ным раствором этанола, после чего хранили в тёмном ящике до привоза в Москву.

Микроскопирование материала макроколоний, доставленных из снежниц с пресной водой, было осуществлено в ИО РАН, на сырых и постоянных препаратах, с помощью световых микроскопов Leica DMLS и Leica DM 2500 (на втором производили и фотодокументирование микроструктур), при увеличениях 400х и 1000х.

В общей сложности для агрегатов на разных стадиях развития было отмечено присутствие 36 видов и подвидов диатомей (табл. 1). Исследования позволили установить, что агрегаты находились, как минимум, на двух стадиях развития: среди них были отмечены молодые и стареющие. Так, микроскопические наблюдения молодых агрегатов показали картину распределения обилий видов диатомей, отличную от таковой для стареющих (табл. 1).

Таблица 1. Структура диатомовых таксоценов, образовавших макроагрегаты на основе колоний *M. arctica* на дне мелководных пресных снежниц

Виды и подвиды диатомей	Молодые агрегаты	Стареющие агрегаты
	Статус обилия	
<i>Attheya longicornis</i>	нет	часто
<i>Attheya septentrionalis</i>	часто	редко
<i>Craspedostauros alyoubii</i>	массовый	единично
<i>Entomoneis gigantea</i>	редко	часто
<i>Entomoneis kjellmannii</i> var. <i>striolata</i>	нет	редко
<i>Entomoneis kjellmannii</i> var. <i>subtilis</i>	редко	часто
<i>Entomoneis paludosa</i> var. <i>hyperborea</i>	часто	доминант

<i>Entomoneis paludosa</i> var. <i>salinicola</i>	редко	доминант
<i>Fossula arctica</i>	часто	редко
<i>Fragilariopsis cylindrus</i>	единично	часто, колониями
<i>Hantzschia weyprechtii</i>	редко	единично
<i>Haslea spicula</i>	нет	редко
<i>Melosira arctica</i>	доминант	доминант
<i>Melosira arctica</i> var. <i>krembsii</i>	редко	массовый
<i>Navicula criophila</i>	нет	редко
<i>Navicula directa</i>	часто	редко
<i>Navicula gelida</i> var. <i>gelida</i>	часто	массовый
<i>Navicula kariana</i> var. <i>frigida</i>	часто	часто
<i>Navicula septentrionalis</i>	нет	часто
<i>Navicula sibirica</i>	часто	часто
<i>Nitzschia arctica</i>	редко	редко
<i>Nitzschia distans</i> var. <i>erratica</i>	часто	единично
<i>Nitzschia frigida</i>	часто	массовый
<i>Nitzschia fusiformis</i>	нет	часто
<i>Nitzschia lecontei</i>	редко	редко
<i>Nitzschia longissima</i>	часто	часто
<i>Nitzschia polaris</i>	часто	часто
<i>Nitzschia taeniiformis</i>	нет	часто
<i>Nitzschia neofrigida</i>	часто, колониями	нет
<i>Pauliella taeniata</i>	редко	редко
<i>Pseudogomphonema kamtschaticum</i>	редко	единично
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	редко	редко
<i>Shionodiscus gracilis</i> var. <i>expectus</i>	редко	редко
<i>Stauroneis radissonii</i>	редко	единично
<i>Synedropsis hyperborea</i>	доминант	доминант
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	редко	редко

На обеих стадиях основным структурообразующим элементом агрегатов были цепочки *M. arctica* (рис. 3). Вторым доминантом была бесшовная диатомея *Synedropsis hyperborea*, обильно размножавшаяся в тяжах экзополимеров, выделяемых колониями *Melosira*. Также эти тяжи, являвшие собой, по сути, матрикс агрегатов, были напитаны микроскопическими каплями масла, оставшегося после отмирания клеток *M. arctica*, и часто населены гетеротрофными бактериями – тем не менее, не создававшими здесь обильных колоний.

Отличие молодых агрегатов от стареющих просматривалось по нескольким основным структурным признакам.

Во-первых, в структуре молодых на долю вегетативных клеток *M. arctica* приходилось 45–53% от общей численности клеток диатомей, и только 7–11% составляли покоящиеся соры. При этом ауксоспоры встречались лишь единично.

В стареющих агрегатах вегетативные клетки *M. arctica* составляли уже только 32–36%, доля спор была выше (18–25%), и аукоспоры попадались существенно чаще (до 3% общего обилия таксоцены).

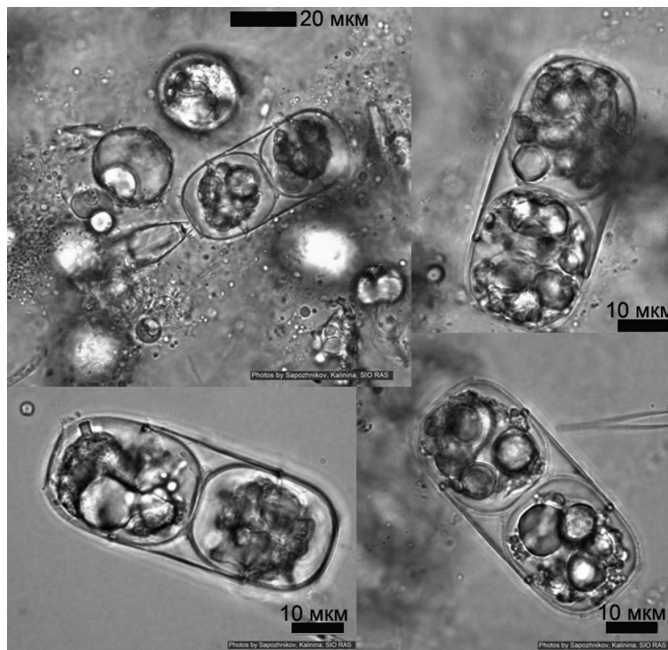


Рис. 3. Двухклеточные звенья цепочковидных колоний *M. arctica*. Клетки были отсняты в пробе, зафиксированной 96% раствором этанола для транспортировки в Москву, в связи с чем их содержимое отделено от стенок, но хорошо видны крупные капли масла.

Во-вторых, на поздней стадии развития агрегатов клетки *Entomoneis paludosa* var. *hyperborea*, *E. paludosa* var. *salinicola* и *E. gigantea* встречались значительно чаще, чем на ранней, и первые два вида вошли в группу структурообразующих (доминантов), формируя густые скопления клеток среди цепочек *M. arctica*.

В-третьих, на поздней стадии, внутри панцирей крупных видов *Entomoneis*, благодаря деятельности сапротрофных бактерий-кальцификаторов, в массе формировались многоскладчатые сферолиты кальцитов (рис. 4А), предположительно в форме арагонита. Также образование кальцитов было отмечено на этой стадии – в массе – и внутри панцирей *Nitzschia frigida*, но уже в форме игловидных монокристаллов, заполнявших панцирь целиком (рис. 4Б).

Все виды диатомей, формировавших агрегаты, относились к числу морских и солоноватоводно-морских. При этом измерения, сделанные на разных пробах воды из снежниц, показали уровень солености близкий к нулю (согласно данным А. Коуэна и Л. Фармер, а также результатам измерений, сделанных в Институте водных проблем РАН). Соответственно, развиваясь в снежницах с пресной водой, изученные макроагрегаты должны были получать подпитку соленой водой.

Мы провели анализ фотоснимков агрегатов, сделанных на месте их роста, а также лунок вокруг них и отдельных отверстий на дне луж-снежниц. Это позволило прийти к версии, что колонии развивались на протаявших сверху вершинах поро-

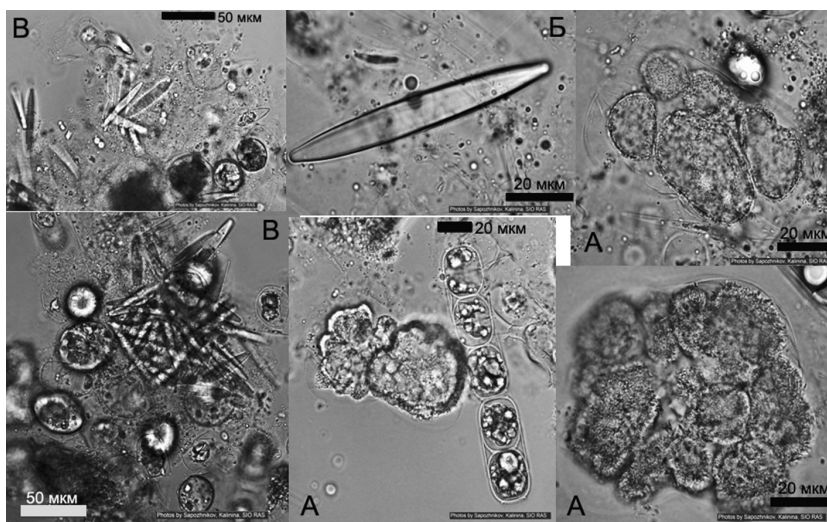


Рис. 4. Образование кристаллов кальцитов внутри панцирей пеннатных (перистых) диатомей, участвующих в формировании агрегатов ледовой флоры: (А) складчатые сферолиты кальцита (предположительно в форме арагонита) внутри панцирей *Entomoneis* spp., (Б) монокристалл кальцита внутри панциря *Nitzschia frigida*, (В) групповые скопления кристаллов кальцита, каждый из которых сформировался в отдельном панцире *N. frigida*.

вых каналов, пронизывающих лед. Глубина снежниц (около 20 см) позволяет предположить, что верхняя толща многолетнего льда на месте их образования протаяла до глубины залегания верхних ветвей поровых каналов, в которых вполне могли находиться сообщества ледовой диатомовой флоры. Наконец, растущие «мозговидные» макроколонии *M. arctica*, плотно «укутанные» выделяемым ими экзополимерным матриксом – это, по сути, губки, способные хорошо удерживать морскую воду.

Таким образом, начиная свой рост на открывшихся (протаявших) вершинах поровых каналов, диатомовые агрегаты формировали свою устойчивую внутреннюю среду, защищенную от пресной воды экзополимерами *M. arctica*, и успешно развивались при избытке света, подпитываясь снизу солёной водой через поровые каналы. При образовании колоний в лунках на снегу мы наблюдаем, по сути, пролонгированную форму того же явления: здесь колонии, начав рост на вершинах каналов, постепенно прорастали сквозь небольшую толщу снега, а затем, оказавшись близко к его поверхности, переходили к фазе активного роста и формировали макроагрегаты.

Явление развития таких «мозговидных» макроагрегатов морских сообществ диатомовой ледовой флоры в пресноводных снежницах на льду Высокой Арктики описано нами впервые. В мировой литературе к настоящему времени отсутствовали указания на развитие таких структур для ледовых микрофитов. Согласно свидетельствам ветеранов полярных экспедиций, бывших на АЛ «50 лет Победы» в день обнаружения явления, они не наблюдали ничего подобного никогда прежде. Поскольку явление носило массовый характер и простиралось на большие площади (как минимум, десятки квадратных км), его можно рассматривать как новую, неизвестную ранее, особенность поведения арктической ледовой экосистемы.

Авторы выражают благодарность гляциологу, сотруднику Отдела ледового режима и прогнозов (ОЛРиП) ФГБУ ААНИИ, С.С. Сероветникову, участвовавшему в маршрутах по льду и давшему подробное описание ледовой обстановки в районе обнаружения явления. Согласно его наблюдениям, многолетний лед, на протаявшей поверхности которого развивались макроагрегаты (формы льда: 2–3–4 (2–20 м, 20–100 м, 100–500 м), толщины: 160–180 см (3 балла), 180–200 см (2 балла), 200–220 см (0.5 балла), 240–260 см (0–5 балла)) предположительно был сформирован в восточной и центральной частях Восточно-Сибирского моря. В подтверждение этой версии говорит соседство с большим массивом старых, сильно деформированных льдов прибрежной генерации, несущих на себе результаты речного выноса (песок, палки, ветки, бочки). Данный массив находился на 30 миль южнее зоны высадки и имел характерные размеры 40×60 миль.

Авторы также выражают благодарность оператору рейса – компании Poseidon Expeditions за содействие в проведении исследования.

Исследования ИО РАН выполнены в рамках темы государственного задания №0128-2019-0011.

Литература

- Полякова Е.И.* Диатомеи арктических морей СССР и их значение при исследовании донных осадков // *Океанология*. 1988. Т. 28. № 2. С. 286–291.
- Gosselin M., Levasseur M., Wheeler P.A., Horner R.A., Booth B.* New measurements of phytoplankton and ice algae production in the Arctic Ocean // *Deep-Sea Res.* 1997. Vol. 44. P. 1623–1644.
- Legendre L., Ackley S.F., Dieckmann G.S., Gulliksen B., Horner R., Hoshiai T., Melnikov I.A., Reeburgh W.S., Spindler M., Sullivan C.W.* Ecology of sea ice biota. 2. Global significance // *Polar Biol.* 1992. Vol. 12. P. 429–444.
- Lee S.H., McRoy C.P., Joo H.M., Gradinger R., Cui X., Yun M.S., Chung K.H., Kang S.-H., Kang C.-K., Choy E.J., Son S., Carmack E., Whitley T.E.* Holes in progressively thinning Arctic sea ice lead to new ice algae habitat // *Oceanography*. 2011. Vol. 24. No. 3. P. 302–308. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2011.81>.
- Fernandez-Mendez M., Wenzhofer F., Peeken I., Sørensen H.L., Glud R.N., Boetius A.* Composition, Buoyancy Regulation and Fate of Ice Algal Aggregates in the Central Arctic Ocean // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. No. 9. e107452. DOI: 10.1371/journal.pone.0107452.

MASS MACROCOLONIES *MELOSIRA ARCTICA* FORMING ON THE SURFACE OF ICE IN THE NORTH POLE AREA

Sapozhnikov Ph.V.¹, Kalinina O.Yu.², Reichard L.E.¹,
Solovjov B.A.³, Kowan A.⁴, Farmer L.⁴

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: fil_aralsky@mail.ru, mollusc@mail.ru*

²*Faculty of Geography Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234, Russia,
e-mail: bio-energysu@mail.ru*

³*Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071,
Russia, e-mail: solovyev.boris@gmail.com*

⁴*Polar Citizen Science Collective Leicester, UK
e-mail: alex.cowan@cantab.net, lauren.e.farmer@gmail.com*

Submitted 15.08.2019, accepted 21.11.2019

In early August 2019, in the area of the North Pole, a massive development of ice flora communities on the surface of perennial ice was observed. Macroaggregates of fibers with a thickness of 0.5–0.8 cm, compactly intertwined and forming “brain-like” structures up to 10–15 cm in size, had a pale pink color and covered the bottom of freshwater puddles with extensive fields. The aggregates were formed by diatom taxocenoses based on the colonies of *Melosira arctica*, their polymer matrix, as well as another 35 taxa of marine and brackish-marine diatoms, some of which also performed structure-forming functions. With high probability, the development of aggregates occurred at the thawing points of the tops of the pore channels in the ice, through which the spongy plexuses of the algal communities were fed with salt water. The phenomenon of formation and mass development of such macrostructures is described for the first time.

Keywords: North Pole, Arctic, ice flora, microorganisms aggregates, diatoms

References

- Polyakova E.I.* Diatomei arcticheskikh morei SSSR i ih znachenie pri issledovanii donnyh osadkov. *Oceanology*, 1988, Vol. 28, No. 2, pp. 286–291.
- Gosselin M., Levasseur M., Wheeler P.A., Horner R.A., and Booth B.* New measurements of phytoplankton and ice algae production in the Arctic Ocean. *Deep-Sea Res.*, 1997, Vol. 44, pp. 1623–1644.
- Legendre L., Ackley S.F., Dieckmann G.S., Gulliksen B., Horner R., Hoshiai T., Melnikov I.A., Reeburgh W.S., Spindler M., and Sullivan C.W.* Ecology of sea ice biota. 2. Global significance. *Polar Biol.*, 1992, Vol. 12, pp. 429–444.
- Lee S.H., McRoy C.P., Joo H.M., Gradinger R., Cui X., Yun M.S., Chung K.H., Kang S.-H., Kang C.-K., Choy E.J., Son S., Carmack E., and Whitedge T.E.* Holes in progressively thinning Arctic sea ice lead to new ice algae habitat. *Oceanography*, 2011, Vol. 24, No. 3, pp. 302–308, doi:10.5670/oceanog.2011.81.
- Fernandez-Mendez M., Wenzhofer F., Peeken I., Sørensen H.L., Glud R.N., and Boetius A.* Composition, Buoyancy Regulation and Fate of Ice Algal Aggregates in the Central Arctic Ocean. *PLoS ONE*, 2014, Vol. 9, No. 9, pp. 302–308, doi:10.1371/journal.pone.0107452.