

УДК 551.46:262.54

ЛЕДОВОЕ СООБЩЕСТВО МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2014 г. Г. В. Ковалева¹, В. В. Поважный^{1, 2}, А. Е. Золотарева¹,
П. Р. Макаревич³, Д. Г. Матишов¹

¹Институт аридных зон Южного научного центра РАН, Ростов-на-Дону

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

³Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск

e-mail: kovaleva@ssc-ras.ru

Поступила в редакцию 12.04.2013 г.

Описано развитие временного ледового сообщества микроводорослей в зоне смешения солоноватых и пресных вод Таганрогского залива Азовского моря. В пробах, отобранных в феврале 2013 г. в подледной толще воды отмечены высокие численность и биомасса планктонных водорослей, а также концентрация хлорофилла “а”. Впервые описано “цветение” льда в результате массового развития диатомовой водоросли *Stephanodiscus hantzschii* Grunow в восточной части Таганрогского залива. Приведены качественные и количественные характеристики сообщества микроводорослей, развивавшихся подо льдом, а так же данные сопутствующих гидрохимических исследований. Полученные результаты расширяют представления об общей продуктивности водоема.

DOI: 10.7868/S0030157414050086

Развитию криофильной флоры в морском льду и непосредственно подо льдом в полярных регионах в настоящее время уделяется много внимания. Значительно меньше исследований посвящено изучению фито сообществ пресного льда, а также криофлоры эстуарных систем.

Традиционное представление о подледном периоде в сукцессионном цикле фитопланктонного сообщества Азовского моря предполагало его крайне низкую биомассу и продукцию. Несмотря на изученность Азовского моря в гидробиологическом аспекте, сведения о сезонном развитии микроводорослей на его акватории охватывают преимущественно период открытой воды. Данные о вегетации микроводорослей в зимний период разрозненны и немногочисленны [6; 8; 9; 10; 11; 12]. В тоже время, чтобы понять характер и причины изменений биомассы фитопланктона в течение года, необходимо иметь представление об экологии массовых видов и особенностях прохождения сезонной сукцессии во все периоды года.

Целью данной работы стало описание временного ледового сообщества микроводорослей и подледного фитопланктона дельты р. Дон и Таганрогского залива, находящегося под воздействием речного стока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Таганрогский залив – один из самых изученных районов Азовского моря. Восточная его часть, принимающая сток р. Дон, характеризуется небольшими глубинами и резкими колебаниями основных параметров среды в результате сгонно-нагонных явлений. Для этого района характерна наибольшая продолжительность ледового периода, значительная нагрузка биогенного стока и сильно выраженный горизонтальный градиент солености [4].

Отбор проб микроводорослей, гидрохимических проб и проб для определения концентрации хлорофилла “а” (хл “а”) в воде и льду выполнялись 29–31 января 2013 г. на трех станциях, расположенных в кутовой части Таганрогского залива (с. Займо-Обрыв, ст. 1), на косе Павло-Очаковская (ст. 2) и в дельте р. Дон (Свиное гирло, ст. 3) (рис. 1). При отборе проб льда мотобуром и ручной пилой вырезался образец размером ~50 × 50 см, из которого на воздухе тотально (без разделения на горизонты) отбирались гидробиологические и гидрохимические пробы.

Определение гидрохимических показателей и концентрации хл “а” выполнялись в лабораторных условиях. Пробы льда были растоплены при комнатной температуре. В пробах определялись электропроводность (σ), pH, Eh, щелочность (HCO_3), концентрация кислорода (в воде), растворенных минеральных форм азота ($N_{\text{мин}}$) и фос-

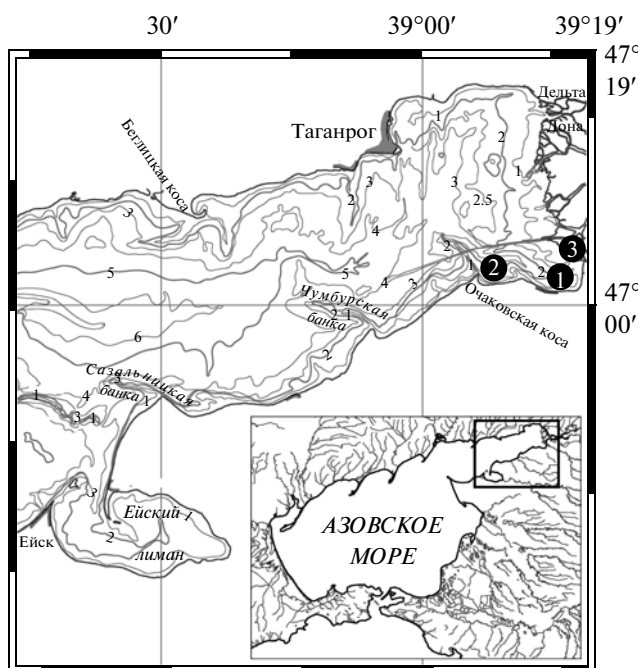


Рис. 1. Места отбора проб (1 – с. Займо-Обрыв, 2 – Павло-Очаковская коса, 3 – дельта р. Дон, Свиное гирло).

фора ($P_{\text{мин}}$) по [16]; валового ($N, P_{\text{вал}}$) и общего растворенного азота и фосфора ($N, P_{\text{раст}}$) по [17] (табл. 1, 2). Определение хл “а” и других фитопигментов в воде и льду проводилось по ГОСТ 17.1.04.02.-90 спектрофотометрически. Концентрация общей взвеси (TSS) и взвешенного органического углерода (POC) определялась по [1], растворенного органического углерода (DOC) – CHN-анализатором Analytic Jena.

Количественные пробы фитопланктона отбирали из поверхностного слоя воды во флаконы объемом 0.7 л. Образцы льда с водорослями (качественные пробы) растапливали при комнатной температуре. Пробы фиксировали кислым раствором Люголя и в лабораторных условиях концентрировали осадочным методом до конечного объема 50–100 мл. Для определения таксономического

состава и количественного учета фитопланктона, сконцентрированные пробы анализировали с использованием светового микроскопа Leica DME в камере Ножотта (0.1 мл) при увеличении $\times 400$. Крупные формы микроводорослей (более 50 мкм) учитывали во всей камере Ножотта, в двух–трех повторных наполнениях, прочие виды считали в нескольких полосах камеры (до 400 клеток). Для расчета численности использовали стандартные формулы [2], расчет биомассы проводили по фактическим размерам клеток, рассчитывая объем клетки по методу геометрического подобия. Таксономическую принадлежность некоторых мелких форм диатомовых водорослей определяли с использованием сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO 40XVP.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характерной чертой проб, отобранных в кутовой части Таганрогского залива, явилась высокая концентрация хл “а” в воде и льду, а также повышенная минерализация (табл. 2). На ст. 1 концентрация хл “а”, при исключительно низком содержании феофитина, в 3 раза превышала его среднегодовую концентрацию в Таганрогском заливе для периода открытой воды [18]. Интенсивное развитие водорослей в толще льда на наиболее удаленной от источника распреснения ст. 2 (концентрация хл “а” во льду была в 1.6 раз выше, чем в воде) вызывало резкое изменение pH льда, учитывая его низкую буферную емкость. Сходная высокая концентрация хл “а” была отмечена и для речного льда (ст. 3). При этом в подледной речной воде концентрация фитопигментов была низкой, а процентное содержание феофитина – крайне высоким. В воде на всех трех станциях была отмечена высокая концентрация минерального азота и его высокое процентное содержание в валовом азоте, типичное для зимнего периода (47–58%). Низкая для зимнего периода концентрация минерального фосфора и невысокая его доля в валовом фосфоре на станциях в Таганрогском заливе может быть обусловлена как интенсивным поглощением фосфатов фитопланкто-

Таблица 1. Координаты станций и некоторые характеристики воды и льда, сопутствующие отбору проб

Дата	Широта	Долгота	Номер станции	Биотоп	Глубина, м	Толщина льда, см	Температура воды, °С	σ_t , мСм/см	Eh, мВ	pH	HCO_3^- , мг/л	O_2 , мг/л
29.01.2013	47.03422	39.29731	1	вода	0.8	20.5	0.14	1.380	+516	8.80	111.15	
				лед								
31.01.2013	47.04203	39.10819	2	вода	2.0	19	0.16	3.770	+155	7.69	112.56	13.77
				лед								
31.01.2013	47.07925	39.30406	3	вода	2.0	12.5	0.05	0.650	+155	7.69	99.44	13.29
				лед								

Таблица 2. Концентрация хл “а” (Схл “а”), феофитина “а” (Сфео “а”) и основные гидрохимические характеристики воды и льда на станциях отбора проб

Номер станции		Схл “а”, мкг/л	Сфео “а”, мкг/л	% фео-а от хл “а”	N _{мин} , мгN/л	N _{раст} , мгN/л	N _{вал} , мгN/л	P _{мин} , мгP/л	P _{раст} , мгP/л	P _{вал} , мгP/л	TSS, мг/л	РОС, мгС/л	DOC, мгС/л
1	вода	108.67	1.63	1	0.839		1.672	0.009		0.282	15.6	3.45	
	лед	38.35	5.91	15	0.107			0.005		0.112			1.34
2	вода	11.87	2.77	23	0.963	0.985	1.642	0.032	0.055	0.091	4.7	1.16	
	лед	18.75	5.95	32	0.057	0.368	0.647	0.011	0.051	0.348	120.0	4.56	1.77
3	вода	0.90	0.68	75	0.779	1.642		0.136	0.243	0.249	7.1	0.75	10.41
	лед	11.85	1.57	13	0.047	0.318		0.007	0.047		64.6	4.63	1.50

Примечание. Схл “а” – концентрация хл “а” с поправкой на феофитин-а, Сфео “а” – концентрация феофитина-а, %фео-а от хл-а – процентное содержание феофитина в общем хл “а”, N_{мин} – концентрация растворенного минерального азота (аммонийного, нитратного, нитритного), N_{раст} – концентрация общего растворенного азота (фильтрованная проба), N_{вал} – концентрация валового азота (нефильтрованная проба), P_{мин} – концентрация растворенного минерального фосфора, P_{раст} – концентрация общего растворенного фосфора (фильтрованная проба), P_{вал} – концентрация валового фосфора (нефильтрованная проба), TSS – концентрация общей взвеси, РОС – концентрация взвешенного органического углерода, DOC – концентрация растворенного органического углерода.

Таблица 3. Качественные и количественные характеристики фитопланктонного сообщества подледной пелагиали

Качественные и количественные характеристики	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3
Доминирующая (по численности) группа фитопланктона	Диатомовые водоросли (<i>Stephanodiscus hantzschii</i>)	Динофитовые водоросли	Диатомовые/золотистые водоросли
Численность (млн кл/м ³)	25876.8	765.5	21.6
Биомасса (мг/м ³)	10167.3	7979.7	51.2
Концентрация хл “а” (мкг/л)	108.67	11.87	0.90

ном (ст. 1), так и процессами, связанными со смешением речных и морских вод (ст. 2).

Анализ структуры фитопланктонного сообщества подледной пелагиали показал существенные отличия в количественных и качественных показателях альгоценоза (табл. 3).

Биомасса живых микроводорослей составила значительную часть РОС на станциях в Таганрогском заливе (при принятой доле сухого вещества в сырой биомассе в 10% и содержании углерода в сухом веществе в 50%) – 14% на ст. 1 и 34% на ст. 2.

Различия проявлялись не только в значениях численности и биомассы фитопланктона, но и на уровне доминирующих таксонов.

В планктоне одной из протоков дельты Дона (ст. 3) сообщество микроводорослей имело низкие показатели видового разнообразия и количественных характеристик. В пробах обнаружены единичные клетки золотистых водорослей из рода *Chromulina*, а так же планктонных и бентосных диатомовых.

На ст. 2 в планктоне доминировали динофитовые водоросли: *Glenodinium* sp., *Heterocapsa rotundata* (Lohm.) G. Hansen. Помимо них, в пробах отмечены *Plagioselmis punctata* Butch., *Coscinodiscus*

jonesianus (Grev.) Ostf., *Nitzschia reversa* W. Smith, *Nitzschia holsatica* Hust., *Surirella ovalis* Breb., *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Bréb., *Pediastrum duplex* Meyen и др.

В фитопланктоне на ст. 1 доминировал *Stephanodiscus hantzschii* Grun. Этот вид составлял 91.5% от общей численности и 68.72% от общей биомассы планктонных водорослей. Помимо него, в пробах отмечено незначительное количество *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) Kom.-Legner. et Cromb., *Gymnodinium agillifome* Schill. и *Glenodinium* sp.

Во время отбора планктонных проб, в районе Займо-Обрыва было отмечено “цветение” микроводорослей на поверхности льда, связанное с массовым развитием диатомовой водоросли *Stephanodiscus hantzschii* (рис. 2). Развитие вида было отмечено в натках льда, образовавшихся при выдавливании воды на поверхность ледовых полей при нагонных явлениях. Ранее отмечалось, что клетки *S. hantzschii* “приносятся в Таганрогский залив с речными водами и вскоре отмирают” [15]. В пробах, отобранных на ст. 1, массовая вегетация этого вида происходила, как на льду, так и в водной толще. В литературе неоднократно упоминалось о вспышках численности *S. hantzschii*, но все описанные случаи происходили в весенне-летний

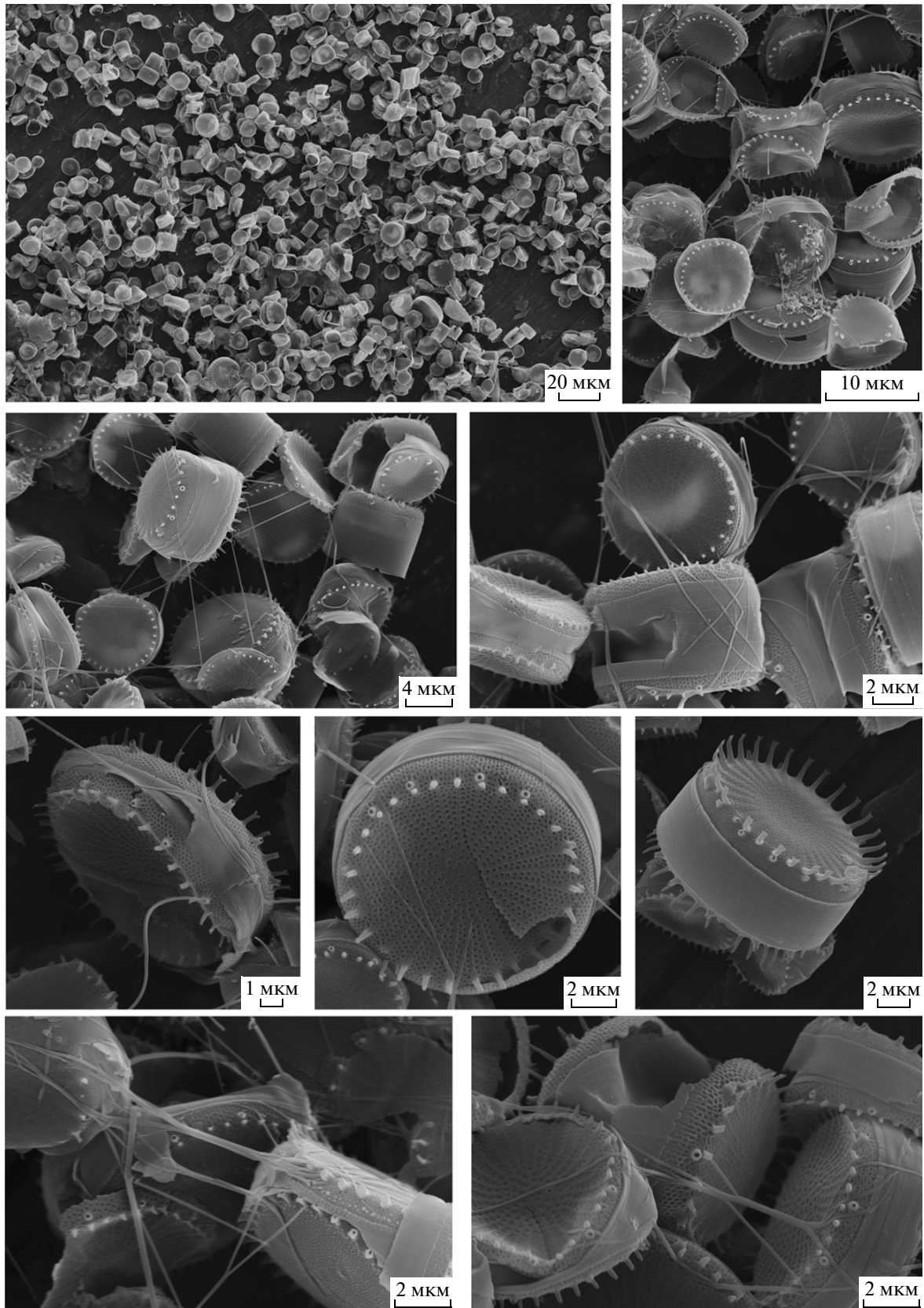


Рис. 2. Колонии *Stephanodiscus hantzschii*, развивавшегося на поверхности льда в районе с. Займо-Обрыв.

период [3; 13; 14; 20]. В Таганрогском заливе этот вид ранее так же отмечен только в планктоне и, преимущественно, в летне-осенний период [19].

Клетки *Stephanodiscus hantzschii*, формировавшие “цветение” на льду, имели характерные морфологические особенности. *S. hantzschii* – планктонный вид и, обычно, представлен одиночными клетками, не имеющими соединительных тяжей. Популяция, развивавшаяся на льду, напротив, имела признаки, характерные для колониальных форм диатомовых. На фотографиях, полученных с использованием сканирующего электронного микроскопа (рис. 2), хорошо заметны щетинки, соединяющие клетки в колонию, которые сохранились после фиксации и концентрирования проб. По литературным данным [21; 22], для *Stephanodiscus hantzschii* характерно образование плотных колоний в условиях сильной эвтрофикации. Кроме того, при изменении свойств воды, в частности, при эвтрофикации для вида отмечалось (на определенной стадии развития вегетативной клетки) образование длинных мягких щетинок [22].

Долгое время считалось [19], что в зимний период подо льдом фитопланктон в Азовском море практически не развивается. Позднее, в результате ледокольных рейсов были получены новые данные о численности и биомассе фитопланктона, вегетирующего подо льдом [7; 11; 12], которые противоречат мнению о низкой биомассе и бедном качественном составе фитопланктона в период “биологической зимы”. Так, в условиях суровой зимы 2006 г. биомасса фитопланктона подо льдом изменялась от 0.013 до 1.06 г/м³ в Таганрогском заливе и, от 0.62 до 1.47 г/м³ в открытой части Азовского моря, а максимальные значения достигали, соответственно, 1.4 и 2.42 г/м³ [7]. Исследования распределения хл “а” по данным дистанционного зондирования и подспутниковых наблюдений, выполненные на акватории, свободной ото льда, подтвердили высокую численность микроводорослей в Азовском море в зимний период [18].

Сведения о “ледовом” альгоценозе в Азовском море приведены в нескольких работах [5; 6; 7; 8], но они касаются только северо-восточной части Керченского пролива. В этих исследованиях впервые затронута проблема определения таксономической и экологической специфики сообщества микроводорослей, развивающегося на льду Азовского моря. Вероятно, в связи с тем, что лед в Азовском море существует непродолжительное время, а в иные годы он не образуется совсем, в составе альгофлоры Азовского моря нет облигатных криофилов. Чаще всего на поверхности льда отмечали поселение водорослей, обитающих одновременно как в планктоне, так и в перифитоне и бентосе [7; 8]. Эти виды не являются

облигатно криофильными, но используют лед в качестве твердого субстрата. Отмеченное “цветение” льда в результате массового развития планктонного вида *Stephanodiscus hantzschii* Grunow подтверждает этот факт. В процессе адаптации к условиям обитания на льду, у планктонных видов могут формироваться специфические морфологические признаки строения клеток, позволяющие им использовать лед в качестве субстрата. В нашем материале – это были длинные щетинки, соединяющие отдельные клетки *S. hantzschii* в колонию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показало данное исследование, не смотря на то, что в альгофлоре Азовского моря нет облигатных криофилов, их место в ледовом субстрате могут занимать такие планктонные виды, как *Stephanodiscus hantzschii*, которые адаптировались к условиям обитания на льду и формируют специальные клеточные структуры, позволяющие им образовывать колонии. Таким образом, даже кратковременно существующий лед может служить субстратом для массового развития некоторых видов микроводорослей. Впервые отмеченное нами в восточной части Таганрогского залива “цветение” льда, связанное с массовым развитием планктонных диатомовых водорослей может играть существенную роль в синтезировании органического вещества в зимний и ранневесенний сезоны.

Высокие значения численности и биомассы микроводорослей в подледном планктоне, указывают на то, что даже при наличии сплошного ледового покрова в зимний период в Таганрогском заливе планктонное сообщество активно функционирует.

В заключение следует подчеркнуть, что использование термина “криофлора” для описания сообщества микроводорослей, развивающихся на льду в Азовском море, нам представляется не корректным, поскольку он подразумевает специфический состав холодолюбивых видов микроводорослей, приуроченных к ледовым субстратам. На наш взгляд, для альгоценоза, развивающегося на льду Азовского моря, предпочтительнее использовать термин “временное ледовое сообщество микроводорослей”.

Авторы благодарят экспедиционную группу ИАЗ ЮНЦ РАН и НСО МГУ, администрацию Южного научного центра РАН и НЭБ “Кагальник” за помощь в проведении исследований.

Работа выполнена в рамках базовой темы НИР ИАЗ ЮНЦ РАН “Современное состояние и многолетняя изменчивость прибрежных экосистем южных морей России” при частичной финансовой поддержке ПФИ Президиума РАН “Фунда-

ментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология” и ПФИ Отделения наук о Земле РАН “Географические основы устойчивого развития Российской Федерации и ее регионов” (Направление 8 – Стратегические ресурсы моря как основа устойчивого развития прибрежных регионов. Устойчивое использование биоресурсов моря, их охрана и восстановление).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
2. Водоросли. Справочник / Под ред. Вассер С.П. и др. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
3. Генкал С.И., Ярушина М.И. Дополнение к флоре центральных диатомовых водорослей (*Centrophuseae*) водоемов северного склона полярного Урала // Биология внутренних вод. 2010. № 3. С. 14–25.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Азовское море. Т. 5. / Ред. Терзиев Ф.С. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.
5. Ковалева Г.В. Микроводоросли бентоса, перифитона и планктона прибрежной части Азовского моря: Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05. СПб, 2006. 300 с.
6. Ковалева Г.В. Пиководоросли как компонент криоперифитона Азовского моря // Тезисы докладов международного семинара им. Г. Седова и Ф. Нансена (Ростов-на-Дону, 25–30 мая 1998 г.). Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 1998. С. 30–32.
7. Ковалева Г.В. Фитопланктон Азовского моря и прилегающих водоемов // Азовское море в конце XX – начале XXI веков: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества. Т.Х. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 134–223.
8. Ковалева Г.В., Селиванов И.П. Фитопланктон прибрежного ценоза Азовского моря в холодные сезоны года // Закономерности океанографических и биологических процессов в Азовском море. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. С. 197–212.
9. Ластивка Т.В. Зимний фитопланктон Азовского моря: особенности видового состава и пространственного распределения // Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод: Тез. докл. конф. Ярославль, 1996. С. 32–33.
10. Макаревич П.Р., Ларионов В.В. Сезонная динамика развития планктонных микроводорослей // Ком-плексный мониторинг среды и биоты Азовского бассейна. Т. VI. Апатиты: КНЦ РАН, 2004. С. 112–119.
11. Матишов Г.Г., Степаньян О.В., Поважный В.В. и др. Функционирование экосистемы Азовского моря в зимний период // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 1. С. 112–115.
12. Матишов Г.Г., Степаньян О.В., Ковалева Г.В. и др. Особенности структуры пелагического сообщества Азовского моря в условиях аномально холодной зимы 2005–2006 гг. // Вестн. ЮНЦ. 2012. № 4. С. 66–75.
13. Паутова В.Н., Горохова О.Г., Корнева Л.Г. и др. Состав и сезонная динамика доминирующих видов в фитопланктоне Ивановского водохранилища (Волжский плес) // Изв. Самарского НЦ РАН. 2009. Т. 11. № 1(4). С. 677–685.
14. Поповская Г.И., Генкал С.И., Лихошвай Е.В. Диатомовые водоросли планктона озера Байкал. Новосибирск: Наука, 2011. 192 с.
15. Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли планктона Азовского моря. М.-Л.: АН СССР, 1963. 190 с.
16. Руководство по химическому анализу морских вод, СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 263 с.
17. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов мирового океана / Под ред. Сапожникова В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
18. Сапрыгин В.В. Изучение распределения хлорофилла “а” в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений. Автореф. дис. ... канд. географ. наук: 25.00.28. Ростов-на-Дону, 2011. 24 с.
19. Студеникина Е.И., Алдакимова А.Я., Губина Г.С. Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий. Ростов-на-Дону: Эверест, 1999. 175 с.
20. Ташилькова Н.А. Экологические особенности развития фитопланктона дельтовых протоков реки Селенги и сора Черкалово (оз. Байкал). Автореф. дис. ... канд. географ. наук: 03.00.16. Улан-Удэ, 2009. 16 с.
21. Hustedt F. Bacillariophyta (Diatomeae) // Die Süßwasser Flora Mitteleuropas / Ed. Pascher A. Jena: Gustav Fischer, 1930. Heft 10. 468 p.
22. Hustedt F. Die Kieselalgen Deutschlands, Osterreichs und der Schweiz mit Berücksichtigung der ubrigen Lander Europas sowie der angrenzenden Meersgebiete. In: Dr. L. Rabenhorst's Kryptogamen-Flora von Deutschland, Osterreich und der Schweiz. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.-G., 1930. V. 7. Part 3. P. 557–816.

Temporary Ice Algae Community in the Taganrog Bay of the Azov Sea

G. V. Kovaleva, V. V. Povazhnyy, A. E. Zolotareva, P. R. Makarevich, D. G. Matishov

The temporary ice algae community in the mixing zone of brackish and fresh waters of the Taganrog Bay of the Azov Sea is described. The high abundance and biomass of planktonic algae and chlorophyll-A concentration were registered in samples of under-ice water, taken on February 2013. The mass development of diatom *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, blooming on the ice in the Eastern part of the Taganrog bay, is described for the first time. The quantitative data on under-ice microalgae community and related hydrochemistry are published. The obtained results could be used in total productivity estimates in the Azov Sea.