

УДК 579: 582.26/27+574.586

А.А. БЕГУН¹, А.Ю. ЗВЯГИНЦЕВ¹Ин-т биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН,

ул. Пальчевского, 17, 690041 Владивосток, Россия

andrejbegun@yandex.ru

ayzvyagin@gmail.org

***BACILLARIOPHYTA* ПЕРИФИТОНА ГИПЕРЭВТРОФНОЙ
ИСКУССТВЕННОЙ ЛАГУНЫ В ЧЕРТЕ Г. ВЛАДИВОСТОКА
(РОССИЙСКОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ)**

Проведено исследование видового состава и количественных характеристик диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин в гиперэвтрофной искусственной лагуне в черте г. Владивостока. Зарегистрировано 79 видов и внутривидовых таксонов *Bacillariophyta* из классов *Bacillariophyceae* (58 видов), *Fragilariophyceae* (6) и *Coscinodiscophyceae* (15). Общая плотность перифитона варьировала от 0,026 до 13,9 млн кл./м², доминировали виды-индикаторы значительного органического загрязнения вод – α -мезосапробионты (80,03 %). Среднегодовые показатели числа видов, индексов видового разнообразия Шеннона и выравнинности Пиелу диатомового перифитона были относительно низкими ($n = 9,5$, $H = 1,38$, $e = 0,39$ инф. бит/м² соответственно). Установлено, что в зимний период и в начале весны перифитон практически не развивается, что обусловлено влиянием негативных световых условий в лагуне, вызванных мощным ледоставом. Особенности количественного развития *Bacillariophyta* перифитона в течение года определяются спецификой физических и гидрологических условий лагуны, а также ее эвтрофированием канализационными сточными водами, способствующими массовому развитию видов-индикаторов значительного органического загрязнения.

Ключевые слова: лагуна, диатомовые, перифитон, сапробность, эвтрофирование, Японское море.

Введение

Прибрежные лагуны представляют собой акватории эстуарного типа, в которых процессы продуцирования органического вещества более чем в 3,5 раза превышают продуктивность собственно шельфа (Состояние ..., 2005). Мелководность лагун, совершенно не сопоставимая с глубинами шельфовой зоны морей, благоприятствует интенсивному летнему прогреву вод и возникновению специфических гидрологических и гидрохимических условий (Abreu et al., 1994). Антропогенное эвтрофирование вод, оказывающее наиболее существенное влияние на мелководные экосистемы полузакрытого типа, способствует созданию очень высокой относительной продукции органического вещества в лагунах, что определяет специфику развития водорослей в планктоне и микрофитобентосе (Kikuchi-Kawan, Kudo, 1995; Torcuoglu et al., 1999).

© А.А. Бегун, А.Ю. Звягинцев, 2013

Исследованиям микроводорослей в лагунах Дальневосточного региона России посвящено небольшое количество работ. В основном это лагуны северо-восточного Сахалина — Пильтун и Буссе (Колганова, 1987; Могильникова, Мотылькова, 2003), а также заливы лагунного типа — Чайво, Ныйский и Луньский, озера Вавайские (Коптяева, 1964; Колганова, Могильникова, 1999) и Тунайча (Мотылокова, Коновалова, 2003). Данные работы посвящены мониторинговым исследованиям фитопланктона в районах нефтегазового освоения шельфа северо-восточного Сахалина. Однако перифитонные микроводоросли, являющиеся важнейшим компонентом микрофитобентоса (Рябушко, 2009), в лагунах Дальневосточного региона России на сегодняшний день не исследованы. В литературе отсутствуют данные о видовом составе, экологии и особенностях количественного развития перифитонных диатомовых водорослей в искусственных лагунах с повышенным уровнем антропогенного эвтрофирования.

Цель работы — изучить видовой состав и особенности количественного развития *Bacillariophyta* перифитона экспериментальных пластин из асбоцемента в условиях гиперэвтрофированной искусственной лагуны в черте г. Владивостока в течение года.

Материалы и методы

Исследование диатомовых водорослей перифитона проводили на экспериментальных пластинах из асбоцемента размером 80×40×1,5 мм, которые экспонировались на глубине 1 м в течение 15 сут с июня 2006 г. по май 2007 г. в искусственной лагуне в черте г. Владивостока (рис. 1). Перед постановкой пластины зачищали наждачной бумагой до получения матовой поверхности и протирали этиловым спиртом. После каждой 15-суточной экспозиции пластин перифитон снимали целиком и пластины заменяли новыми (Бегун и др., 2009а). Смыв собирали, щетку прополаскивали, смывая в пробу оставшиеся на кисти клетки микроводорослей, фиксировали 4 %-ным раствором формалина и Утермеля до бледно-желтого цвета.

Одновременно с отбором проб измеряли температуру и соленость воды. Количественный учет клеток диатомовых водорослей проводили в трех повторностях на временных водных препаратах под световым микроскопом «Olympus BX41», объектив UPLanF1 100x/1.30 (Япония), масляная иммерсия. Клетки микроводорослей в 10 см² подсчитывали в камере Горяева с дальнейшим пересчетом на 1 м². Методика микроскопических исследований диатомовых водорослей подробно описана в предыдущей работе (Бегун и др., 2009б). Видовое разнообразие водорослей оценивали с помощью индекса Шеннона (H): $H = -\sum P_i \log_2 P_i$, где P_i — доля i -го вида в суммарной плотности. Индекс выравненности Пиелу (e) вычисляли по формуле: $e = H/\lg_2 S$, где S — общее число видов в пробе (UNEP, 1995).

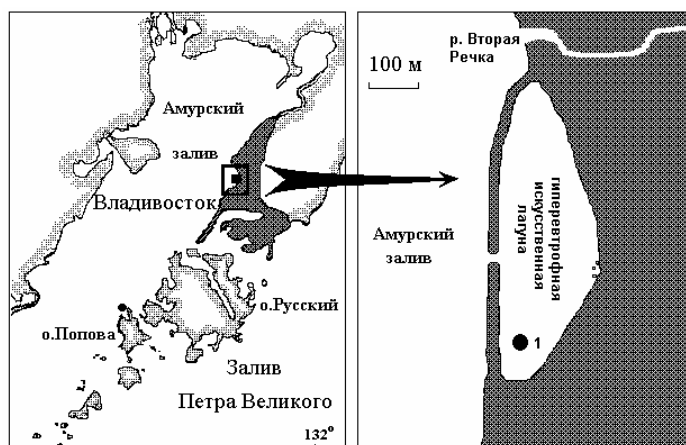


Рис. 1. Карта-схема района исследования. 1 – Станция отбора проб

При определении диатомовых водорослей использовали различные монографии, атласы и определители (Диатомовый анализ..., 1949-1950; Короткевич, 1960; Hendeу, 1964; Kuуlenstierna, 1989-1990; Intercalibration ..., 1996; Witkowski et al., 2000; Al-Yamani, Saburova, 2011). Данные о приуроченности микроводорослей к местообитанию, солености воды, сапробиологической характеристике и фитогеографической принадлежности приведены согласно работам: Vodeanu, 1970; Гусяков и др. 1992; Intercalibration ..., 1996; Герасимюк, Ковтун, 2007; Никулина, 2010; Al-Yamani, Saburova, 2011.

Искусственная лагуна, расположенная в черте г. Владивостока, представляет собой полузакрытый мелководный гиперэвтрофированный водоем, сообщающийся с Амурским заливом Японского моря через неглубокий канал. Этот водоем, площадью около 70 тыс. м², отгорожен от моря дамбой из каменной наброски и представляет собой большую береговую «ванну» (Бегун и др., 2004). Состав его биоты в целом не отличается от такового Амурского залива, однако водоем имеет некоторые специфические характеристики, присущие лагунам и эстуариям. Так, донные осадки этой лагуны представлены обильными илами, температура воды в ней превышает температуру воды в открытой части залива в среднем на 5–6 °С (максимальное зарегистрированное значение – 31 °С). Во время обильных осадков колебания солености воды в течение дня в зависимости от приливо-отливных течений могут достигать 3–22 ‰. Экологическая ситуация водоема крайне осложнена воздействием канализационных сточных вод, сбрасываемых во Вторую Речку, устье которой расположено всего в 500 м от канала, соединяющего водоем с заливом (Звягинцев, Кондратьева, 2002). В результате этого загрязненные сточные воды беспрепятственно проникают в лагуну.

Изолированность этого водоема от морских вод Амурского залива обеспечивает стабилизацию водной толщи, которая рассматривается как важнейший физический фактор, благоприятствующий массовому разви-

тию микроводорослей (Бегун и др., 2004). Стабильность водной толщи, наряду с обилием биогенных минеральных и растворенных органических веществ, поступающих с канализационными стоками в течение года, способствует повышению трофности вод лагуны до гиперэвтрофного уровня (Polge et al., 2010). Кроме того, донные отложения этого водоема, представленные обильными илами, можно рассматривать как «депо» биогенных веществ, усиливающих вторичное загрязнение водных масс и способствующих высокой концентрации биогенов в воде, что приводит к массовому развитию микроводорослей (Коновалова, 1999).

В сточных водах Второй Речки концентрация аммонийного азота и значения биологического потребления кислорода (БПК) постоянно превышали санитарные нормы (Огородникова и др., 1997). В этом районе Амурского залива существует зона с постоянно высоким уровнем химического загрязнения воды. Содержание кремния (1260 мкг/л), аммонийного азота (730 мкг/л) и нитритов (48 мкг/л) превышают ПДК на фоне относительно низкой солености, что указывает на высокое содержание растворенных органических веществ (РОВ) в воде. Также в этом районе отмечено повышенное содержание нефтепродуктов и других токсичных соединений (хлорорганические пестициды, детергенты) в воде и донных осадках (Отчет ..., 1994). Последние исследования процесса эвтрофикации Амурского залива также показали наличие аномально высоких концентраций неорганических форм азота, фосфора, кремния и гипоксию придонных вод в приустьевом районе Второй Речки (Звалинский и др., 2012).

Результаты и обсуждение

В перифитоне экспериментальных пластин, экспонируемых в лагуне в период с июня 2006 г. по май 2007 г., зарегистрировано 79 видов и внутривидовых таксонов диатомовых водорослей из классов *Bacillariophyceae* (58 видов), *Fragilariophyceae* (6) и *Coscinodiscophyceae* (15) (см. таблицу). По количеству таксонов доминировал род *Nitzschia* Hassall (9 видов). Основу диатомовой альгофлоры составляли 6 ведущих семейств: *Fragilariaceae*, *Achnanthaceae*, *Naviculaceae*, *Pleurosigmales*, *Catenulaceae* и *Bacillariaceae*, для которых было характерно наибольшее видовое разнообразие.

Экологический анализ диатомового перифитона показал, что найденные виды микроводорослей представлены свободноживущими формами (44,7 % общего числа видов с известной экологической характеристикой), прикрепленными (14,5 %), а также формами, способными вести как прикрепленный, так и свободноживущий образ жизни (32,9 %) (см. таблицу). Шовные диатомовые водоросли, как более высокоорганизованные, были самыми многочисленными в видовом отношении, поскольку ведут одиночный подвижный образ жизни на субстратах различного типа, в т. ч. на экспериментальных пластинах из различного материала.

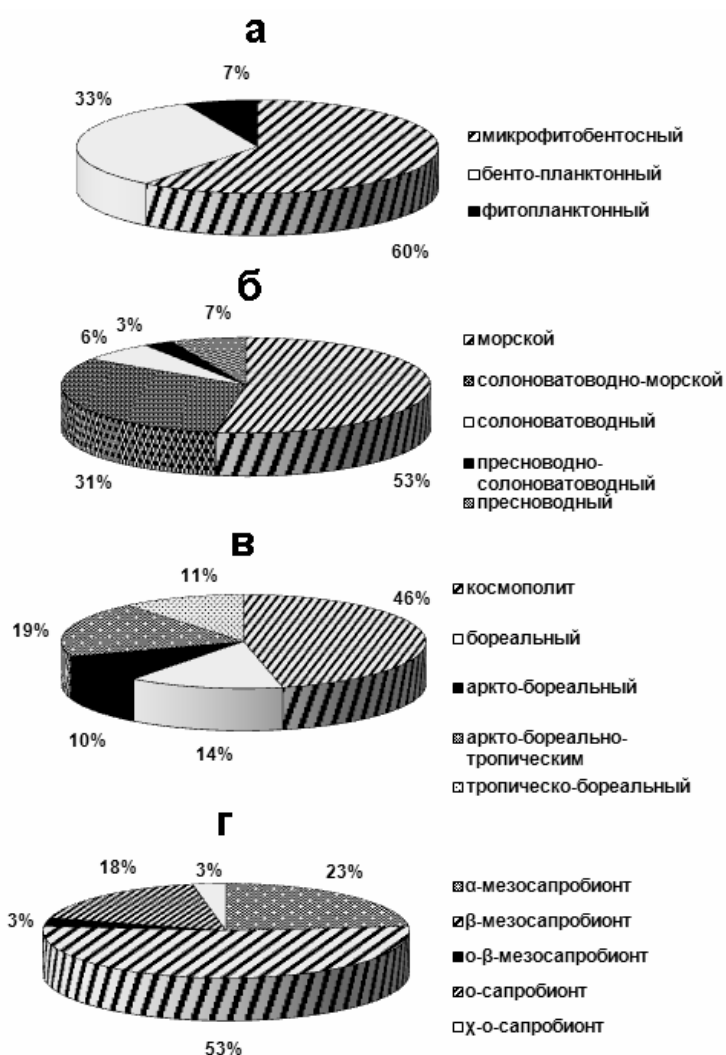


Рис. 2. Эколого-географическая структура диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин в гиперэвтрофной искусственной лагуне в черте г. Владивостока с июня 2006 г. по май 2007 г. Приуроченность к биотопу (А), солености (Б), В – фитогеографическая принадлежность, Г – сапробиологическая характеристика

Характеристика перифитона лагуны по отношению к местообитанию показывает, что 60 % видов являются микрофитобентосными, 33 % относятся к бенто-планктонным (тихопелагическим) и 7 % – к истинно планктонным (рис. 2). Из всех видов к типичным эпифитам и обрастателям, развивающимся на макрофитах или твердых субстратах, относятся 12 видов диатомовых водорослей. Значительная часть видов (29)

Видовой состав и эколого-географическая характеристика *Bacillariophyta* перифитона экспериментальных пластин в гиперэвтрофной искусственной лагуне в черте г. Владивостока в 2006–2007 гг.

Таксон	Экологическая характеристика			Географическая характеристика	Встречаемость, %			
	Жизненная форма	Соленость	Сапробность		Лето	Осень	Зима	Весна
BACILLARIOPHYTA								
<i>Coscinodiscophyceae</i>								
<i>Coscinodiscales</i>								
<i>Coscinodiscaceae</i>								
<i>Coscinodiscus oculus iridis</i> (Ehrenb.) Ehrenb.	БП	М	β	К	16,6	-	-	-
<i>Aulacoseirales</i>								
<i>Aulacoseiraceae</i>								
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenb.) Simonsen	ФП	П	β	К	-	16,6	16,6	-
<i>Arachnoidiscales</i>								
<i>Arachnoidiscaceae</i>								
<i>Arachnoidiscus ehrenbergii</i> Bailey ex Ehrenb.	БП	М	-	К	33,3	-	-	-
<i>Heliopeltaceae</i>								
<i>Actinoptychus senarius</i> (Ehrenb.) Ehrenb.	БП	М	-	К	50	50	33,3	-
<i>Thalassiosirales</i>								
<i>Skeletonemaceae</i>								
<i>Skeletonema costatum</i> (Grev.) Cleve	ФП	СМ	α	К	33,3	16,6	16,6	-

Stephanodiscaceae								
<i>Cyclotella caspia</i> Grunow	ФП	С	-	К	16,6	16,6	-	-
Biddulphiales								
Biddulphiaceae								
<i>Biddulphia arctica</i> f. <i>balaena</i> (Ehrenb.) E.H. Jörgens.	МФБ	М	-	АБТ	16,6	-	-	-
<i>B. biddulphiana</i> (J.E. Smith) Boyer	БП	М	-	БТ	-	33,3	-	-
<i>Neohuttonia reichardtii</i> (Grunow) Hust.	МФБ	М	-	-	16,6	-	-	-
Triceratiales								
Triceratiaceae								
<i>Auliscus sculptus</i> (W. Sm.) Brightw.	ФП	М	-	К	33,3	16,6	-	-
<i>Odontella aurita</i> (Lyngb.) Agardh	БП	М	-	К	-	16,6	16,6	-
Plagiogrammaceae								
<i>Plagiogramma staurophorum</i> (Greg.) Heib.	БП	М	-	К	-	-	16,6	-
Cymatosirales								
Cymatosiraceae								
<i>Plagiogrammopsis vanheurckii</i> (Grunow) Hasle, von Stosch & Syvertsen	БП	М	-	Б	-	-	16,6	16,6
Melosirales								
Melosiraceae								
<i>Melosira lineata</i> (Dillw.) Agardh	БП	СМ	α	АБТ	83,3	100	16,6	16,6
<i>M. moniliformis</i> (O.F. Müll.) Agardh	БП	СМ	α	К	50	16,6	-	33,3
<i>M. moniliformis</i> var. <i>subglobosa</i> Grunow	БП	СМ	α	АБ	33,3	50	16,6	16,6
Fragilariophyceae								
Fragilariales								

продолжение таблицы

Таксон	Экологическая характеристика			Географическая характеристика	Встречаемость, %			
	Жизненная форма	Соленость	Сапробность		Лето	Осень	Зима	Весна
Fragilariaceae								
<i>Asterionella formosa</i> Hassal	ФП	П	о	К	-	-	16,6	16,6
<i>Fragilaria capucina</i> Desm.	БП	ПС	о-β	К	-	-	-	16,6
<i>F. striatula</i> Lyngb.	БП	М	-	К	-	-	-	33,3
<i>Tabularia fasciculata</i> (Agardh) Williams et Round	МФБ	СМ	α	К	100	100	33,3	33,3
Licmophorales								
Licmophoraceae								
<i>Licmophora abbreviata</i> Agardh	МФБ	М	β	АБ	16,6	33,3	16,6	-
<i>L. flabellata</i> Agardh	МФБ	М	β	БТ	16,6	16,6	-	-
Bacillariophyceae								
Cymbellales								
Rhoicospheniaceae								
<i>Gomphonemopsis exigua</i> (Kütz.) Medlin	МФБ	СМ	-	Б	-	-	-	16,6
<i>Rhoicosphenia marina</i> (W. Sm.) M. Schmidt	МФБ	М	β	АБ	50	16,6	-	16,6
Eunotiales								
Eunotiaceae								
<i>Eunotia</i> sp.	-	-	-	-	-	-	16,6	-
Achnanthes								

Achnantheaceae								
<i>Achnanthes brevipes</i> C. Agardh	МФБ	СМ	β	К	83,3	50	33,3	16,6
<i>A. brevipes</i> var. <i>angustata</i> (Grev.) Cleve	МФБ	С	β	К	-	-	16,6	16,6
<i>A. coarctata</i> (Bréb. ex W. Sm.) Grunow	МФБ	П	-	БТ	-	-	16,6	-
<i>A. longipes</i> C. Agardh	МФБ	СМ	β	К	-	16,6	16,6	-
Naviculales								
Berkeleyaceae								
<i>Parlibellus delognei</i> E.J. Cox	МФБ	М	—	АБТ	50	83,3	16,6	16,6
<i>P. rhombica</i> (Greg.) L.I. Ryab.	МФБ	СМ	—	Б	50	33,3	16,6	-
Diploneidaceae								
<i>Diploneis chersonensis</i> (Grunow) Cleve	МФБ	М	-	К	16,6	-	-	-
<i>D. smithii</i> (Bréb.) Cleve	МФБ	СМ	—	К	16,6	-	-	-
Naviculaceae								
<i>Navicula cryptocephala</i> Kütz.	МФБ	ПС	α	АБ	16,6	16,6	-	-
<i>N. directa</i> (W. Sm.) Ralfs ex Pritch.	МФБ	М	—	К	-	16,6	-	-
<i>N. retusa</i> var. <i>cancellata</i> (Bréb.) Cleve	МФБ	СМ	-	К	16,6	-	-	+
<i>N. transitans</i> var. <i>derasa</i> (Grunow) Cleve	БП	М	-	АБ	-	16,6	50	50
<i>Caloneis liber</i> (W. Sm.) Cleve	МФБ	М	-	К	-	16,6	16,6	-
<i>Haslea subagnita</i> (Proschk.-Lavr.) I.V. Makar. et N.I. Karaeva	МФБ	М	-	Б	-	-	-	16,6
<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenb.) Cleve	МФБ	М	β	АБТ	100	100	50	33,3
Lyrellales								
Lyrellaceae								
<i>Lyrella hennedyi</i> (W. Sm.) Stickle & D.G. Mann in F.E. Round, R.M. Crawford & D.G. Mann	МФБ	М	-	АБТ	33,3	-	-	-

продолжение таблицы

Таксон	Экологическая характеристика			Географическая характеристика	Встречаемость, %			
	Жизненная форма	Соленость	Сапробность		Лето	Осень	Зима	Весна
Plagiotropidaceae								
<i>Plagiotropis elegans</i> (W. Sm.) Grunow	МФБ	М	о	Б	+	+	-	-
Pleurosigmataceae								
<i>Donkinia recta</i> (Donkin) Grunow	БП	М	-	БТ	-	16,6	-	-
<i>Gyrosigma balticum</i> (Ehrenb.) Rabenh.	МФБ	СМ	-	К	-	16,6	-	-
<i>G. fasciola</i> (Ehrenb.) Griff. et Henfr.	МФБ	СМ	-	АБ	33,3	83,3	16,6	-
<i>G. tenuissimum</i> (W. Sm.) Griff. et Henfr.	МФБ	М	-	АБТ	33,3	-	-	-
<i>Pleurosigma elongatum</i> W. Sm.	МФБ	М	-	БТ	16,6	33,3	16,6	50
<i>P. intermedium</i> W. Sm.	МФБ	СМ	-	Б	50	83,3	16,6	33,3
<i>P. naviculaceum</i> Bréb.	МФБ	М	-	АБТ	83,3	83,3	33,3	16,6
Thalassiophysales								
Catenulaceae								
<i>Amphora angusta</i> Greg.	МФБ	СМ	β	К	83,3	50	16,6	16,6
<i>A. hyalina</i> Kütz.	МФБ	М	β	К	50	33,3	-	-
<i>A. ovalis</i> (Kütz.) Kütz.	МФБ	П	χ-о	Б	33,3	-	-	-
<i>A. proteus</i> Greg.	МФБ	М	β	К	50	16,6	16,6	-
<i>Undatella lineolata</i> (Ehrenb.) L.I. Ryab.	МФБ	СМ	β	АБТ	33,3	16,6	-	16,6
Thalassiophysaceae								
<i>Thalassiophysa hyalina</i> (Grev.) Paddock & P.A. Sims	БП	М	-	БТ	-	-	-	+

Bacillariales								
Bacillariaceae								
<i>Bacillaria paxillifer</i> (O.F. Müll.) Hendey	БП	СМ	o	К	33,3	33,3	33,3	16,6
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenb.) Reim. et Lewin	БП	СМ	β	АБ	83,3	33,3	-	16,6
<i>Nitzschia angularis</i> W. Sm.	МФБ	М	α	К	-	-	-	16,6
<i>N. hybrida</i> f. <i>hyalina</i> Proschk.–Lavr.	МФБ	С	β	Б	50	100	-	-
<i>N. longissima</i> (Bréb. ex Kütz.) Ralfs ex Pritch.	БП	СМ	—	АБТ	33,3	50	-	16,6
<i>N. sigma</i> (Kütz.) W. Sm.	МФБ	СМ	o	К	16,6	-	-	-
<i>N. sigmoidea</i> (Ehrenb.) W. Sm.	МФБ	СМ	o	К	16,6	33,3	-	-
<i>N. tenuirostris</i> Mereschk.	БП	СМ	-	К	-	-	-	16,6
<i>N. vermicularis</i> (Kütz.) Hantzsch ex Rabenh.	МФБ	СМ	o	К	16,6	16,6	-	-
<i>N. vidovichii</i> Grunow	МФБ	М	-	БТ	-	16,6	16,6	-
<i>Nitzschia</i> sp.	-	-	-	-	-	-	33,3	16,6
<i>Psammodyction panduriforme</i> (Greg.) D.G. Mann	МФБ	М	—	АБТ	-	33,3	-	-
<i>Tryblionella coarctata</i> (Grunow) D.G. Mann	МФБ	М	α	АБТ	-	16,6	-	-
Surirellales								
Surirellaceae								
<i>Campylodiscus fastuosus</i> Ehrenb.	МФБ	М	-	Б	-	-	-	16,6
<i>Surirella fastuosa</i> Ehrenb.	МФБ	М	—	АБТ	-	-	16,6	-
Entomoneidaceae								
<i>Entomoneis alata</i> (Ehrenb.) Ehrenb.	БП	С	-	АБТ	-	16,6	-	16,6
<i>E. paludosa</i> (W. Sm.) Reim.	БП	С	-	К	16,6	-	-	-
Tabellariales								
Tabellariaceae								
<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz.	БП	П	β	К	-	-	-	16,6
Anaulales								
Anaulaceae								
<i>Anaulus vallus</i> Nikolaev	МФБ	М	-	Б	16,6	-	-	16,6

Таксон	Экологическая характеристика			Географическая характеристика	Встречаемость, %			
	Жизненная форма	Соленость	Сапробность		Лето	Осень	Зима	Весна
<i>Ardissoneales</i>								
<i>Ardissoneaceae</i>								
<i>Ardissonea crystallina</i> (Agardh) Grunow	МФБ	М	β	БТ	16,6	33,3	-	16,6
<i>Striatellales</i>								
<i>Striatellaceae</i>								
<i>Grammatophora marina</i> (Lyngb.) Kütz.	МФБ	М	β	К	16,6	16,6	16,6	16,6
<i>Striatella unipunctata</i> (Lyngb.) Agardh	БП	М	—	БТ	33,3	16,6	-	16,6
<i>Rhabdonematales</i>								
<i>Rhabdonemataceae</i>								
<i>Rhabdonema arcuatum</i> (Lyngb.) Kütz.	БП	М	—	К	16,6	33,3	16,6	16,6
<i>Thalassionematales</i>								
<i>Thalassionemataceae</i>								
<i>Thalassionema nitzschioides</i> Grunow	БП	СМ	—	АБТ	33,3	16,6	-	16,6
Условные обозначения. Приуроченность к местообитанию: МФБ – микрофитобентосный, БП – бенто-планктонный, ФП – фитопланктонный. Отношение к солености: М – морской, СМ – солоноватоводо-морской, С – солоноватоводный, ПС – пресноводно-солоноватоводный, П – пресноводный. Сапробиологическая приуроченность: α – альфа-мезосапробионт, β – бета-мезосапробионт, χ-ο – ксеноолигосапробионт, ο – олигосапробионт. Фитогеографическая характеристика: К – космополит, Б – boreальный, АБ – аркто-boreальный, АБТ – аркто-boreально-тропический, БТ – boreально-тропический.								

принадлежит к бентосным, развивающимся на песчаных и илистых грунтах, попадающих на субстрат в период взмучивания вод, либо осевшим из толщи воды.

По отношению к солености преобладают эвригалинные виды, из них морские составляют 53 % и солоноватоводно-морские – 31 %. В меньшей степени представлены солоноватоводные формы (6 %), пресноводно-солоноватоводные (3 %) и пресноводные (7 %) (см. рис. 2).

Значительная доля солоноватоводно-морских диатомей, встречающихся почти круглогодично, обусловлена пониженной соленостью воды в лагуне, которая большую часть исследуемого периода варьировала от 20 до 30 ‰, и только в ноябре и первой половине февраля соответствовала морской (32–33,5 ‰). Преобладание в годовой динамике перифитона солоноватоводно-морских диатомей обусловлено их наибольшей пластичностью и приспособляемостью к солевому режиму в условиях мелководных лагун и других акваторий лагунного типа (Могильникова, 1999; Могильникова, Мотылькова, 2003).

Обзор флоры диатомовых водорослей лагуны показал, что из всех встреченных видов 46 % составляют космополитные формы, 14 % – бореальные, 19 % – аркто-бореально-тропические, 11 % – тропическо-бореальные и 10 % – аркто-бореальные (см. рис. 2). По отношению к рН среды обитания преобладают алкалофильные виды микроводорослей (99 %), кроме вида *Tabularia fasciculata*, который является индифферентом. Среди зарегистрированных в лагуне диатомовых водорослей выявлено 34 вида, являющихся индикаторами органического загрязнения вод. Из них по числу видов преобладали индикаторы умеренного загрязнения – β-мезосапробионты (53 % в среднем по станциям), а также индикаторы значительного органического загрязнения – α-мезосапробионты (23 %) (см. рис. 2). В меньшей степени были представлены индикаторы слабого загрязнения – о-сапробионты (18 %), χ-о-сапробионты (3 %) и о-β-мезосапробионты (3 %).

Анализ статистической достоверности количественных характеристик перифитона показал, что минимальная изменчивость плотности поселения микроводорослей была характерна в основном для тех видов, которые доминировали в период отбора проб. Причем, чем выше у таких видов относительная плотность, тем меньше вариабельность ее абсолютных величин. Кроме того, вариации показателей плотности клеток микроводорослей, а также их экологических индексов Шеннона и Пиелу были незначительны: стандартная ошибка не превышала 9 %, изменяясь в пределах 2–4 %.

Количественные показатели видов-индикаторов значительного органического загрязнения вод α-мезосапробионтов были максимальными, составляя в среднем за год 80,03 % плотности всех микроводорослей с известной характеристикой. Максимум α-мезосапробионтов зарегистрирован в октябре (12,03 млн кл./м²) благодаря развитию диатомовых водорослей *Melosira moniliformis* var. *subglobosa*, *M. lineata*, *T. fasciculata* и *Skeletonema costatum* (рис. 3). Эти микроводоросли способны доминиро-

вать в эвтрофных зонах морей и лагун, имеющих сходные гидрологические условия среды и высокий уровень антропогенного загрязнения вод (Рябушко, 2004; Aberle, Wiltshire, 2006). Доля плотности индикаторов умеренного загрязнения β -мезосапробионтов была значительно ниже (19,54 %). Самой низкой оказалась доля индикаторов слабого органического загрязнения – α -сапробионтов (0,41 %). Остальные индикаторы вносили незначительный вклад в общую плотность диатомового перифитона (не более 0,018 %).

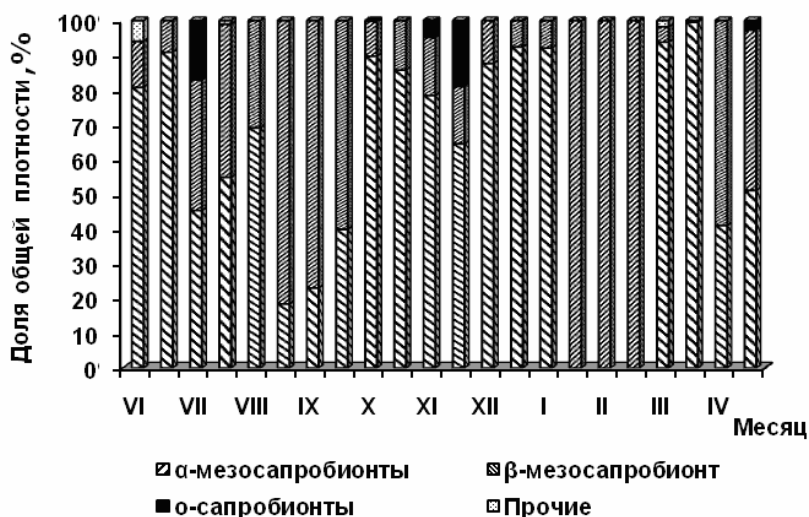


Рис. 3. Соотношение плотности основных групп индикаторов органического загрязнения среди диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин в гиперэвтрофной искусственной лагуне в черте г. Владивостока с июня 2006 г. по май 2007 г.

Число видов диатомовых водорослей существенно изменялось в течение года (от 3 до 16). Высокая частота встречаемости характерна в основном для диатомовых водорослей *Tabularia fasciculata* (100 %), *Melosira moniliformis* var. *subglobosa* (88,4 %), *Pleurosigma naviculaceum* (80,7 %), *M. lineata* (79,2 %), *Grammatophora marina* (79,2 %), *P. intermedium* (76,4 %), *Rhabdonema arcuatum* (76,4 %), *Achnanthes brevipes* (70,3 %), *Amphora angusta* (70,6 %).

Средняя плотность диатомовых водорослей перифитона лагуны за период исследования составила 4,17 млн кл./м², видовое разнообразие было относительно низким на фоне слабой выравненности распределения видов по рангам, среднегодовые показатели составили: индекс Шеннона $H = 1,38$, индекс Пиелу $e = 0,39$ инф. бит. Низкие показатели индексов видового разнообразия свидетельствуют об упрощенной структуре перифитона, в которой выражено преобладание одного-двух доминирующих таксонов. Это связано со специфическими условиями, формирующимися под действием сложной системы гидро-

логических параметров в совокупности с различными абиотическими факторами среды и стрессовым влиянием антропогенного эвтрофирования вод (Петров и др., 2005). Согласно литературным данным, в прибрежных акваториях зал. Петра Великого Японского моря с высоким уровнем химического, нефтяного и термального загрязнения также отмечалось снижение индексов видового разнообразия и выравнивания диатомовых водорослей перифитона (Бегун и др., 2009а, б; Бегун, Звягинцев, 2010).

Анализ сезонной динамики обилия диатомового перифитона показал, что общая плотность микроводорослей составляла 0,026–13,9 млн кл./м² (рис. 4). Самый высокий максимум плотности наблюдался во второй половине октября (13,92 млн кл./м²) и был связан с массовым оседанием на экспериментальные пластины бенто-планктонных диатомовых водорослей *Melosira moniliformis* var. *subglobosa* (1,96 млн кл./м²) и *M. lineata* (9,77 млн кл./м²) при температуре воды 9 °С и солености 27 ‰. Второе увеличение плотности было представлено двумя, почти равными по величине максимумами – в первой и второй половине декабря (11,01 и 10,75 млн кл./м² соответственно) за счет массового оседания мелкоклеточной диатомовой *Navicula transitans* var. *derasa* (10,75–7,69 млн кл./м²) на фоне относительно высоких показателей индексов видового разнообразия Шеннона (2,44 инф. бит) и выравнивания Пиелу (0,88 инф. бит) (см. рис. 4), при отрицательной температуре воды (-1,6 – -1,8 °С) и морской солености (32–33,5 ‰).

Минимальные показатели плотности перифитона отмечены во второй половине февраля (0,026 млн кл./м²) (см. рис. 4, б). В этот период в лагуне прослеживалось очень слабое оседания на пластины пресноводной диатомовой водоросли *Asterionella formosa* (0,014 млн кл./м²) на фоне почти полного опреснения воды (2 ‰), низких показателей индексов Шеннона и Пиелу (0,53 и 0,07 инф. бит соответственно) и резкого снижения числа видов (3) (см. рис. 4).

Опреснение в феврале было связано с мощным выносом в лагуну пресных сточных вод из приустьевой зоны Второй Речки, что наблюдалось даже визуально в виде промоин среди льда в результате проникновения термально загрязненных вод из канализационного выпуска «Вторая Речка» г. Владивостока. Это обусловлено тем, что при сильном опреснении и загрязнении акваторий неочищенными сточными водами происходит сокращение фотического слоя, образование аноксических и гипоксических зон и восстановительных условий, где количественный рост микроводорослей существенно угнетен (Кузьминова, Руднева, 2005).

С января по март в лагуне при максимальной толщине ледостава 1,5 м были отмечены самые низкие значения плотности перифитонных диатомовых водорослей за год (0,087–0,48 млн кл./м²) (см. рис. 4). В этот период наблюдалось очень слабое оседание на экспериментальных

пластинах диатомей *Tabularia fasciculata*, *Navicula transitans* var. *derasa*, а также мелкоклеточных *Eunotia* sp. и *Nitzschia* sp. Угнетенная вегетация перифитонных микроводорослей в этот период связана с тем, что большинство диатомовых водорослей принадлежат к светолюбивым автотрофам, не способным развиваться в отсутствие света даже при благоприятных гидрологических условиях и обилии биогенов в водной толще (Планктон ..., 1993).

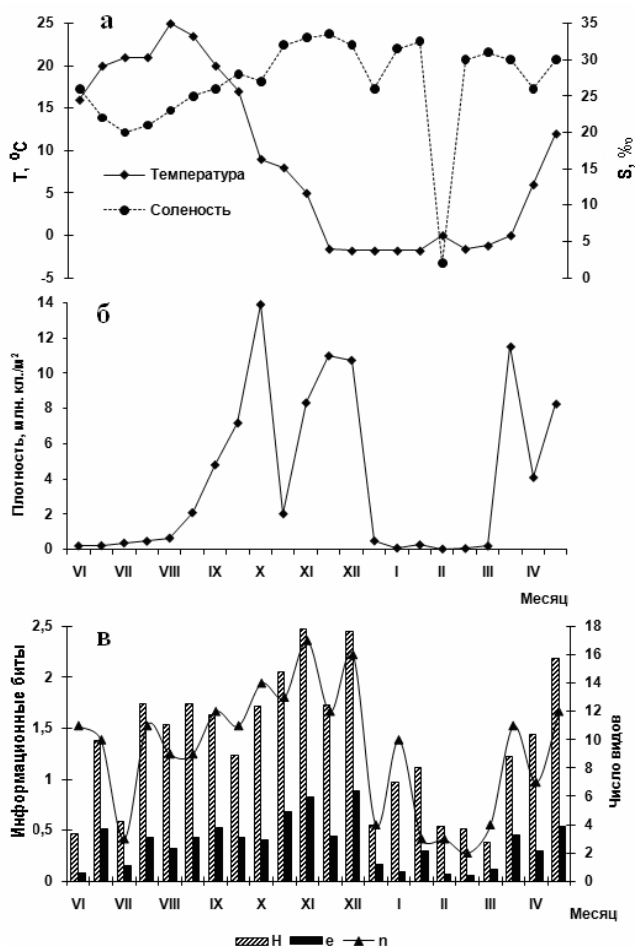


Рис. 4. Динамика показателей температуры и солености воды (а), общей плотности (б) и индексов видового разнообразия Шеннона (H), выравненности Пиелу (e) и числа видов n диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин в гиперэвтрофной искусственной лагуне в черте г. Владивостока с июня 2006 г. по май 2007 г.

Согласно литературным данным (Бегун, 2007), в фитопланктоне лагуны в период гидрологической зимы (январь–март) прослеживается иная закономерность в развитии микроводорослей. Так, в эти месяцы в

количественном развитии преобладает комплекс холодноводных тенелюбивых диатомей, способных развиваться в толще воды в условиях слабой освещенности, но не способных оседать на экспериментальные пластины и другие субстраты вследствие особенностей жизненных форм (Kikuchi-Kawan, Kudo, 1995). Специфика подледного фотосинтеза и деструкции органического вещества для фитопланктона состоит в том, что эти процессы, как правило, локализуются в порах нижней поверхности льда или непосредственно на границе раздела вода/лед (Звалинский и др., 2012). Учитывая данные особенности, слабое количественное развитие микроводорослей на экспериментальных пластинах в зимне-весенний период вполне закономерно.

В первой половине апреля наблюдался третий максимум плотности перифитона (11,5 млн кл./м²), который в целом обусловлен видами, характерными для осеннего периода: *Melosira moniliformis* (4,22 млн кл./м²), *M. lineata* (1,23 млн кл./м²) и *Nitzschia* sp. (4,16 млн кл./м²) на фоне увеличения индексов Шеннона и Пиелу (1,21 и 0,45 инф. бит соответственно) (см. рис. 4). Резкий рост количественных показателей диатомовых водорослей перифитона, общего числа его видов и индексов видового разнообразия прослеживались сразу же после разрушения ледостава, повышения температуры воды и, соответственно, оптимизации световых условий в лагуне. Кроме того, постоянное поступление в этот водоем растворенного органического вещества в составе канализационного выпуска «Вторая Речка» (Звалинский и др., 2012) в условиях ограниченного водообмена в лагуне способствовало росту количественных показателей перифитона. Это происходило на фоне дефицита минеральных соединений азота и фосфора, наблюдающегося после зимне-весеннего «цветения» фитопланктона и исчерпания биогенов в воде (Коновалова, 1999).

Количественному преобладанию в перифитоне лагуны диатомовой водоросли *Skeletonema costatum* и других α -мезосапробионтов в течение большей части года способствовали высокие концентрации биогенных органических соединений, а также значительная прогреваемость водной толщи, что привело к развитию других диатомовых водорослей с высокими индексами сапробности (Бегун, 2007; Stonik, Orliwa, 2002). Бентопланктонные диатомовые водоросли *M. moniliformis* var. *subglobosa* и *M. lineata*, являющиеся почти постоянными доминантами перифитона в лагуне, также способны ассимилировать органическое вещество из воды, переходить к гетеротрофному типу питания и выступать в качестве индикаторов биогенного загрязнения водной среды (Рябушко, 2003; Миронов и др., 2008).

Заключение

Изучение видового разнообразия диатомовых водорослей перифитона в условиях гиперэвтрофной искусственной лагуны позволило установить 79 видов и внутривидовых таксонов диатомовых водорослей из классов

Bacillariophyceae (58 видов), *Fragilariophyceae* (6) и *Coscinodiscophyceae* (15). Среднее число видов диатомовых водорослей за период исследования было относительно низким (9,5). Низкие значения имели также индексы видового разнообразия ($H = 1,38$ инф. бит) и выравненность распределения видов по рангам ($e = 0,39$ инф. бит). Это свидетельствует об упрощенной экологической структуре перифитонного сообщества, обусловленной стрессовыми условиями в лагуне. Эти условия в значительной степени складываются под влиянием расположенного вблизи лагуны выпуска канализационного стока «Вторая Речка» с повышенной концентрацией аммонийного азота, фосфора, нитритов и РОВ, превышающей критические значения в 3–6 раз (Звалинский и др., 2012).

Средняя плотность видов-индикаторов значительного органического загрязнения вод (α -мезосапробионтов) составляла 80,03 % плотности всех микроводорослей, что свидетельствует о высоком уровне биогенного загрязнения вод лагуны большую часть года. В зимний период и в начале весны (март) при максимальной толщине ледостава, препятствующего проникновению солнечного света в водную толщу лагуны, перифитон на экспериментальных пластинах практически не развивается ($0,026$ – $0,27$ млн кл./м²). В апреле, после разрушения ледостава, повышения температуры воды и оптимизации световых условий резко возрастают количественные показатели перифитонных микроводорослей.

Таким образом, исследования диатомового перифитона экспериментальных пластин, проведенные в гиперэвтрофной искусственной лагуне в черте Владивостока, показали некоторые особенности развития диатомовых водорослей. Они обусловлены спецификой физических и гидрологических условий лагуны, представляющей собой большую береговую «ванну» с ограниченным водообменом, негативными световыми условиями, возникающими в период максимального ледостава, а также высоким уровнем биогенного загрязнения водоема канализационными сточными водами. Дальнейшие исследования лагуны как модельного водоема со специфическими условиями среды представляют несомненный интерес, связанный с изучением влияния отдельных компонентов сточных вод на количественное развитие диатомовых водорослей.

Работа выполнена при поддержке Проекта программы развития ООН и Глобального экологического фонда «Укрепление морских и прибрежных особо охраняемых территорий России», грантов РФФИ № 10-04-01438-а, РФФИ № 11-04-00618-а и ДВО № 12-1-ОБН-09, № 12-1-П4-02, № 12-1-П30-09

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бегун А.А. Состав и количественные характеристики микроводорослей планктона и перифитона в заливе Петра Великого (Японское море): Автореф. дис ... канд. биол. наук. – Владивосток, 2007. – 18 с.

- Бегун А.А., Звягинцев А.Ю. Биоиндикация качества морской среды по диатомовым водорослям в обрастании антропогенных субстратов // Изв. ТИНРО. – 2010. – **161**. – С. 177–198.
- Бегун А.А., Орлова Т.Ю., Селина М.С. Случай «цветения» воды в Амурском заливе Японского моря, вызванный динофитовой водорослью *Oxvrrhis marina* Dujardin, 1841 // Биол. моря. – 2004. – **30**, № 2. – С. 68–71.
- Бегун А.А., Рябушко Л.И., Звягинцев А.Ю. Состав и количественные характеристики микроводорослей перифитона экспериментальных пластин из разных по степени трофности акваторий залива Петра Великого (Японское море) // Альгология. – 2009а. – **19**, № 3. – С. 257–272.
- Бегун А.А., Звягинцев А.Ю., Мощенко А.В. Состав, обилие и динамика сообществ микроводорослей перифитона в прибрежных водах некоторых акваторий залива Петра Великого Японского моря // Изв. ТИНРО. – 2009б. – **157**. – С. 50–79.
- Герасимюк В.П., Ковтун О.А. Микроскопические водоросли Тилигульского лимана (Черное море, Украина) // Альгология. – 2007. – **17**. № 1. – С. 42–52.
- Гуляков Н.Е., Загордонец О.А., Герасимюк В.П. Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Чёрного моря и прилегающих водоемов. – Киев: Наук. думка, 1992. – 112 с.
- Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Кн. 2. – Л.: Госиздат, 1949. – 238 с.
- Диатомовый анализ. Кн. 3. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. – Л.: Госиздат, 1950. – 398 с.
- Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я. Эвтрофикация Амурского залива / Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря: монография. – Владивосток: Издат. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – С. 76–114.
- Звягинцев А.Ю., Кондратьева Е.С. Видовой состав и сезонная динамика уловов ихтиофауны полузакрытого морского водоема в черте г. Владивосток (Амурский залив, Японское море) в условиях антропогенной эвтрофикации // Изв. ТИНРО. – 2002. – **130**. – С. 509–518.
- Колганова Н.Т. Сезонная характеристика планктона лагуны Буссе (залив Анива) // Итоги исследований по вопросам рационального использования и охраны водных, земельных и биологических ресурсов Сахалина и Курильских островов: Тез. докл. III науч.-практ. конф. (27–28 марта 1987 г.). – Южно-Сахалинск, 1987. – С. 124–136.
- Колганова Н.Т., Могильникова Т.А. О фитопланктоне Ныйского залива в августе-сентябре 1996 и 1997 гг. // Мат. XXXIII науч.-метод. конф. (апр., 1998 г.): Доклады. Ч. 2. – Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 1999. – С. 110–112.
- Коновалова Г.В. «Красные приливы» и «цветение» воды в дальневосточных морях России и прилегающих акваторий Тихого океана // Биол. моря. – 1999. – **25**, № 4. – С. 263–273.
- Коптяева Т.Ф. Фитопланктон Вавайских озер Южного Сахалина // Озера Южного Сахалина и их ихтиофауна. – М.: Изд-во МГУ, 1964. – С. 141–153.
- Короткевич О.С. Диатомовая флора литорали Баренцева моря // Тр. ММБИ. – 1960. – Вып. 1. – С. 68–338.

- Кузьминова Н.С., Руднева И.И. Влияние сточных вод на морские водоросли // Альгология. — 2005. — **15**, № 1. — С. 128–141.
- Миронов О.Г., Муравьева И.П., Миронова Т.О. Санитарно-биологические показатели морской воды бухты Артиллерийской Черного моря // Мор. экол. журн. — 2008. — 7, № 2. — С. 59–63.
- Могильникова Т.А., Мотылькова И.В., Латковская Е.М. Летний фитопланктон Ныйского залива в условиях антропогенного загрязнения // Прибрежное рыболовство — XXI век: Тез. Междунар. науч.-практ. конф. — Южно-Сахалинск: Сах. обл. кн. изд-во, 2001. — С. 74–75.
- Могильникова Т.А., Мотылькова И.В. Летний фитопланктон лагуны Пильтун (Северо-восточный Сахалин) // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 2. — Владивосток: Дальнаука, 2003. — С. 295–303.
- Мотылькова И.В., Коновалова Н.В. Весенний фитопланктон озера Тунайча (южный Сахалин) // Чтения памяти В.Я. Леванидова. Вып. 2. — Владивосток: Дальнаука, 2003. — С. 287–294.
- Никулина Т.В. Водоросли горячих источников Курильских островов (Россия) // Альгология. — 2010. — **20**, № 3. — С. 257–272.
- Огородникова А.А., Вейдман Е.Л., Силина Э.И., Нигиматулина Л.В. Воздействие береговых источников загрязнения на биоресурсы залива Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. — 1997. — **122**. — С. 334–356.
- Отчет Дальневосточного регионального гидромет. ин-та «Рассчитать нормы предельно допустимых сбросов в Амурский залив и бухту Золотой Рог». Кн. 1. Т. 2. — Владивосток, 1994. — 93 с.
- Петров А.Н., Неврова Е.Л., Малахова Л.В. Многомерный анализ распределения бентосных диатомовых водорослей (*Bacillariophyta*) в поле градиентов абиотических факторов в Севастопольской бухте (Черное море, Крым) // Мор. экол. журн. — 2005. — **4**, № 3. — С. 65–77.
- Планктон Черного моря. — Киев: Наук. думка, 1993. — 282 с.
- Рябушко Л.И. Атлас токсичных микроводорослей Чёрного и Азовского морей. — Севастополь: ЕКОСИ-Гидрофизика, 2003. — 140 с.
- Рябушко Л.И. Микрофитобентос Черного моря: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. — Севастополь, 2009. — 44 с.
- Состояние морских экосистем, находящихся под влияние речного стока. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 261 с.
- Abreu P., Conde D., Fabian D., Gorga J., Clemente J. Particulate and dissolved phytoplankton production of the Patos Lagoon estuary, Southern Brazil: Comparison of methods and influencing factors // J. Plankt. Res. — 1994. — **16**. — P. 727–735.
- Aberle N., Wiltshire K.H. Seasonality and diversity patterns of microphytobenthos in a mesotrophic lake // Arch. Hydrobiol. — 2006. — **167**. — P. 447–465.
- Al-Yamani F.Y., Saburova M.A. Illustrate guide on the benthic diatoms of Kuwait marine environment. — Safar: Kuwait Inst. Sci. Res., 2011. — 352 p.
- Bodeanu N. Contributions to the systematics and ecology of the benthic diatoms of the Roumain Black Sea littoral // Rev. Roum. Biol. Sér. Bot. — 1970. — **15**, N 1. — P. 11–18.
- Hendey N.I. An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. Part 5. *Bacillariophyceae* (Diatoms). — London, 1964. — 740 p.

- Intercalibration* and distribution of diatom species in the Baltic Sea. – Uppsala: Opulus Press Uppsala, WWF, 1996. – V. 4. – 126 p.
- Kikuchi-Kawan K., Kudo S.* Species composition of ice algal assemblages in Saroma Ko Lagoon and resolute passage, 1992 (extended abstract) // Proc. NIPR Symp. Polar Biol. – 1995. – 8. – P. 59–63.
- Kuylenstierna M.* Benthic Algal Vegetation in the Nordre Älv Estuary (Swedish West coast). – Dep. Mar. Bot. Univ. Goteborg-Sweden, 1989–1990. – Vol. 1. – 244 p.
- Polge N., Sukatar A., Souly E.N., Gonulol A.* Epipelagic algal flora in the Kucukcekmece lagoon // Turk. J. Fisch. Auat. Sci. – 2010. – 10. – P. 39–45.
- Stonik I.V., Orlova T.Yu.* Phytoplankton of the coastal waters off Vladivostok (the North-western part of the East Sea) under Eutrophic Conditions // Ocean and Polar Res. – 2002. – 24, N 4. – P. 359–365.
- Topcuoglu S., Gungor N., Kromkamp C.* Physical and chemical parameters of brackish water lagoon, Kucukcekmece Lake, in northwestern Turkey // Toxicol. Environ. Chem. – 1999. – 69. – P. 101–108.
- UNEP.* Statistical Analysis and Interpretation of Marine Community Data // UNEP Reference Methods Mar. Pollut. Stud. – 1995. – N 64. – 75 p.
- Witkowski A.* Diatom flora of marine coasts // Iconographia Diatomologica. Vol. 7: Diversity – Taxonomy – Identification. – Ruggell, Kőningstein: A.R.G. Gantner Verlag K.-G., 2000. – 925 p.

Поступила 22 мая 2012 г.

Подписала в печать А.В. Лишук-Курейшевич

A.A. Begun, A.Yu. Zvyagintsev

A.V. Zhirmunsky Institute of Marine Biology of the Far Eastern Branch RAS,
17, Palchevsky St., 690041 Vladivostok, Russia
andrejbegun@yandex.ru
ayzvyagin@gmail.org

PERIPHYTON *BACILLARIOPHYTA* OF THE HYPEREUTROPHIC ARTIFICIAL LAGOON AROUND VLADIVOSTOK (RUSSIAN COAST, SEA OF JAPAN)

Species composition and quantitative characteristics year-round research of periphyton diatoms on experimental plates in hypereutrophic artificial lagoon around Vladivostok are studied. Seventy-nine species and interspecific taxa by *Bacillariophyceae* (58), *Fragilariophyceae* (6) и *Coscinodiscophyceae* (15) classes are revealed. Total periphyton density was varied from 0.026 to 13.9 mln cells/m², the indicators of powerfully organic water pollution α -mesosaprobionts has dominant status (80.03 %). The average annual values of number species, species diversity Shannon and evenness Pielou indexes in diatom periphyton were low ($n = 9.5$, $H = 1.38$, $e = 0.39$ inf. byt/m², respectively). In the winter period and to beginning spring periphyton have not developed almost, it is caused by influence negatively light condition in this lagoon as results strong freezing-over was showed. The features of quantitative periphyton development in year-round become formed by specific of physical and hydrological lagoon conditions, as well as significant eutrophication ones by sewage waters, contributing the mass development power organic pollution indicators.

К е y w o r d s: lagoon, diatoms, periphyton, saprobity, eutrophication, Sea of Japan.