

МИКРОВОДОРОСЛИ И ГЕТЕРОТРОФНЫЕ БАКТЕРИИ ЛЬДА И ПОДЛЕДНОЙ ВОДЫ: УСЛОВИЯ ИХ РАЗВИТИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ ОСТРОВА САХАЛИН

Т.А. Могильникова, А.В. Полтева, Е.М. Латковская, А.В. Леонов,
С.А. Покрашенко, В.М. Пищальник

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются особенности развития и условий обитания микроводорослей и сапрофитных гетеротрофных бактерий льда, подледной воды у побережья о. Сахалин в Охотском море. Исследованы химические характеристики морского льда и воды в период исследований с февраля по март 2006 г. Обсуждаются состав доминирующих видов, вертикальное и горизонтальное распределение численности микроводорослей и гетеротрофных организмов подледной воды и льда.

В толще льда в бухте Лососей (зал. Анива) наблюдается увеличение концентраций нитратного азота и кремния и уменьшение количества минерального фосфора, нитритного и аммонийного азота с февраля по март. В подледной воде также, к марту снижаются уровни нахождения $N-NO_3^-$ и Si, а количество $N-NO_2^-$, $P-PO_4^{3-}$, $N-NH_4^+$ — возрастает. В зал. Мордвинова к середине марта, по сравнению с его началом, в ледовом припае увеличиваются концентрации $N-NO_3^-$, $P-PO_4^{3-}$ и Si и уменьшаются $N-NO_2^-$ и $N-NH_4^+$.

Максимальная численность сапрофитных гетеротрофных бактерий во льду была приурочена к нижним слоям. Значения численности были порядка 10^3 и 10^6 кл./мл. В подледной воде в зал. Анива численность этой группы микроорганизмов превосходила на порядок таковую в нижнем слое льда, в зал. Мордвинова была на том же уровне.

Сообщество микроводорослей в припайных льдах представляли, в основном, центрические виды рода *Thalassiosira*, и пеннатные диатомовые, в основном *Fragilariopsis cylindrus* (Grun.) Krieger. Отмечено преобладание численности микроводорослей в нижнем слое льда: до $5,8 \times 10^5$ в феврале в бухте Лососей и до $1,3 \times 10^6$ кл./л в марте в зал. Мордвинова при низкой численности в подледной воде. В нижней части дрейфующего льда на северо-восточном шельфе в январе доминировала *Nitzschia frigida* Grun. (при численности $2,2 \times 10^6$ кл./л). В подледной воде доминировали центрические диатомовые *Porosira glacialis*, *Thalassiosira* spp.

ВВЕДЕНИЕ

Гидрохимическая структура прибрежных и шельфовых вод Сахалина изучена довольно подробно (Гидрометеорология, 1993; Комплексные исследования, 1997; Пищальник и др. 2000; и др.). Однако информации по химической структуре подледной воды, а также льда в прибрежных районах о. Сахалин практически нет. Трансформации химического состава льда в процессе его образования и таяния уделяется большое внимание в связи с влиянием на формирование подледного развития микроводорослей и других организмов (Иванов, 1998; Мельников и др, 2005; Okolodkov, 1996; и др.).

Исследования по динамике микроводорослей и гетеротрофных бактерий дальневосточных морей, главным образом, относятся к теплым сезонам (Дзюбан, 2003; Флинт и др., 2003). Особенности развития микрогетеротрофов (водорослей и бактерий) в ледовый период остаются, как правило, мало изученными, сведения о них по Охотскому морю фрагментарны (Иванов, 1998).

Гетеротрофные сообщества описаны для льдов арктических морей (Биология Центрального Арктического..., 1980; Smith *et al.*, 1989; Михайловский и др., 1989; Мельников, 1989; Житина и др., 1990; Okolodkov, 1990, 1992; Мельников и др., 2003, 2005; Сажин и др., 2004; Ratkova *et al.*, 2005; и др.) и Антарктики (Garrison *et al.*, 2003; Garrison *et al.*, 2005; и др.).

Приведенные в литературе некоторые результаты исследований в Охотском и Японском морях отражают особенности развития фитопланктона и бактерий в подледной воде и в открытой воде у кромки льда. Факт интенсивного развития водорослей зимой, установленный по спутниковым наблюдениям распределения концентраций хлорофилла «а» в водах зал. Анива в Охотском море, подтвердился результатами экспедиционных наблюдений (Леонов и др., 2007). Признаки весеннего цветения микроводорослей в Охотском море в марте наблюдали у кромки льда в районе юго-западного побережья Камчатки (Шунтов, 2001). Ранее был известен факт вегетации микроводорослей в подледной воде в морской лагуне Буссе зал. Анива (Колганова, 1980; Колганова и др., 1987). Подобное явление, выраженное в более яркой форме в виде подледного «цветения» фитопланктона в январе — начале февраля, а затем последовательно бактерий, простейших и флагеллят, описано для Амурского залива Японского моря (Коновалова, 1980). Явления зимнего «цветения» фитопланктона наблюдалось и в других заливах и бухтах Японского моря (Коновалова, 1984, 1988; Морозова и др., 2005).

В функционировании водных экосистем гетеротрофные бактерии, микроводоросли играют важнейшую роль. Они служат источником питания для организмов более высоких трофических уровней. Другая их функция состоит в преобразовании органических и минеральных веществ природного и антропогенного происхождения. Минерализация органического вещества бактериями обеспечивает непрерывное поступление в водную среду минеральных питательных веществ, которые поддерживают развитие планктонного сообщества.

Цель данной работы — выявление особенностей развития микроводорослей и гетеротрофных бактерий в ледовый период в прибрежных акваториях о. Сахалин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы для исследования были получены при анализе проб подледной воды и льда, собранных в феврале—марте 2006 г. (Пищальник и др., 2009; см. наст. сборник с. 185—197). Пробы отбирались в прибрежной зоне с припайного льда в бухте Лососей зал. Анива (вблизи устья небольшого ручья у пос. Первая Падь) и в зал. Мордвинова в 3 км к востоку по побережью от пос. Охотское (табл. 1, цв. ил. 8 на стр. 219). В районе бухты Лососей и в зал. Мордвинова станции отбора проб располагались на разрезе от берега (ст. 1) к морю (ст. 3).

Дополнительно была отобрана одна проба микроводорослей припайного льда на морском побережье вблизи устья р. Большая Хузи (у пос. Пограничное), а

также проба дрейфующего льда на северо-востоке и проба воды между льдами с судна (табл. 1, цв. ил. 8 на стр. 219).

На припае пробы льда отбирались кольцевым буром с внешним диаметром 15 см. Полученный керн (диаметром 12 см) делился на три равные части: верхний, средний, нижний. В тонком льду для получения достаточного для проведения анализа количества материала выбуривалось 6—8 кернов на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга. Пробы льда упаковывались в стерильные целлофановые пакеты и в термобоксах транспортировались в лабораторию. В лаборатории пробы льда оставались герметично закрытыми до полного оттаивания при комнатной температуре.

Отбор пробы дрейфующего льда с судна производился при помощи сачка с длинной ручкой. От куска льдины ножовкой отпиливали нижнюю ее часть (8—10 см).

Температура, соленость и pH морской воды на припае определялась с помощью портативного зонда YSI-63 (производство США). Остальные виды анализов выполнялись в лабораторных условиях. Пробы фильтровались через стекловолокнистые фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. В фильтрате определялось содержание биогенных веществ, фильтр с осадком использовался для определения хлорофилла «а». Анализ проводился по общепринятым методикам (Руководство, 1977; РД 52.10.243-92; Руководство, 2003). Оптическая плотность определялась на СФ-56.

Результаты определения минеральных форм азота приведены в пересчете на азот. Метод определения аммонийного азота ($N-NH_4^+$) основывался на реакции аммиака в щелочном растворе с избытком гипохлорита с образованием монохлорамина, который в присутствии фенола и иона нитропруссиды дает индофеноловый голубой (метод Сэджи-Солорзано). Оптическая плотность измерялась при длине волны 630 нм. Метод определения нитритного азота ($N-NO_2^-$) основывался на диазотировании содержащихся в воде нитритов сульфаниловой кислотой при последующем взаимодействии образовавшегося диазосоединения с α -нафтиламином (реактив Грисса-Илосвая). Оптическая плотность измерялась при длине волны 543 нм. Для определения нитратного азота ($N-NO_3^-$) применялся метод восстановления нитратов до нитритов при прохождении пробы через омедненный мелкокристаллический кадмий. После пропускания морской воды через редуктор определялась сумма нитратов и нитритов (с реактивом Грисса-Илосвая). Для определения минерального фосфора ($P-PO_4^{3-}$) использовали метод Морфи-Райли, с применением молибдата аммония и аскорбиновой кислоты. Оптическая плотность измерялась при длине волны 885 нм. Метод определения содержания кремния (Si) в воде основан на восстановлении желтого кремнемолибденового комплекса до голубого аскорбиновой кислотой. Оптическая плотность измерялась при длине волны 810 нм. Концентрация хлорофилла «а» определялась спектрофотометрическим методом после экстракции пигментов в 90% растворе ацетона.

Пробы подледной воды для исследования бактерий отбирались стерильным фторопластовым пробоотборником со стерильной стеклянной емкостью объемом 1 л. Численность гетеротрофных микроорганизмов определялась на рыбопептонном бульоне (г. Оболенск), разведенном в 10 раз морской водой. Для определения численности гетеротрофных микроорганизмов использовались методические приемы в соответствии с опубликованными

рекомендациями (Руководство..., 1980). Для приготовления сред использовали выдержанную в течение полугода в темноте профильтрованную морскую воду.

Оттаивание льда производилось в полиэтиленовой емкости при комнатной температуре. Вода после оттаивания льда для изучения микроводорослей фиксировалась раствором Утермеля из расчета 1,5—2,5 мл на 1 л воды. Для изучения фитопланктона отбиралась порция воды объемом 1,3—1,5 л, которая также фиксировалась раствором Утермеля. Микроводоросли концентрировались методом обратной фильтрации с помощью специальной воронки и ядерных мембранных фильтров с диаметром пор 1,0—3,0 мкм. Проба концентрировалась до объема 30—40 мл, затем в зависимости от плотности осадка отстаивалась до объема 1—20 мл (Федоров, 1970; Руководство..., 1990). Подсчет клеток и идентификация видов проводилась на бинокулярном световом микроскопе МБИ-15-2 производства ЛОМО при увеличении в 320—1600 раз. Подсчет клеток проводился в камере Нажотта объемом 0,055 мл или 1 мл.

Таблица 1. Перечень проб льда и подледной воды

Мест отбора проб	Дата	Вид пробы				Удаление от берега в припае, м
		Номер точки (станция)*	Кол-во слоев льда	Толщина льда, см	Кол-во горизонтов в воде	
Бух. Лососей, (припайный лед) район пос. Первая Падь	21.02.06	1 (г, м)*	3	40	1	5
		2(г, м, б)*	3	37	1	25
		3 (г, м)*	3	36	1	100
	15.03.06	1 (г, м)*	3	95	1	3
		2(г, м)*	3	96	2	25
		3 (г, м)*	3	97	2	50
Зал. Мордвинова (припайный лед)	05.03.06	1 (г, м)*	3	40	1	20
		2(г, м, б)*	3	39	2	100
		3 (г, м)*	3	38	1	150
	16.03.06	2 (г, м)*	3	78	2	100
	16.03.06	м	—	—	1	150
Северо-восточный шельф о. Сахалин (дрейфующий лед)	02.01.06	м	1 (нижняя часть керна — 8 см)	17	—	—
Вблизи устья р. Большая Хузи (район пос. Пограничное)	15.03.06	м	3	30	—	100
Юго-восточный шельф о. Сахалин (вода между льдинами)	19.04.06	м	—	—	1	—
Примечание: * «г» — гидрохимические исследования, «м» — микроводоросли, «б» — гетеротрофные бактерии.						

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимические особенности

21 февраля 2006 г. в бух. Лососей (зал. Анива) температура поверхностного слоя подледной воды колебалась от $-1,5$ до $-1,0^{\circ}\text{C}$, колебания рН были в пределах 8,09—8,30 ед. Соленость воды была одинакова на всех станциях и составляла 31,2‰. Содержание растворенного кислорода изменялось в пределах 10,68—11,04 мг/дм³, максимум фиксировался на мористой ст. 3.

Содержание биогенных веществ по станциям заметно различалось. Максимальные значения минерального фосфора и аммонийного азота отмечены на мористой ст. 3, а кремния, хлорофилла «а» и нитратов — на прибрежной ст. 1.

Содержание минеральных форм биогенных веществ в кернах льда различалось как по станциям, так и по слоям керна. В верхнем слое льда отмечены минимальные концентрации хлорофилла «а» и биогенных веществ за исключением нитратов — их минимум был зафиксирован в среднем слое льда. Максимальные значения концентраций биогенных веществ отмечены в среднем слое, а хлорофилла «а» — в нижнем (рис. 1). Сравнение концентраций изученных соединений в нижнем (приводном) слое льда и в подледной воде показало, что вода обогащена кремнием, а лед — хлорофиллом «а». Содержание остальных показателей в указанных средах было сопоставимым.

Через 22 дня (15 марта) в бух. Лососей температура поверхностного слоя подледной воды колебалась от $-1,5$ до $+0,2^{\circ}\text{C}$, значения рН были в пределах 7,06—8,70 ед. Соленость воды изменялась от 0,6‰ (поверхность, ст. 1) до 31,5‰ (дно, ст. 3), возрастая ко дну на всех станциях.

Содержание биогенных веществ в воде значительно различалось как по горизонтам, так и по станциям. Так, в поверхностном горизонте содержание нитритного азота и хлорофилла «а» увеличивалось по мере удаления от береговой черты, Si — уменьшалось. Содержание P-PO₄³⁻ незначительно возрастало от ст. 1 к ст. 2, а затем уменьшалось к ст. 3. Концентрации нитратного и аммонийного азота уменьшались от ст. 1 к ст. 2, а затем возрастали к ст. 3.

Вертикальное распределение биогенных веществ и хлорофилла «а» в воде было неоднородным. Среднее содержание биогенных веществ было выше у поверхности, хлорофилла «а» — у дна.

Соленость льда возрастала на разрезе от берега к морю и варьировала от 0,1—0,2‰ на береговой ст. 1 до 1,9—2,5‰ на самой мористой ст. 3 (в среднем по разрезу 1,2‰). Т.е., на ст. 1 лед формируется под сильным действием стока близлежащего ручья. Во всех слоях керна льда содержание биогенных веществ было минимальным на береговой станции, за исключением концентрации Si в верхнем его слое. В целом, в распределении нитратного азота характерно возрастание концентраций к поверхности льда, нитритного — наоборот, к нижнему слою (рис. 1). Количество кремния и аммонийного азота максимально в верхнем слое керна, минимально в среднем. Уровень содержания минерального фосфора был максимальным в среднем слое, минимальным — в нижнем.

Сравнение химических параметров нижнего слоя льда и поверхности подледной воды показало, что вода обогащена Si и N-NO₃⁻, а лед — N-NH₄⁺. Содержание N-NO₂⁻ и P-PO₄³⁻ было на одном уровне.

В целом, в сезонном распределении биогенных веществ в бух. Лососей наблюдались следующие закономерности. По сравнению с февралем в марте в поверхностном слое воды среднее количество нитритного азота увеличивалось с 1,1 до 5,8 мкг/дм³ (более чем в 5 раз), аммонийного азота — с 94 до 120 мкг/дм³, минерального фосфора — с 39 до 78 мкг/дм³, хлорофилла — с 0,38 до 0,60 мкг/дм³. Концентрации нитратного азота и кремния, наоборот уменьшались с февраля по март — с 184 до 122 мкг/дм³ и с 4244 до 3306 мкг/дм³, соответственно. В прибрежной зоне Белого моря также отмечено уменьшение кремния в течение зимы и возрастание концентраций минерального фосфора с февраля по март (Мельников и др., 2005).

Во всех слоях льда наблюдалось увеличение среднего количества нитритного азота от февраля к марту (в верхнем слое от 0,51 до 6,92 мкг/дм³, в среднем — от 2,27 до 6,45 мкг/дм³, в нижнем — от 1,93 до 7,95 мкг/дм³). Весной также возрастали концентрации минерального фосфора во всей толще льда (от 19 до 85 мкг/дм³ в верхнем слое, от 37 до 93 мкг/дм³ в среднем и от 25 до 77 мкг/дм³ в нижнем). Содержание аммонийного азота к 15 марта увеличивалось в верхнем и нижнем слое (с 77 до 173 мкг/дм³ и с 120 до 163 мкг/дм³, соответственно) и мало изменилось в среднем (138 мкг/дм³ 21 февраля и 122 мкг/дм³ 15 марта). Уровень нахождения нитратного азота и кремния во всех слоях льда уменьшался к 15 марта. Так, концентрации N-NO₃⁻ снижались с 165 до 121 мкг/дм³ в верхнем слое, с 118 до 84 мкг/дм³ в среднем и с 137 до 55 мкг/дм³ в нижнем. Количество кремния снижалось еще больше — в верхнем слое с 926 до 381 мкг/дм³, в среднем — с 1158 до 288 мкг/дм³, в нижнем — с 977 до 341 мкг/дм³.

В зал. Мордвинова 5 марта 2006 г. температура поверхностного слоя подледной воды менялась от -1,5 до -1,1°C, а значения pH — от 7,86 до 7,90 ед. Распределение концентраций нитратов, нитритов и кремния в поверхностном слое воды по станциям характеризовалось увеличением от ст. 1 к ст. 2, затем их уменьшением к ст. 3. В придонном слое воды было значительно больше всех форм минерального азота (рис. 2). Соленость льда изменялась от 0,8 до 4,9‰ и в среднем составляла 3,2‰, что значительно выше, чем в прибрежье бух. Лососей.

Содержание биогенных веществ в кернах льда по станциям значительно различалось. На ст. 1 максимальное содержание N-NH₄⁺ отмечалось в среднем слое, а остальных биогенных веществ — в нижнем слое. На ст. 2 содержание N-NH₄⁺ было равномерным по слоям льда, N-NO₃⁻, P-PO₄³⁻ — выше в нижнем слое, а Si и N-NO₂⁻ — в верхнем слое. Максимум концентраций биогенных веществ на ст. 3 приходился на верхний слой. Среднее содержание нитритного азота по слоям льда находилось в пределах 3,65—3,95 мкг/дм³. Концентрации остальных соединений по слоям значительно различались. Так, максимум концентраций N-NO₃⁻ и P-PO₄³⁻ (17,71 и 24,63 мкг/дм³, соответственно) отмечен в нижнем слое льда, минимум (8,64 и 2,50 мкг/дм³) — в середине. В распределении Si максимум концентраций (92 мкг/дм³) зафиксирован в верхнем слое, минимум (33 мкг/дм³) — в среднем слое льда. Максимальное количество N-NH₄⁺ (144 мкг/дм³) обнаружено в середине, минимальное (104 мкг/дм³) — в нижнем.

В целом, подледная вода была обогащена кремнием, минеральным фосфором и нитратным азотом и обеднена аммонийным азотом по сравнению с нижним слоем льда. Уровень содержания нитритного азота в подледной воде и льде практически не различался.

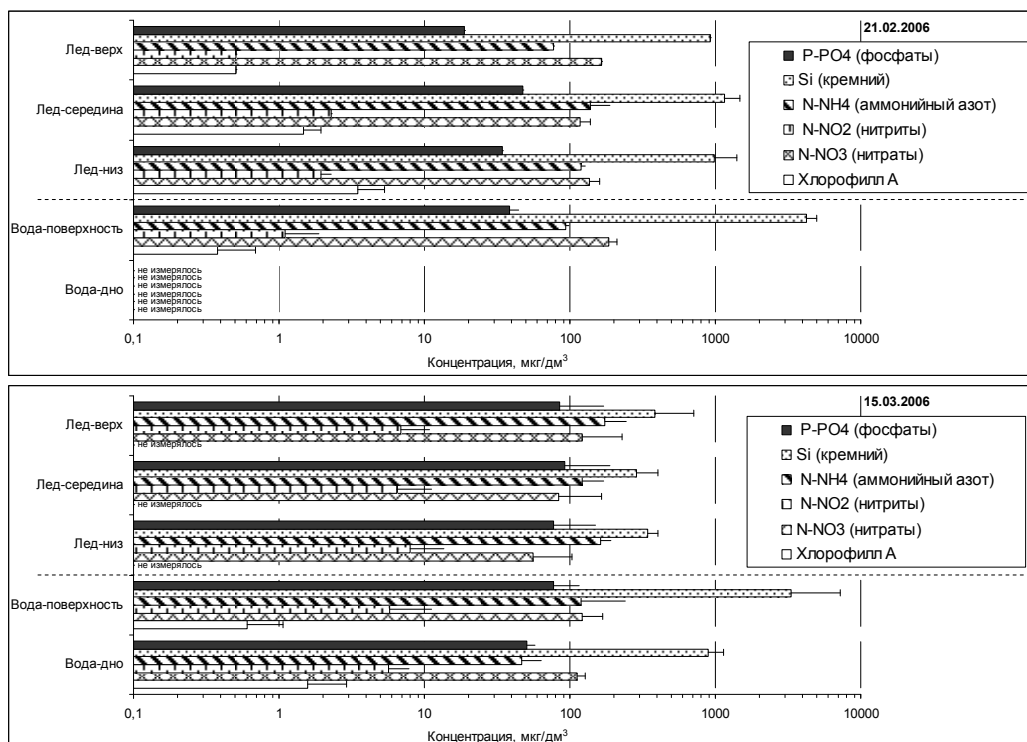


Рисунок 1. Средние концентрации биогенных веществ и хлорофилла «а» в пробах воды и льда, отобранных в бух. Лососей (зал. Анива) 21 февраля (сверху) и 15 марта (снизу)

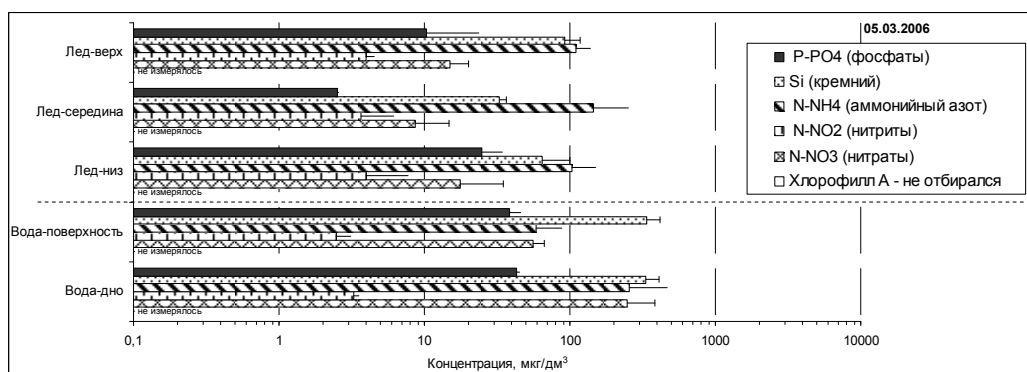


Рисунок 2. Средние концентрации биогенных веществ и хлорофилла «а» в пробах воды и льда, отобранных в зал. Мордвинова 05 марта 2006 г.

Через 11 дней (16 марта) в зал. Мордвинова температура поверхностного слоя подледной воды менялась от $-1,5$ до $-1,1^{\circ}\text{C}$, pH — от 7,94 до 7,98, а соленость — от 32,9 до 33,0‰. В этот период содержание биогенных веществ и хлорофилла «а» в пробах воды не определялось, лед был отобран на ст. 2. Соленость льда составила 4,3—5,4‰ (максимум в среднем слое).

Во всей толще льда концентрации аммонийного азота были ниже пределов обнаружения метода определения (15 мкг/дм^3). В нижнем слое льда ниже предела обнаружения было содержание нитритного и нитратного азота. Количество нитритного азота в верхнем слое льда составило $0,89 \text{ мкг/дм}^3$, в середине — $1,49 \text{ мкг/дм}^3$. Уровень нахождения нитратного азота в верхнем и среднем слоях был практически одинаков и достигал 76 мкг/дм^3 и 79 мкг/дм^3 , соответственно. Содержание минерального фосфора и кремния было выше в середине керна, чем на его поверхности — 44 мкг/дм^3 и 74 мкг/дм^3 , и 269 мкг/дм^3 и 504 мкг/дм^3 , соответственно.

Сравнивая концентрации биогенных веществ в кернах льда зал. Мордвинова на ст. 2 5 и 16 марта, можно заметить значительные изменения химического состава. Концентрации N-NO_2^- и N-NH_4^+ снизились в изученных слоях керна. Уровень нахождения N-NO_3^- в нижнем слое снизился до аналитического минимума, в остальных слоях существенно возрос. Концентрации P-PO_4^{3-} и Si возросли и в среднем, и в верхнем слоях льда (нижний слой на эти параметры 16 марта не исследовался).

Сравнение концентраций биогенных соединений в подледной воде (поверхностный горизонт) в бух. Лососей и зал. Мордвинова показало, что концентрации нитратного (в 2—3 раза) и аммонийного азота (в 2 раза), а также кремния (в 10—13 раз) были значительно выше в бухте Лососей. Количество нитритного азота и фосфатов в обоих районах были близки. В толще льда в бух. Лососей количество всех изученных биогенных веществ было выше, чем в зал. Мордвинова.

В целом, концентрация биогенных веществ в кернах льда прибрежных вод Сахалина в феврале—марте 2006 г. была довольно высока, что могло создать благоприятные условия для весеннего развития микроорганизмов.

Для выявления элементов, находящихся в избытке или дефиците, использовался традиционный подход, основанный на расчете соотношений биогенных элементов в воде. Подробно это обсуждается при анализе распределения микроводорослей.

Гетеротрофные бактерии

Известно, что вспышки численности фитопланктона сопровождаются увеличением концентрации легкоокисляемых органических веществ в морской воде и, как следствие, активным развитием гетеротрофных бактерий. Часть органических веществ в морях и океанах, представленных растворенными формами (Fenchel 1982; Epstein 1997), образуется за счет выделения 10—30% ассимилированного морским фитопланктоном углерода и в результате автолиза отмирающих водорослей (Мишустина и др., 1985). Активный фотосинтез альгофлоры — путь накопления органического вещества и в морских льдах (Иванов, 1998).

Характерное формирование высокой численности бактериопланктона одновременно или вслед за увеличением численности фитопланктона описано в ряде работ (Матаруева и др., 1972; Caroppo *et al.*, 1994). Ранее нами было отмечено увеличение численности сапрофитной евтрофной группы микроорганизмов в солоноватом оз. Тунайча (юг о. Сахалин) вслед за активным

развитием фитопланктона в апреле—мае 2003 г. (Полтева, 2005; Мотылькова и др., 2003) (рис. 3).

Результаты микробиологических исследований льда и подледной воды, проведенные в феврале—марте 2006 г., согласуются с вышеуказанной закономерностью, описанной в литературе. Так, в бух. Лососей (21 февраля) и в зал. Мордвинова (5 марта) максимальная численность гетеротрофных микроорганизмов во льду была приурочена к нижним слоям, где были зафиксированы максимумы численности фитопланктона. Значения численности гетеротрофных бактерий составили соответственно $4,5 \times 10^3$ кл./мл и $9,5 \times 10^6$ кл./мл. В подледной воде численность планктонных гетеротрофных бактерий также была высокой. В зал. Анива численность микроорганизмов была на порядок выше, чем в нижнем слое льда. В зал. Мордвинова показатели численности гетеротрофных бактерий льда и подледной воды были одного порядка (рис. 3). Полученные данные по численности гетеротрофных микроорганизмов согласуются с приводимыми в литературе результатами аналогичных исследований. Так, в припайных льдах Тугурского залива Охотского моря в марте обнаружено $1,7 \times 10^8$ кл./г гетеротрофных бактерий, в подледной воде — $9,0 \times 10^7$ кл./г. В апреле их численность составляла соответственно $14,0 \times 10^7$ и $5,0 \times 10^5$ кл./г (Иванов, 1998).

В морских льдах присутствуют различные виды бактерий (Лях, 1976). В Тугурском заливе из льда были выделены микроорганизмы родов *Nocardia*, *Corinebacterium*, *Brevibacterium*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*. Основу микробного сообщества составляли коринеформные организмы (около 70%), на кокковые и палочковидные формы приходилось 18 и 12% соответственно (Иванов, 1998).

В бух. Лососей и зал. Мордвинова морфологически микроорганизмы льда и подледной воды были представлены палочковидными бактериями, встречались коккобациллы, нитевидные, спиралевидные формы. При росте бактерий на агаровой среде большая часть штаммов была пигментированной, преобладала желтая окраска.

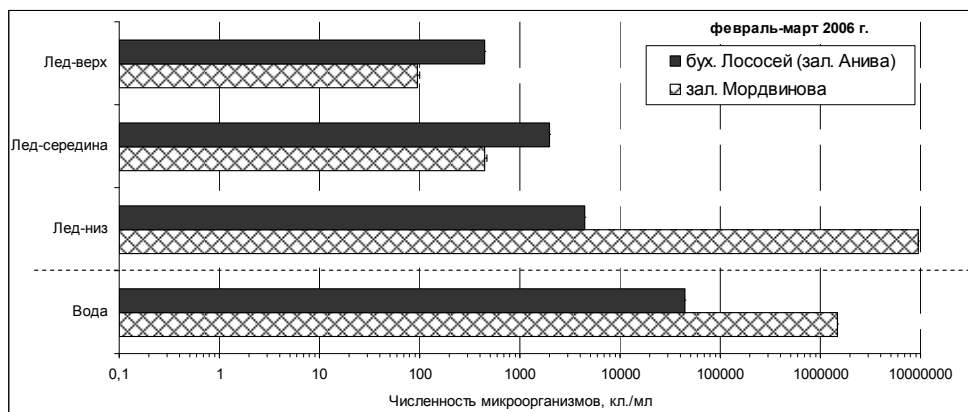


Рисунок 3. Численность гетеротрофных бактерий во льду и подледной воде в бух. Лососей 21.02.2006 г. (ст. 2) и в зал. Мордвинова 05.03.2006 г. (ст. 2)

Микроводоросли льда и воды

В пробах припайного льда бух. Лососей 21 февраля 2006 г. были обнаружены скопления диатомовых водорослей. Сообщество микроводорослей в основном составляли центрические виды рода *Thalassiosira*, развивающиеся преимущественно в верхнем слое льда, и пеннатные диатомовые, в основном *Fragilariopsis*, образующие длинные лентовидные колонии, преобладающие в нижнем слое льда. В пробах были найдены многочисленные мелкие шаровидные клетки синезеленой водоросли *Merismopedia tenuissima* Lemm., отмечавшиеся ранее в разломах льда у побережья Сахалина (Pishchalnik *et al.*, 2006). В общую численность этот вид (составляющий $3,7 \times 10^4$ кл./л) в данном случае был не включен, так как колонии были разрушены, и вегетация этого вида не наблюдалась.

Окраска льда была обусловлена наличием пигментов некоторых групп диатомовых водорослей. Верхняя поверхность льда была окрашена в светло-желтый цвет в результате развития центрических диатомовых водорослей. Нижняя часть льда видимой окраски не имела, несмотря на наличие колоний пеннатных водорослей.

Вертикальное распределение микроводорослей обусловлено особенностями освещенности толщи льда, гидрохимическими условиями и приспособленностью определенных групп микроводорослей к подобным условиям. Верхний слой льда был обогащен кремнием (так, на ст. 2 значение отношения Si/P составило 42, а Si/N — 4), N был в дефиците и по отношению к Si, и по отношению к P (значение N/P на ст. 2 составило 12). В среднем слое льда отмечался дефицит и Si, и N, особенно на мористой станции. Нижний слой характеризуется значительным избытком N (на мористой станции отношение N/P составило 22, а Si/N — <1) и относительным дефицитом Si. В подледной воде избыток Si отмечен на всех станциях (значение Si/P варьировало в диапазоне 64—124, а Si/N — в диапазоне 8—23), так же как и дефицит N по отношению и к Si, и к P.

В феврале максимум численности ($5,8 \times 10^6$ кл./л) был отмечен на самой удаленной от берега мористой точке (ст. 3) в нижней части льда, обусловленный развитием *Fragilariopsis cylindrus* (Grun.) Krieger. Указанный вид давал пик численности в нижней части керна льда на всех станциях (рис. 4). Ближе к берегу, общая численность микроводорослей понижалась.

После циклона к середине марта произошли серьезные изменения припайного льда: он был сначала разрушен, а затем восстановлен за счет смерзания разрушенных ледовых блоков. При этом в результате наслоений толщина припая увеличилась почти вдвое. Поэтому сравнение результатов по численности микроводорослей не будет корректным вследствие нарушения естественной изначальной толщины слоев льда.

Произошло также перераспределение минеральных биогенных веществ между водой и льдом. В целом, верхний слой льда был обеднен по Si (исключая береговую станцию 1) и обогащен по P (средние значения соотношения составили: Si/P — 11, Si/N — 2, N/P — 6). В подледной воде также отмечался дефицит Si по отношению к P (исключая береговую станцию 1) и его избыток по отношению к N на всех станциях — и на поверхности, и у дна. Значения N/P находились в диапазоне от <1 до 12, т.е. в относительном дефиците был и N по отношению к P.

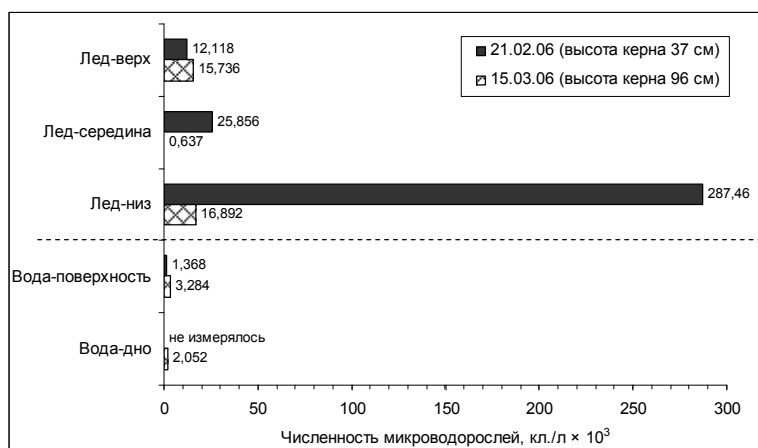


Рисунок 4. Вертикальное распределение численности микроводорослей припайного льда и подледной воде на ст. 1 в бух. Лососей (зал. Анива) в феврале и марте 2006 г.

Вероятно «цветение» водорослей во льду в этом районе было уже завершено (ориентировочно до 10 марта). На срезе льда видны грязные слои песка и грунта. Вследствие ухудшения условий обитания, численность микроводорослей льда невелика (рис. 4).

Развитие планктонной флоры в подледной воде в середине марта было невысоким, численность микроводорослей была в пять раз меньше ($3,4 \times 10^3$ кл./л) по сравнению с их численностью в нижнем слое льда (рис. 4). Бухта Лососей очистилась ото льда в конце марта, поэтому наблюдения в этот период здесь не проводились.

Ко второй декаде апреля воды бухты были бедны фитопланктоном. Отмечены признаки завершения развития прибрежной неритической диатомовой *Odontella aurita* (Lyngb.) Agardh. Это указывает на то, что «цветение» после таяния льда уже прошло. К концу апреля наблюдалось массовое развитие уже другого комплекса видов планктонных водорослей (в основном, центрических диатомовых).

На юго-восточном участке побережья Сахалина (в зал. Мордвинова) в начале марта развитие микроводорослей во льду отличалось на разном удалении от берега (рис. 5). Наибольшая численность микроводорослей была зафиксирована на ст. 2. Возможно, этому способствовали более благоприятные стабильные условия, так как основная доля их общей численности отмечена в нижней части керна. На самой дальней от берега ст. 3 (вблизи торосов) численность микроводорослей была чуть меньше, а в нижнем слое льда она не достигала $1,0 \times 10^3$ кл./л.

Вертикальное распределение микроводорослей в толще льда характеризовалось преобладанием их численности в нижней его части, как в начале, так и в середине марта (рис. 6). В начале марта тонкий однолетний лед имел толщину 38—40 см. Бурюю окраску, которая являлась признаком скопления микроводорослей, имел только нижний слой керна высотой 2 см. Поэтому в нижней части керна микроводоросли достигали самой высокой концентрации, в верхнем и среднем слое льда она была незначительна. При этом в подледной

воде численность микроводорослей была существенной только на дальней от берега станции вблизи торосов и открытой воды у кромки льда. Максимальная численность микроводорослей в воде была меньше почти в 2 раза ($6,8 \times 10^5$ кл./л.) по сравнению с самой высокой численностью клеток в нижнем слое льда ($1,3 \times 10^6$ кл./л.) на ст. 2.

В марте процесс развития микроводорослей в нижнем слое льда шел интенсивнее, чем в подледной воде. Дефицит Si при этом был значителен как в воде, так и по всей толще льда, и значение Si/P везде было ниже его стехиометрической величины 23, а Si/N < 1. В этот период велика роль P в обогащении среды питательными веществами, особенно в средней части льда, где значение N/P было в пределах 28—34.

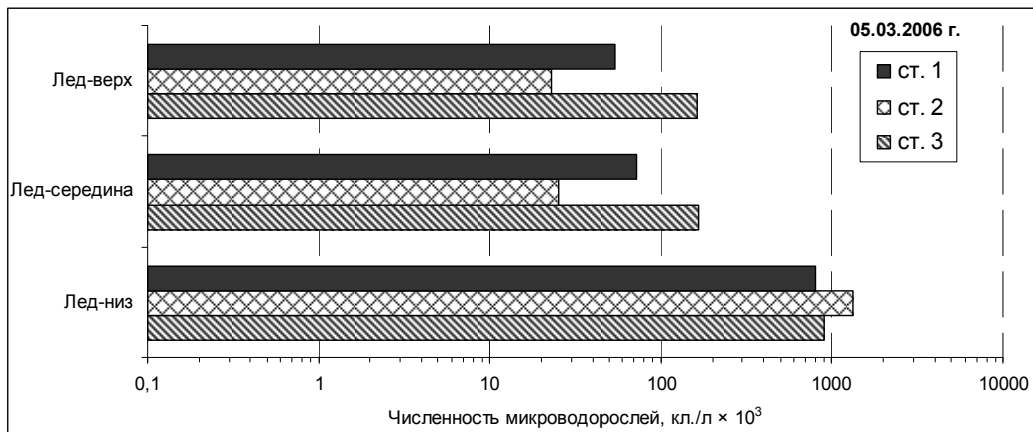


Рисунок 5. Распределение численности микроводорослей в припайном льду зал. Мордвинова по станциям в начале марта 2006 г.

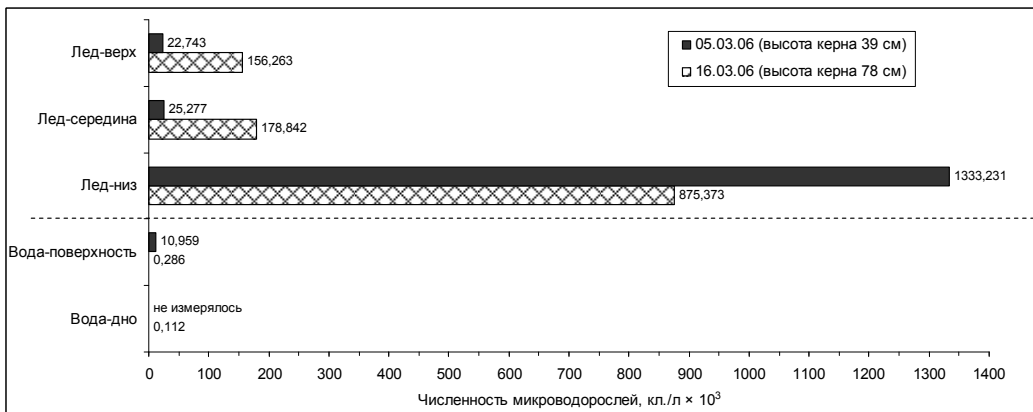


Рисунок 6. Распределение численности микроводорослей в толще льда и подледной воде на ст. 2 в зал. Мордвинова

Сообщество микроводорослей толщи льда в начале марта характеризовалось бурным развитием центрических диатомовых рода *Thalassiosira* и пеннатных диатомовых рода *Fragilariopsis* (представленный видом *F. cylindrus*), в меньшей степени родов *Navicula* и *Pleurosigma*.

В перерыве между сборами материала 5 и 16 марта над южными районами Сахалина прошел глубокий циклон. Сильные ветры вызвали подвижки припая, в результате чего на выбранном для исследований участке произошла замена однолетнего тонкого льда однолетним льдом средней толщины (78 см). Почти вдвое увеличилась высота снежного покрова. Начавшиеся процессы таяния снега и появление свежих трещин содействовали развитию микроводорослей, которое проявлялось ярко-желтой окраской снега и боковых поверхностей льда в разломах. К середине марта окрашенный нижний слой льда был в 10 раз толще по сравнению с началом марта и достигал уже 20 см, имея желтую окраску разных оттенков. В этот период особенно бурно развивались центрические и пеннатные диатомовые, преобладающие в нижних слоях льда. В результате потребления водорослями в относительном дефиците во льду были Si и N, в избытке — P.

Изменения в развитии микроводорослей в верхнем и среднем слоях льда на разных станциях по сравнению с началом марта шло неравномерно: более интенсивно на ст. 2, где численность была выше в несколько раз. На распределение численности микроводорослей в верхних слоях льда влиял, вероятно, уровень освещения, обусловленный неравномерностью толщины снежного покрова на исследуемом участке. У берега и возле торосов лед был покрыт более высоким слоем снега.

В середине марта к доминирующему до этого периода виду *F. cylindrus*, являющемуся обычным представителем ледовой флоры арктических морей (Околюдов, 1992; Ратькова, 2004; Ильяш и др., 2009) присоединилась центрическая диатомовая *Porosira glacialis* (Grun.) Jörg. Массовое развитие последнего вида является характерным в холодный период, в том числе подо льдом в Охотском море (Pishchalnik *et al.*, 2006; Леонов и др., 2007) и в Японском море (Коновалова и др., 1989). Однако в середине марта в подледной воде численность клеток микроводорослей была низкая ($2,9 \times 10^2$ кл./л). В разломе льда, где наблюдалось окрашивание снега в желто-оранжевый цвет, численность их также была невысокой — $4,2 \times 10^2$ кл./л. Окрашивание снега было вызвано не идентифицированными организмами. Желтую окраску нижней части льда придавали диатомовые водоросли.

В припаяе на северо-восточном побережье о. Сахалин (у р. Большая Хузи) в марте в 100 м от берега лед был более плотным неокрашенным, и развитие микроводорослей в нем было незначительным. Численность микроводорослей составляла $1,5 \times 10^3$ кл./л в верхнем слое льда, $3,0 \times 10^3$ кл./л в среднем и $1,4 \times 10^3$ кл./л в нижнем его слое. По-видимому, здесь сказывается влияние речных вод (некоторые авторы, например, Данилов (2001), отмечали такие факты в том случае, если воды реки бедны микроводорослями).

В нижнем слое льда, дрейфующего вдоль северо-восточного побережья, в начале января 2006 г. численность микроводорослей составляла $2,2 \times 10^6$ кл./л. Основной вклад в общую численность (>97%) в этот период вносила бурно развивающаяся арктическая диатомовая водоросль *Nitzschia frigida* Grun. Развитие этого вида в нижней части льда, в подледной воде и в толще воды в процессе таяния льда и вымывания с нижней поверхности характерно для

арктических морей (Михайловский и др., 1989; Околодков, 1990; 1992; Мельников и др., 2003; Ратькова и др., 2004; Сажин и др., 2004; Ильяш, Житина, 2009).

В водах юго-восточного шельфа о. Сахалин в свежей трещине ледяного покрова в апреле (ст. С, цв. ил. 8 на стр. 219) численность клеток микроводорослей в воде составляла $3,1 \times 10^4$ кл./л, биомасса $3,4 \times 10^2$ мг/л. Диатомовые доминировали по биомассе (93,6%). Большую долю биомассы составляли центрические диатомовые при доминировании *Porosira glacialis* (37% от общей численности) и виды рода *Thalassiosira* (в том числе *T. nordenskioldii* Cl., *T. rotula* Meunier). По численности диатомовые преобладали наряду с динофитовыми, составляя 52% и 41%, соответственно. Среди динофитовых развивалась группа мелких видов, основную долю среди которых занимал *Prorocentrum cf. minimum* (Pavillard) Schiller (16% общей численности), поэтому в общей биомассе их роль была невелика. Несмотря на бурую окраску воды в этом месте, развитие микроводорослей было умеренным.

Ранее сходный состав доминантов сообщества водорослей в разломах льда наблюдали в январе—феврале в 2001 г. на шельфе о. Сахалин. Тогда в группе доминантов из центрических и пеннатных видов диатомовых также отмечали *P. glacialis* и *T. nordenskioldii*. При этом оба вида достигали наибольшего развития по численности в зал. Анива на южном участке шельфа (*P. glacialis* до $1,3 \times 10^4$ кл./л и *T. nordenskioldii* до $1,3 \times 10^5$ кл./л) и умеренных значений на северо-восточном и восточном шельфе (*P. glacialis* до $5,7 \times 10^2$ кл./л и *T. nordenskioldii* до $0,350 \times 10^3$ – $1,0 \times 10^3$ кл./л в разных районах) (Леонов и др., 2007). Кроме того, *T. nordenskioldii* в составе центрического диатомового подледного планктона отмечена как для арктических морей (Михайловский и др., 1989; Ратькова и др., 2004; Ильяш и др., 2009), так и для заливов Японского моря (Коновалова, 1980, 1988).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в Охотском море, как и других арктических и субарктических морях, в зимний период наблюдается массовое развитие микроводорослей и гетеротрофных бактерий как во льду, так и в подледной воде.

Вегетация водорослей и развитие других микроорганизмов во льду и подо льдом в прибрежных водах о. Сахалин в зимний период в значительной мере определяется обеспеченностью их вегетации биогенными веществами и ледовым режимом. Зимне-весенняя (ранневесенняя) фаза гидрохимического и гидробиологического режима, обладающая специфичностью, важна для формирования высокой продуктивности следующих периодов функционирования прибрежных экосистем. Полученные данные могут служить начальным этапом изучения флоры и микроорганизмов льда и подледной воды в Охотском море.

Авторы благодарят сотрудников ФГУП «СахНИРО», принимавших участие в отборе проб и в выполнении химико-аналитических работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Биология** центрального арктического бассейна. — М.: Наука, **1980**. — 260 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей**. Т. 9. Охотское море: Вып.2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. — СПб.: Гидрометеиздат, — **1993**. — 168 с.
- Данилов Р.А.** Подледные сукцессии фитопланктона в Сундсвальской бухте (восточное побережье Швеции): сравнительное использование описательного и многовариантного методов // *Экология*. — **2001**. №5. — С. 363—366.
- Диатомовые водоросли СССР**: Ископаемые и современные. Т. I. Л.: Наука. 1974. 400 с.
- Дзюбан А.Н.** Первичные продукционные процессы в воде Тугурского залива Охотского моря // *Океанология*. — **2003**. Т. 43. №3. — С. 383—392.
- Житина Л.С.** Ледовая и планктонная флора Белого моря как объект мониторинга / Л.С. Житина, Г.Е. Михайловский // *Биологический мониторинг прибрежных вод Белого моря*. — М.: АН СССР, ин-т океанологии им. П.П. Ширшова. — **1990**. — С.41—49.
- Иванов А.В.** Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов замерзающих и талых вод / А.В. Иванов — Хабаровск: Дальнаука, **1998**. — 164 с.
- Ильяш Л.В.** Сравнительный анализ видового состава диатомовых водорослей льдов морей Российской Арктики / Л.В. Ильяш, Л.С. Житина // *Журнал общей биологии*. — **2009**. — Т. 70. — № 2. — С. 143—154.
- Колганова Т.Н.** Сезонное распределение фитопланктона в лагуне Буссе (залив Анива) / Т.Н. Колганова // *Распред. и рац. использ. вод. зооресурсов Сах. и Курил. о-вов*. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, **1980**. — С. 3—7.
- Колганова Т.Н.** Сезонная характеристика планктона лагуны Буссе (залив Анива) / Т.Н. Колганова, Н.Г. Хрушкова // *Итоги иссл. по вопр. рац. использ. и охраны вод. зем. и биол. рес. Сах. и Курил. Тезисы док. III н/п конф.* — **1987**. — С.124—125.
- Комплексные исследования экосистемы Охотского моря**. . — М.: ВНИРО, **1997**. —274 с.
- Коновалова Г.В.** Микро- и наннопланктон Амурского залива зимой / Г.В. Коновалова // *Прибрежный планктон и бентос северной части Японского моря*. — Вл-к: ДВНЦ АН СССР, **1980**. — С. 6—9.
- Коновалова Г.В.** Структура фитопланктона мелководий северо-западной части Японского моря / Г.В. Коновалова, Т.Ю. Орлова // *Биология моря*. — **1988**. — № 2. — С. 10—20.
- Коновалова Г.В.** Атлас фитопланктона Японского моря / Г.В. Коновалова, Т.Ю. Орлова, Л.А. Паутова. — Л.: **1989**. — С. 25—26.
- Леонов А.В.** Характеристика развития микроводорослей в Охотском море в зимних условиях и моделирование изменений их годового хода в водах залива Анива / А.В. Леонов, Т.А. Могильникова, В.М. Пищальник, О.В. Зенкин // *Водные Ресурсы*. — **2007**. — Т. 34. — № 2. — С. 204—215.

- Лях С.П.** Адаптация микроорганизмов к низким температурам /С.П. Лях // М.: Наука, **1976**. — 286 с.
- Матаруева И.А.** Микробиологическая характеристика озера Малая Шарга в связи с особенностями его гидрохимического режима / В.А. Матаруева, О.Г. Матаруев // Изв.ТИНРО, **1972**. — Т. 77. — С. 160–168.
- Мельников И.А.** Экосистема арктического морского льда / И.А. Мельников. — М.: Изд-во АН СССР. — **1989**. — 191 с.
- Мельников И.А.** Динамика эколого-биохимических характеристик морского льда в прибрежной зоне Белого моря / И.А. Мельников, И.А. Корнеева, Л.С. Житина, С.С. Шанин // Экология. — **2003**. — № 2. — С. 206–213.
- Мельников И.А.** Структура прибрежной экосистемы льда в зоне взаимодействия река-море / И.А. Мельников, С.Н. Дикарев, В.Г. Егоров, Е.Г. Колосова, Л.С. Житина // Океанология. — **2005**. — Т. 45. — № 4. — С. 542–550.
- Михайловский Г.Е.** Криопланктонная флора Белого моря и ее сезонная динамика, выявленная методами корреляционного анализа / Г.Е. Михайловский, Л.С. Житина // Океанология. — **1989**. — Т. XXIX. — Вып. 5.
- Мишустина И.Е.** Морская микробиология / И.Е. Мишустина, И.К. Щеглова, И.Н. Мицкевич. — Владивосток: ДВГУ, **1985**. — 184 с.
- Мотылькова И.В.** Весенний фитопланктон озера Тунайча (южный Сахалин) / И.В. Мотылькова, Н.В. Коновалова // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 2. — Владивосток: Дальнаука, **2003**. — С. 287–294.
- Морозова Т.В.** Мониторинг фитопланктона в районе хозяйства марикультуры в заливе Восток Японского моря / Т.В. Морозова, Т.Ю. Орлова // Биология моря. — **2005**. — Т. 31. — № 1. — С.11–16.
- Окологдов Ю.Б.** Водоросли льдов Чукотского моря в марте-апреле 1988 г. / Ю.Б. Окологдов // Новости систематики низших растений. — Л.: Наука. — **1990**. — Т. 27. — С. 16–20.
- Пищальник В.М. и др.** Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. Часть II. / В.М. Пищальник, А.О. Бобков — Южно-Сахалинск: СахГУ, —**2000**. — 108 с.
- Пищальник В.М. и др.** Особенности развития ледяного покрова Охотского моря в 2001—2006 гг. / В.М. Пищальник, С.А. Покрашенко, А.В. Леонов, А.А. Гальцев. // Сборник РЭА №1 «Экологические аспекты освоения нефтегазовых месторождений» — Владивосток: изд-во Дальнаука, 2009. — С. 185—197 (наст. сборник).
- Полтева А.В.** Некоторые характеристики микробного сообщества оз. Тунайча (южный Сахалин) / А.В. Полтева // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 3. — Владивосток: Дальнаука, **2005**. — С. 192–199.
- Ратькова Т.Н.** Одноклеточное население беломорской пелагиали подо льдом в ранне-весенний период / Т.Н. Ратькова, А.Ф.Сажин, К.Н. Кособокова // Океанология. — **2004**. — Т. 44. — С. 259–266.
- РД 52.10.243-92.** Руководство по химическому анализу морских вод. — Введен 01.08.93. Руководящий документ / Разр. С.Г. Орадовский и др. — С-Пб., Гидрометеиздат, 1993. — 263 с.
- Руководство** по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / Под ред. А.В. Цыбань. — Л.: Гидрометеиздат, **1980**. — 192 с.

- Руководство** по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. д-ра хим. наук проф. А.Д. Семенова. — Л., Гидрометеиздат, **1977**. — 540 с.
- Руководство** по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового Океана. — М.: ВНИРО, **2003**. — 202 с.
- Сажин** А.Ф. Население прибрежного льда Белого моря в ранне-весенний период / А.Ф. Сажин, Т.Н. Ратькова, К.Н. Кособокова // *Океанология*. — **2004**. — Т. 44. — № 1. — С. 92–100.
- Федоров** В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности / В.Д. Федоров. — М.: МГУ, **1979**. — 168 с.
- Флинт** М.В. Сравнительная роль бактерий и фитопланктона в цикле органического углерода в пелагической экосистеме восточной части Берингова моря (район острова Прибылова) / М.В. Флинт, А.И. Копылов, И.Н. Суханова // *Океанология*. — **2003**. — Т. 43. — № 1. — С. 54–68.
- Шунтов** В.П. Биология дальневосточных морей. — Владивосток: ТИНРО, **2001**. — Т.1. — 579 с.
- Caroppo** C. Ciclo annuale del fitoplancton nei mari di Taranto: influenza della qualità delle acque / C. Caroppo, N. Cardellicchio, R.A. Cavallo // *Biologia Marina Mediterranea*. — **1994**. — V.1. — P. 201–206.
- Epstein** S.S. Microbial food webs in marine sediments. Seasonal changes in trophic interactions in a sandy tidal flat community / S.S. Epstein // *Microbial Ecology*. — **1997**. — V. 34. — P.199–209.
- Fenchel** T. Ecology of heterotrophic microflagellates. Quantitative occurrence and importance as consumers of bacteria / T. Fenchel // *Marine Ecology Progress Series*, **1982**. — V.9. — P. 35–42.
- Garrison** D.L. Development of sea ice microbial communities during autumn ice formation in the Ross Sea / D.L. Garrison, M.O. Jeffries, A. Gibson, S.L. Coale, D. Neenan, C. Fritsen, Y.B. Okolodkov, M.M. Gowing // *Marine ecology progress series*. — **2003**. — Vol. 259, № 12. — P. 1–15.
- Garrison, D.L.** Sea-ice microbial communities in Ross Sea: autumn and summer biota / D.L. Garrison, A. Gibson, S.L. Coale, M.M. Gowing, Y.B. Okolodkov, C.H. Fritsen, M.O. Jeffries // *Marine ecology progress series*. — **2005**. — Vol. 300, № 16. — P. 39–52.
- Okolodkov** Y. B. Vertical distribution of algae and nutrients in the first-year ice from the East Siberian Sea in May 1987 // *Бот. журнал*, **1996**, — Т. 81, № 7. — P. 34–40.
- Okolodkov** Y. B. Cryopelagic flora of the Chukchi, East Siberian and Laptev seas / Y.B. Okolodkov // *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.*, **1992**. — №5. — P. 28–43.
- Pishchalnik** V.M. Winter development of diatom microalgae in the Sea of Okhotsk / V.M. Pishchalnik, A.V. Leonov, T.A. Mogilnikova, O.V. Zenkin // *Proceedings of the 21st International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice*. Mombetsu, Hokkaido, Japan, 19–24 February 2006. — Mombetsu, **2006**. — P. 212–215.
- Smith** R.E.H. Population dynamic of bacteria in Arctic sea ice / R.E.H. Smith, P. Clement, G.F. Cota // *Microbiol.Ecol.* **1989**. — V. 17. — P. 63–76.