УДК 579: 582.26/27+574.586

А.А. БЕГУН[1], Л.И. РЯБУШКО[2], А.Ю. ЗВЯГИНЦЕВ[1]

[1]Ин-т биологии моря ДВО РАН,
ул. Пальчевского, 17, 690041 Владивосток, Россия
[2]Ин-т биологии южных морей НАН Украины,
пр. Нахимова, 2, 99011 Севастополь, Украина

BACILLARIOPHYTA ПЕРИФИТОНА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН В БУХТЕ ЗОЛОТОЙ РОГ (РОССИЙСКОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ) В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Изучены видовой состав, численность, биомасса, индексы видового разнообразия Шеннона (*H*) и выравненности Пиелу (*e*). Определен коэффициент Чекановского-Серенсена (K_S) сообществ диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин экстремально-эвтрофной бухты Золотой Рог и (для сравнения) умеренно-эвтрофной б. Рында (российские воды Японского моря). В них обнаружено 94 вида, разновидности и формы диатомовых водорослей с преобладанием представителей класса *Bacillariophyceae* (60,6 %). В б. Золотой Рог найдено 45 видов водорослей, в б. Рында – 60. В обеих бухтах отмечено 26 общих видов. Впервые для российских вод Японского моря указано 8 видов, разновидностей и форм диатомовых водорослей: *Amphora caroliniana* Giffen, *Ardissonea crystallina* (C. Agardh) Grunow, *Falcula media* var. *subsalina* Proschk.-Lavr., *Neosynedra provincialis* (Grunow) Williams et Round, *Gyrosigma tenuissimum* (W. Sm.) Griff. et Henfr., *Nitzschia hybrida* f. *hyaline* Proschk.-Lavr., *Synedra toxoneides* (Østrup) Hust. и *Pleurosigma clevei* Grunow. Выявлен 31 вид-индикатор органического загрязнения вод: в б. Золотой Рог доминировали α- и β-мезосапробионты, в б. Рында – β-мезосапробионты. Средняя численность и биомасса диатомовых водорослей в б. Золотой Рог была в 1,5 раза выше за счет планктонных видов, осевших на субстрат, чем в б. Рында, где преобладали бентосные и бенто-планктонные виды.

Ключевые слова: *Bacillariophyta*, перифитон, эвтрофирование, Японское море.

Введение

Сообщества диатомовых водорослей, как начальные звенья биопродукционного процесса, играют важнейшую роль в функционировании прибрежных морских экосистем, достаточно быстро реагируют на изменения среды их обитания и служат индикаторами ее качества (Рябушко, Рябушко, 2001; Рябушко и др., 2004; Бегун, Рябушко, 2008а, б; Бегун и др., 2009 а, б; Ryabushko, 1996). Экспериментальные субстраты являются удобной моделью для изучения влияния антропогенного загрязнения на видовой состав и количественные характеристики диатомовых водорослей, которые вместе с бактериями одними из первых заселяют их поверхность и способствуют развитию макрообрастания.

В течение последних десятилетий наиболее интенсивное антропогенное загрязнение с преобладанием химического, нефтяного и термального типов отмечено в бухте Золотой Рог, особенно в кутовой ее части (Tkalin et al., 1993; Корякова и др., 2002, 2003). Зарегистрирован также рекорд превышения ПДК загрязняющих веществ различного происхождения (41 %), превосходящий соответствующий показатель даже для наиболее загрязненных заливов – Амурского (5,9 %) и Находка (4,4 %) (Огородникова, 2001).

Исследования видового состава фитопланктона и микроперифитона показали, что бытовые и промышленные сбросы г. Владивостока оказывают существенное влияние на экологическое состояние прибрежных морских вод и биоту (Бегун, 2006, 2007). В то же время б. Рында (Амурский залив) по основным гидрохимическим показателям является одной из относительно чистых акваторий залива Петра Великого, близких открытым водам Японского моря (Корякова, 1987; Корякова и др., 2002). Однако до сих пор недостаточно исследовано влияние антропогенного загрязнения на качественные и количественные характеристики диатомовых водорослей российских вод Японского моря.

Цель данной работы – изучение динамики видового состава и количественных характеристик диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин с различным сроком экспозиции в условиях хронического антропогенного загрязнения б. Золотой Рог Японского моря.

Материалы и методы

При изучении диатомовых водорослей перифитона использовали экспериментальные пластины из оргстекла размером 80х40 х1,5 мм, которые экспонировали в течение 15 сут с июня по октябрь 2000 г. на глубине 2 м с борта двух судов, пришвартованных к 42 причалу (ст. 1) в мористой части б. Золотой Рог и к 44 причалу (ст. 2) в кутовой ее части. Для сравнения полученных данных аналогичные исследования проводили в фоновой акватории – условно «чистой» б. Рында (Амурский залив, о. Русский, ст. 3). Предварительно пластины из оргстекла зачищали наждачной бумагой до получения матовой поверхности и обрабатывали их этиловым спиртом. Пластины экспонировали в бухтах Рында и Золотой Рог в течение 15 сут (23 пробы), а также с более длительными сроками экспозиции – 134 сут в б. Рында и 143 сут в б. Золотой Рог (9 проб). Всего обработано 32 пробы. Подсчет клеток диатомовых водорослей осуществляли в счетной камере Горяева в трех повторностях во временных водных препаратах, а определение видов – в постоянных препаратах под световым микроскопом (СМ) «Olympus BX41» с объективами UPLanF1 40x и 100x/1/.30 масляной иммерсии (Япония). Для оценки количественной структуры сообществ диатомовых водорослей перифитона использовали индексы Шеннона (H), выравненности Пиелу (e) и коэффициент флористического сходства Чекановского-Серенсена (K_S), описание которых приведено в предыдущих работах (Бегун и др., 2009а, б).

Результаты

В перифитоне экспериментальных пластин бухт Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г. обнаружено 94 вида, разновидности и формы диатомовых водорослей с преобладанием представителей класса *Bacillariophyceae* (60,6 %) (табл. 1). Родовое обилие водорослей представлено 53 видами, из них доминирующее положение по их числу занимают *Nitzschia* Hass. (9 видов), *Amphora* Ehrenb. et Kütz. (6) и *Navicula* Bory (5). Впервые для российских вод Японского моря указано 8 видов, разновидностей и форм диатомовых водорослей: *Amphora caroliniana*, *Ardissonea crystallina*, *Falcula media* var. *subsalina*, *Neosynedra provincialis*, *Gyrosigma tenuissimum*, *Nitzschia hybrida* f. *hyalina*, *Synedra toxoneides* и *Pleurosigma clevei* (рис. 1), обнаруженных нами в районе исследований (Бегун и др., 2009б). В б. Золотой Рог найдено 89 видов водорослей – 45 видов (ст. 1) и 44 (ст. 2), в б. Рында – 60 видов (ст. 3). Для обеих акваторий отмечено 26 общих эврибионтных, планктонных и бенто-планктонных видов водорослей из родов: *Coscinodiscus* Ehrenb., *Melosira* C. Agardh, *Ditylum* J.W. Bailey, *Eucampia* Ehrenb., *Leptocylindrus* Cleve, *Skeletonema* Grev., *Thalassionema* Grunow ex Mereschk., осевших на поверхности экспериментальных пластин из толщи воды в период массового развития фитопланктона (см. табл. 1). Коэффициент флористического сходства Чекановского-Серенсена в бухтах Золотой Рог и Рында составил 0,89 и 0,64 соответственно. Диатомовые водоросли представлены подвижными (66 %) и прикрепленными (34 %) формами, которые, в свою очередь, являются свободноживущими (54 %) и колониальными (46 %). Из всей флоры к типичным эпифитам и видам-обрастателям твердых субстратов относятся 20 видов. Другая часть видов принадлежит к флоре песчаных и илистых грунтов, попавших на субстрат в период взмучивания вод, либо к планктонным формам, осевшим из толщи воды.

Выявлены экологические группировки диатомовых водорослей: 65 % видов относятся к бентосным, 19 % к – бенто-планктонным, 16 % – к планктонным формам (рис. 2, *А*). В летне-осенний период в импактной акватории б. Золотой Рог преобладают планктонные формы диатомей и их покоящиеся споры: *Skeletonema costatum*, *Bacteriastrum delicatulum*, *Chaetoceros peruvianus*, *Ditylum brightwellii*, *Pseudo-nitzschia calliantha* (рис. 3), в б. Рында – бентосные и бенто-планктонные формы. Абсолютная и относительная численность планктонных форм в б. Золотой Рог выше (ст. 1 – 4,82 млн кл/м^2, ст. 2 – 3,94 млн кл/м^2), чем в б. Рында (0,43 млн кл/м^2). В б. Рында только в октябре отмечено увеличение численности планктонных форм за счет *S. costatum* (20 %). По отношению к солености во флоре водорослей морские виды составляют 67 %, солоноватоводно-морские – 16 %, солоноватоводные – 13 %, в меньшей степени – пресноводно-солоноватоводные и пресноводные виды (рис. 2, *Б*). По отношению к pH морской среды преобладают алкалифильные виды (98 %).

Таблица 1. **Список диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин бухт Золотой Рог и Рында Японского моря в летне-осенний период 2000 г.**

Таксон	Экологическая характеристика		Фито-географическая характеристика
	Приуроченность к место-обитанию	Отношение к солености	
1	2	3	4
Achnanthes brevipes C. Agardh	Б	СМ	К
A. groenlandica (Cleve) Grunow	Б	М	АБ
A. longipes C. Agardh	Б	СМ	К
Actinoptychus senarius (Ehrenb.) Ehrenb.	БП	М	К
Amphora angusta Greg.	Б	СМ	К
A. caroliniana Giffen	Б	СМ	АБТ
A. hyalina Kütz.	Б	М	К
A. proteus Greg.	Б	СМ	К
A. parvula Proschk.-Lavr.	Б	СМ	Б
Amphora sp.	Б	-	-
Ardissonea crystallina (C. Agardh) Grunow	Б	М	БТ
Bacteriastrum furcatum Schadb.	П	М	Т
Berkeleya scopulorum (Bréb. et Kütz.) E.J. Cox	Б	СМ	АБТ
Caloneis sp.	Б	–	–
Cerataulina dentata Hasle	П	М	БТ
Chaetoceros affinis Laud.	П	М	АБТ
C. curvisetus Cleve	П	М	К
C. didymus Ehrenb.	П	М	К
C. peruvianus Brightw.	П	М	К
Cocconeis costata Greg.	Б	М	К
C. scutellum var. *adjuncta* A. Schmidt	Б	М	Б
C. scutellum var. *baldjikiana* Grunow	Б	М	Б
C. scutellum var. *scutellum* Ehrenb.	Б	СМ	К
Coscinodiscus granii Gough	БП	М	К
Coscinodiscus oculus-iridis Ehrenb.	БП	М	К
Cylindrotheca closterium (Ehrenb.) Reim. et Lewin	БП	СМ	АБ
Diploneis chersonensis (Grunow) Cleve	Б	М	АБТ
D. interrupta (Kütz.) Cleve	Б	СМ	АБТ
D. smithii (Bréb.) Cleve	Б	СМ	К
D. subsincta (A.S.) Cleve	Б	М	АБТ
Ditylum brightwellii (T. West) Grunow	П	М	БТ
Donkinia recta (Donkin) Grunow	БП	М	БТ
Entomoneis alata (Ehrenb.) Ehrenb.	БП	С	АБТ
Eucampia zodiacus Ehrenb.	БП	М	К
Falcula media var. *subsalina* Proschk.-Lavr.	Б	М	Б
Fragilaria striatula Lyngb.	БП	М	К
Grammatophora marina (Lyngb.) Kütz.	Б	М	К
Guinardia striata (Stolterfoth) Hasle	П	М	К
Gyrosigma tenuissimum (W. Sm.) Griff. et Henfr.	Б	М	АБТ

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Gomphonemopsis sp.	Б	–	–
Haslea subagnita (Proschk.-Lavr.) N.I. Kar.	Б	М	Б
Hemiaulus hauckii Grunow	П	М	БТ
Leptocylindrus danicus Cleve	П	М	К
L. mediterraneus (H. Perag.) Hasle	П	М	К
Licmophora abbreviata C. Agardh	Б	М	АБ
L. flabellata C. Agardh	Б	М	БТ
Licmophora sp.	Б	–	–
Lyrella hennedey (W. Sm.) A.J. Stick. et D.G. Mann	Б	М	АБТ
Melosira lineata (Dillw.) C. Agardh	БП	СМ	АБТ
M. moniliformis var. *moniliformis* (O.F. Müll.) C. Agardh	БП	СМ	К
M. moniliformis var. *subglobosa* Grunow	БП	СМ	АБ
Meridion circulare (Grev.) C. Agardh	БП	П	К
Navicula cryptocephala Kütz.	Б	ПС	АБ
N. directa (W. Sm.) Ralfs ex Pritch.	Б	М	К
N. distans (W. Sm.) Ralfs. ex Pritch.	Б	М	БТ
N. perrhombus Hust. ex Simonsen	Б	М	БТ
Navicula sp.	Б	–	–
Neosynedra provincialis (Grun.) Williams et Round	Б	М	Б
Nitzschia angularis W. Sm.	Б	М	К
N. distans Greg.	Б	М	БТ
N. hybrida f. *hyalina* Proschk.-Lavr.	Б	С	Б
N. longissima (Bréb. ex Kütz.) Ralfs ex Pritch.	БП	СМ	АБТ
N. macilenta Greg.	Б	М	К
N. sigma (Kütz.) W. Sm.	Б	СМ	К
N. tenuirostris Mereschk.	БП	СМ	К
N. vermicularis (Kütz.) Hantzsch ex Rabenh.	Б	С	БТ
Nitzschia sp.	Б	–	–
Odontella aurita (Lyngb.) C. Agardh	БП	М	К
Parlibellus delognei (V.H.) E.J. Cox	Б	М	АБТ
P. rhombica (Greg.) L.I. Ryab.	Б	СМ	Б
Plagiotropis elegans (W. Sm.) Grunow in V.H.	Б	М	Б
P. lepidoptera (Greg.) Kuntze	Б	М	К
Pleurosigma clevei Grunow	Б	М	АБ
P. formosum W. Sm.	Б	М	БТ
P. intermedium W. Sm.	Б	М	Б
P. naviculaceum Bréb.	Б	М	АБТ
Proschkinia poretzskajae (O. Korotk.) D.G. Mann	Б	М	АБ
Psammodictyon panduriforme (Greg.) D.G. Mann	Б	М	АБТ
Pseudo-nitzschia calliantha Lundholm, Moestrup et Hasle	П	М	К
P. pungens (Grunow ex Cleve) Hasle	П	М	К
Rhabdonema arcuatum (Lyngb.) Kütz.	БП	М	К
Rhizosolenia setigera Brightw.	П	М	К
Rh. marina (W. Sm.) M. Schmidt	Б	М	АБ
Skeletonema costatum (Grev.) Cleve	П	М	К

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Striatella unipunctata (Lyngb.) C. Agardh	БП	М	БТ
Surirella fastuosa Ehrenb.	Б	М	АБТ
Synedra toxoneides (Ǿstrup) Hust.	Б	М	АБ
Tabullaria fasciculata (C. Agardh) Williams et Round	Б	СМ	К
T. parva (Kütz.) Williams et Round	Б	М	АБТ
Thalassionema nitzschioides Grunow	БП	СМ	АБТ
Trigonium arcticum f. *baleanum* (Ehrenb.) Meunier	Б	М	АБ
Trachyneis aspera (Ehrenb.) Cleve	Б	М	АБТ
Tryblionella hungarica (Grunow) D.G. Mann	Б	С	К
Undatella lineolata (Kütz.) L.I. Ryab.	Б	СМ	АБТ
Условные обозначения: приуроченность к местообитанию: Б – бентосный, БП – бентопланктонный, П – планктонный; отношение к солености: М – морской, СМ – солоноватоводно-морской, С – солоноватоводный, П – пресноводный, ПС – пресноводно-солоноватоводный; фитогеографическая характеристика: К – космополит, Б – бореальный, АБ – аркто-бореальный, АБТ – аркто-бореально-тропический, БТ – бореально-тропический, Т – тропический.			

Таблица 2. **Количество видов-сапробионтов диатомовых водорослей перифитона в бухтах Золотой Рог и Рында Японского моря в летне-осенний период 2000 г.**

Группа сапробионтов и класс чистоты воды	Сапробность	б. Золотой Рог		б. Рында, ст. 3
		ст. 1	ст. 2	
		Количество видов		
Ксеноолигосапробионты (*S* = 0,4), I	χ-о	0	0	1
Олигосапробионты (*S* = 1,0), II	О	0	0	2
Бетамезосапробионты (*S* = 2,0), III	В	14	9	17
Бета-альфамезосапробионты (*S* = 2,4), III	β-α	1	1	0
Альфамезосапробионты (*S* = 3,0), IV	α	5	7	1
Всего		20	17	21

При анализе видового состава диатомовых водорослей перифитона пластин с разными сроками экспозиции выявлен 31 вид-индикатор органического загрязнения бухт (табл. 2). Преобладали β-мезосапробионты (65 %) – индикаторы слабо загрязненных вод и α-мезосапробионты (23 %) – умеренно загрязненных вод (рис. 2, *В*). Виды-индикаторы условно «чистых» вод *Meridion circulare*, *Nitzschia vermicularis* и *Plagiotropis lepidoptera* отмечены только в фоновой акватории б. Рында при невысокой их численности (табл. 3). Бентосные виды α-мезосапробионты: *Ardissonea crystallina*, *Cylindrotheca closterium*, *Grammatophora marina*, *Licmophora abbreviata*, *Rhoicosphenia marina* и виды рода *Cocconeis* Ehrenb. имели на 1-2 порядка более высокую численность в б. Рында , чем в б. Золотой Рог.

В этой группе *Synedra toxoneides* и *Nitzschia hybrida* f. *hyalina* отмечены только в б. Золотой Рог. В кутовой части (ст. 2) количественные показатели этих видов выше, по сравнению с ее мористой частью (ст. 1) (табл. 3). Планктонный вид *Skeletonema costatum* отмечен во всех исследуемых районах, однако в кутовой части б. Золотой Рог его численность была на порядок выше (12,9 млн кл/м^2), чем в б. Рында (1,9 млн кл/м^2).

Возможно, антропогенное загрязнение в б. Золотой Рог оказывает влияние на морфологические изменения структуры панциря и его форму у некоторых видов диатомовых водорослей *Melosira moniliformis*, *Licmophora abbreviata*, *Tabularia fasciculata* на протяжении всего периода исследований (рис. 4). На пластинах с более длительным сроком экспозиции в б. Золотой Рог аберрантные формы диатомей встречались чаще, чем на пластинах с 15-сут. сроком, а у вида *Cocconeis scutellum* плотность таких клеток достигала 12 % общей численности его популяции. У видов рода *Cocconeis*, предпочитающих в целом чистые воды, в загрязненных местах нередко отмечены створки с выемками на полюсах или с вогнутостью посередине, а также с морфологическими аномальными изменениями не только формы, как у *C. scutellum* (рис. 4), но и тонкой структуры створок, как у вида *Cocconeis costata* из зал. Восток Японского моря и в районе островов Аргентинского архипелага Антарктики (Рябушко, 1986, 2005). Подобные аномалии у диатомовых водорослей не являются редкостью.

Обзор флоры исследуемых водоемов существенно дополняет фитогеографическая характеристика водорослей, тесно связанная с их экологией. Из всех встреченных видов преобладают космополиты (37 %) и бореальные формы (35 %) (рис. 2, *Г*). Значительную долю составляют аркто-бореальные (15 %) и бореально-тропические виды (10 %).

В перифитоне исследуемых районов по численности и биомассе отмечено 27 доминирующих и субдоминирующих таксонов, из них 7 видов являются общими для обеих бухт: *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Licmophora abbreviata*, *Navicula* sp., *Nitzschia* sp. и *Skeletonema costatum*, *Cylindrotheca closterium*, *Parlibellus delognei* (табл. 4).

Анализ динамики количественных характеристик сообществ диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин с 15-сут. сроком экспозиции в летне-осенний период 2000 г. показал, что в б. Золотой Рог (ст. 1) общая численность водорослей варьировала в пределах 1,01-28,8 млн кл/м^2, а биомасса – 2,3-73,7 мг/м^2 (рис. 5, 6). Отмечено два пика численности – в июне (28,8 млн кл/м^2) и в октябре (28,7 млн кл/м^2). Первый пик обусловлен доминированием *Fragilaria striatula* (26,2 млн кл./м^2) и сопряжен с минимальными значениями индексов Шеннона и Пиелу (0,22 и 0,1), второй – *Nitzschia* sp. (22 млн кл/м^2) и *S. costatum* (6 млн кл/м^2) при H = 1,07 и 0,26. Второй пик численности наблюдался в первой половине августа при доминировании *Proschkinia poretzskajae* (3 млн кл/м^2) и *S. costatum* (5,8 млн кл/м^2). Минимальная численность диатомей прослеживалась в сентябре в период развития *Ditylum brightwellii*, *Skeletonema costatum* и *Amphora angusta* при высоких значениях индексов H = 2,16 и e = 0,63.

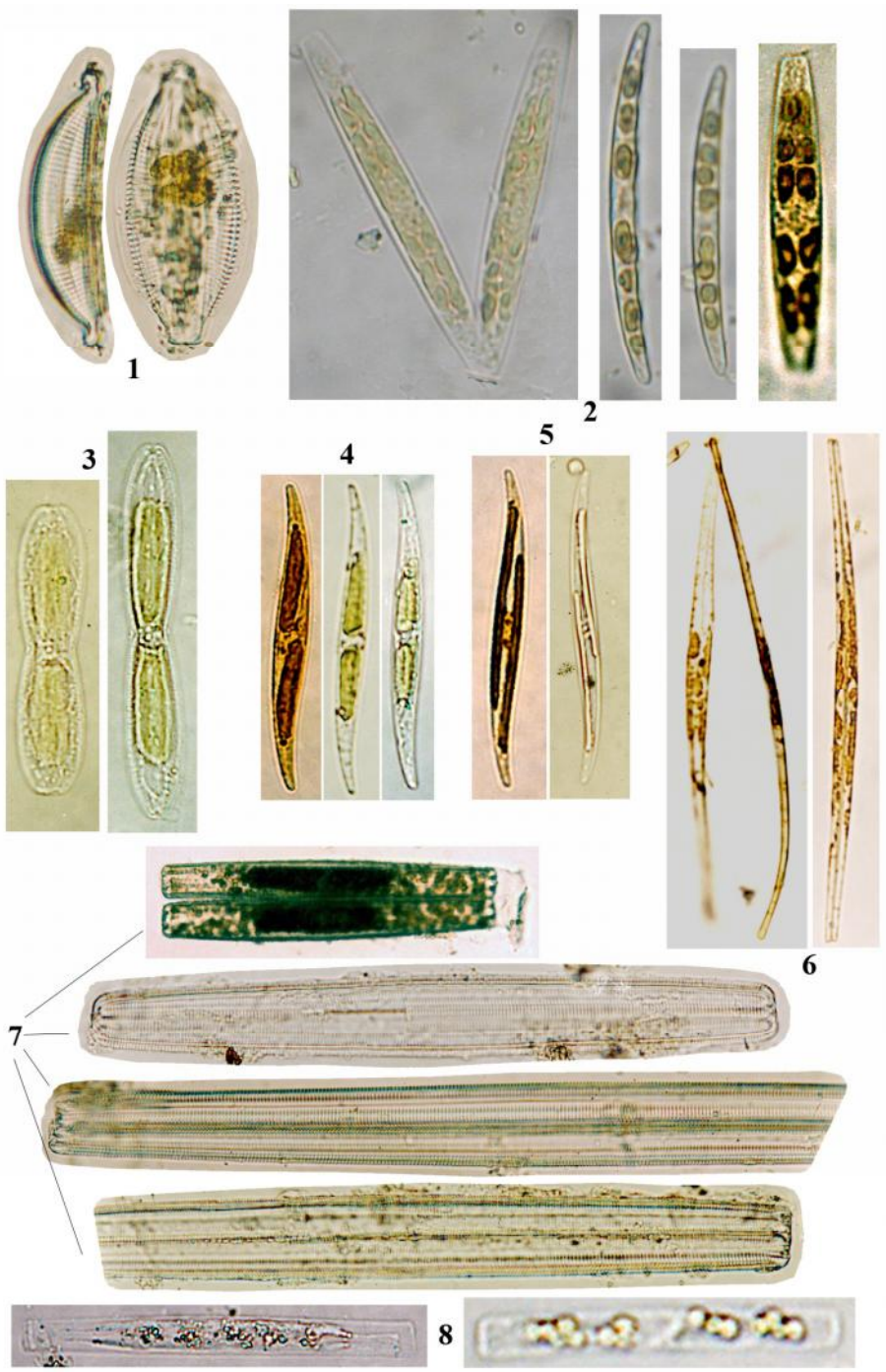

Рис. 1. Диатомовые водоросли перифитона экспериментальных пластин, впервые указанные для российских вод Японского моря: *1 – Amphora caroliniana*; *2 – Falcula media* var. *subsalina*; *3 – Nitzschia hybrida* f. *hyaline*; *4 – Pleurosigma clevei*; *5 – Gyrosigma tennuissimum*; *6 – Synedra toxoneides*; *7 – Ardissonea crystalline*; *8 – Neosynedra provincialis*

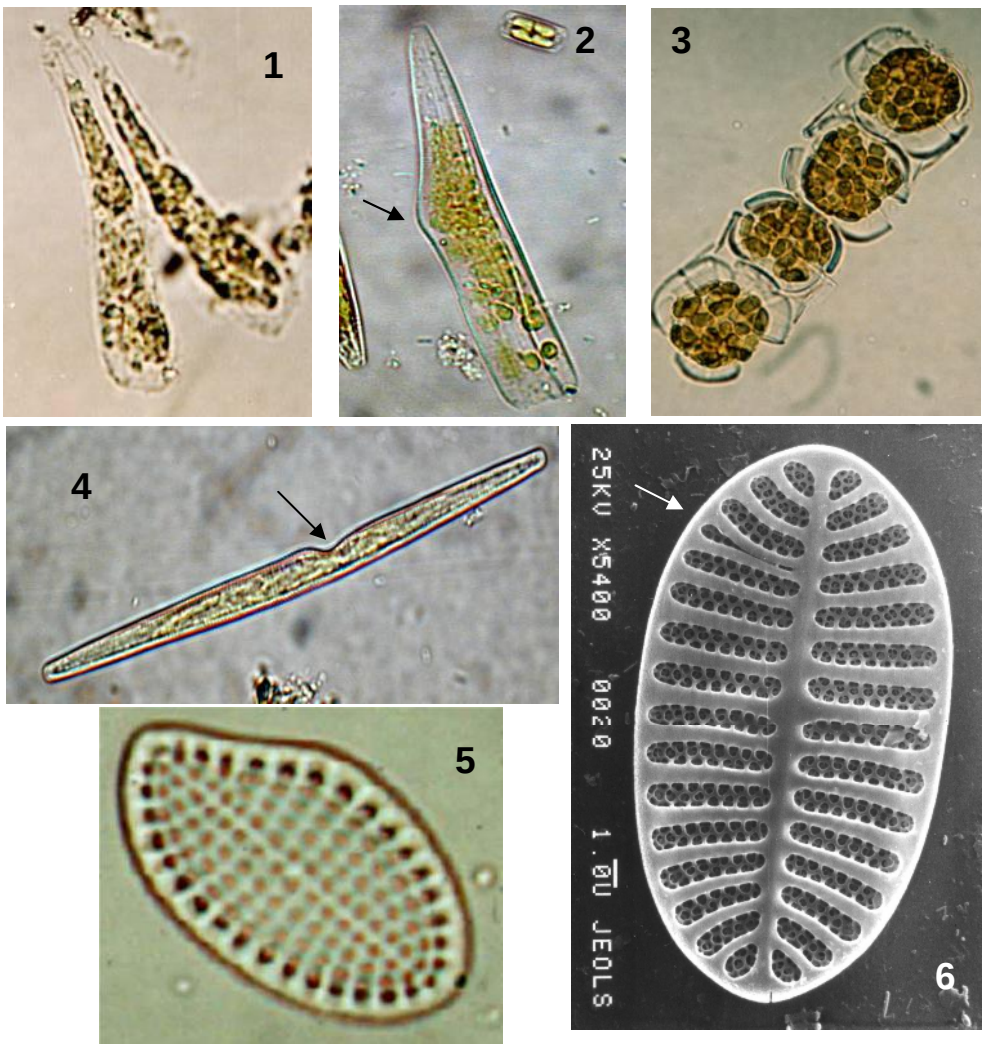

Рис. 4. Морфологические изменения у диатомовых водорослей Японского моря: *1-2 – Licmophora abbreviate*; *3 – Melosira moniliformis*; *4 – Tabularia fasciculate*; *5 – Cocconeis scutellum* на экспериментальных пластинах б. Золотой Рог; *6 – Cocconeis costata* в эпилитоне зал. Восток

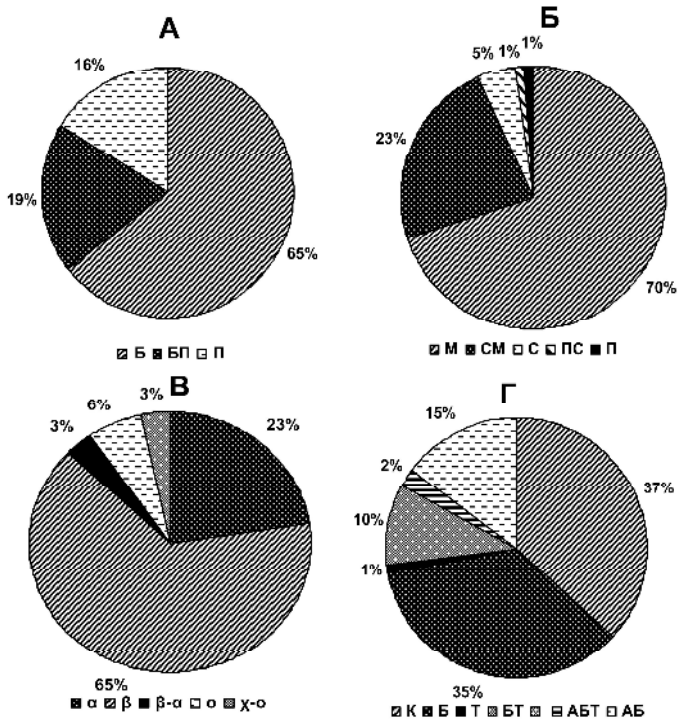

Рис. 2. Эколого-географическая характеристика диатомовых водорослей перифитона бухт Золотой Рог и Рында Японского моря в летне-осенний период 2000 г. **А** – приуроченность к местообитанию: *Б* – бентосный, БП – бенто-планктонный, П – планктонный. **Б** – отношение к солености: М – морской, СМ – солоноватоводно-морской, С – солоноватоводный, ПС – пресноводно-солоноватоводный, П – пресноводный. **В** – сапробность: α – альфамезосапробионт, β – бетамезосапробионт, β-α – бета-альфамезосапробионт, o – олигосапробионт, χ-o – ксеноолигосапробионт. **Г** – фитогеографическая характеристика: К – космополит, Б – бореальный, Т – тропический, БТ – бореально-тропический, АБТ – аркто-бореально-тропический, АБ – аркто-бореальный

В б. Золотой Рог (ст. 2) общая численность диатомовых водорослей варьировала в пределах 0,48-22,08 млн кл/м^2, биомасса – 2,02-86,7 мг/м^2 (рис. 5, 6). Пик численности отмечен в октябре во время интенсивного развития *Achnanthes caroliniana* (12 млн кл/м^2) и *S. costatum* (4 млн кл/м^2) при максимальной численности видов (23) и достаточно высоких показателях индексов H = 2,11 и e = 0,47 (рис. 7). Второй пик наблюдался в августе за счет доминирования *S. costatum* (12 млн кл/м^2) при высоких значениях индексов H = 2,44 и e = 0,62. Минимальная численность отмечена в июне в период развития токсичного вида *Pseudo-nitzshia calliantha* (0,26 млн кл/м^2) и *Tabullaria parva* (0,15 млн кл/м^2) на фоне минимального числа видов (6) при значениях H = 1,65 и e = 0,64 (см. рис. 7).

В фоновой б. Рында общая численность составляла 0,44-33,9 млн кл/м^2, а биомасса – 1,01-94,1 мг/м^2 (см. рис. 5, 6). Максимум численности зарегистрирован в июне в период наибольшего развития вида-доминанта *Nitzschia tenuirostris* при минимальных значениях индексов H = 0,51 и e = 0,14 (рис. 7). Второй пик

численности отмечен в октябре за счет развития *Nitzschia* sp. (9 млн кл/м^2), *Rh. marina* (6 млн кл/м^2) и *Cocconeis scutellum* (2,7 млн кл/м^2) (табл. 4).

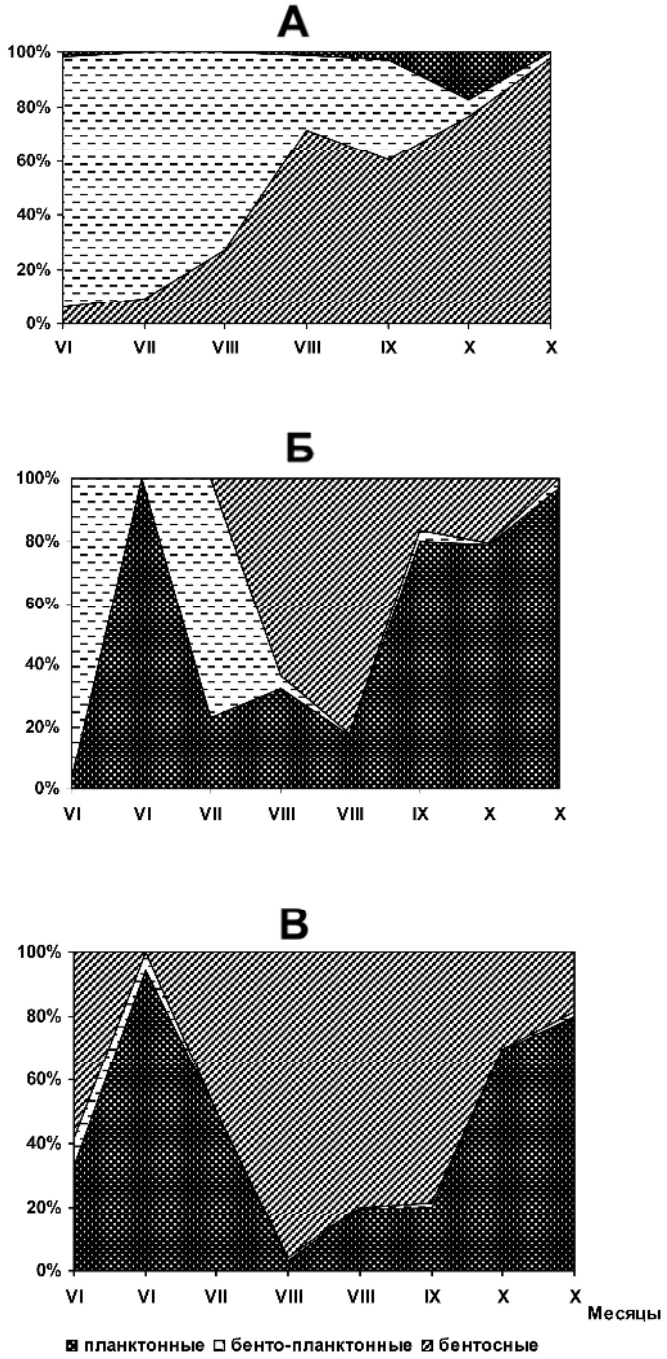

Рис. 3. Соотношение (%) по численности планктонных, бенто-планктонных и бентосных видов диатомовых водорослей перифитона экспериментальных пластин с 15 -суточным сроком экспозиции в бухтах Рында (*А*) и Золотой Рог (*Б* – ст. 1, *В* – ст. 2) Японского моря в летне-осенний период 2000 г.

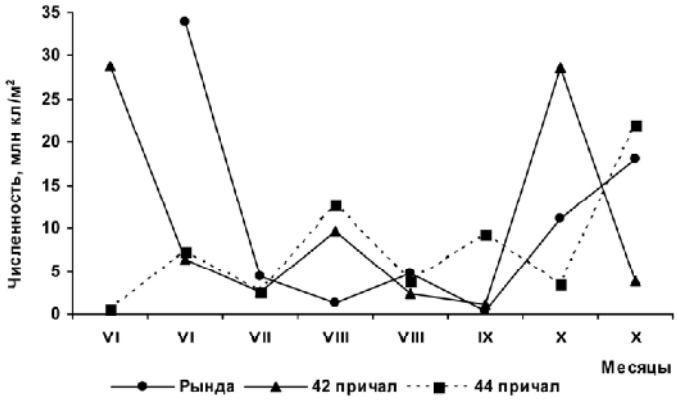

Рис. 5. Динамика численности клеток *Bacillariophyta* перифитона экспериментальных пластин с 15-суточным сроком экспозиции в б. Золотой Рог (42 причал – ст. 1; 44 причал – ст. 2) и Рында Японского моря в летне-осенний период 2000 г.

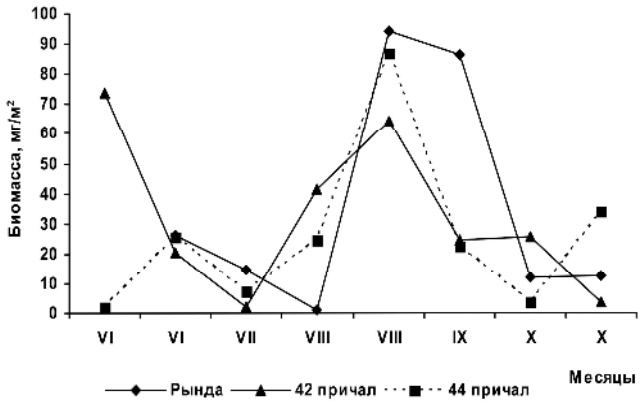

Рис. 6. Динамика биомассы *Bacillariophyta* перифитона экспериментальных пластин с 15-суточным сроком экспозиции в б. Золотой Рог (42 причал – ст. 1; 44 причал – ст. 2) и Рында (ст. 3) Японского моря в летне-осенний период 2000 г.

Количественный анализ данных по трем станциям показал, что средние значения индексов видового разнообразия (*H*) и выравненности (*e*) видов в сообществе диатомовых водорослей перифитона бухт относительно невелики. В импактной б. Золотой Рог их величины различались по станциям: *H* = 1,83, *e* = 0,35 – кутовая часть (ст. 1); *H* = 1,52, *e* = 0,42 – мористая часть бухты (ст. 2) при снижении показателей в б. Рында: *H* = 1,25 и *e* = 0,49 (см. рис. 7).

Максимальные значения числа видов зарегистрированы в бухтах Рында и Золотой Рог (ст. 1) с доминированием *Fragilaria striatula* (26,2 млн кл/м^2) при минимальном видовом разнообразии микроперифитона *H* = 0,22 и *e* = 0,1 (табл. 4). Во второй половине августа наблюдалось повышение численности за счет доминирования планктонного вида *S. costatum* (12 млн кл/м^2) при высоких значениях индексов видового разнообразия (*H* = 2,44) и выравненности (*e* = 0,62). Минимальная численность отмечена в период развития *Pseudo-nitzschia calliantha*

(0,26 млн кл/м^2) и *Tabullaria parva* (0,15 млн кл/м^2) в июне на фоне минимального числа видов (6) и значений индексов H = 1,65 и e = 0,64, а в период развития бентосных видов *C. oculus-iridis*, *Amphora angusta* и *Trachyneis aspera* в сентябре при значениях индексов H = 2,29 и e = 0,77 (см. рис. 7).

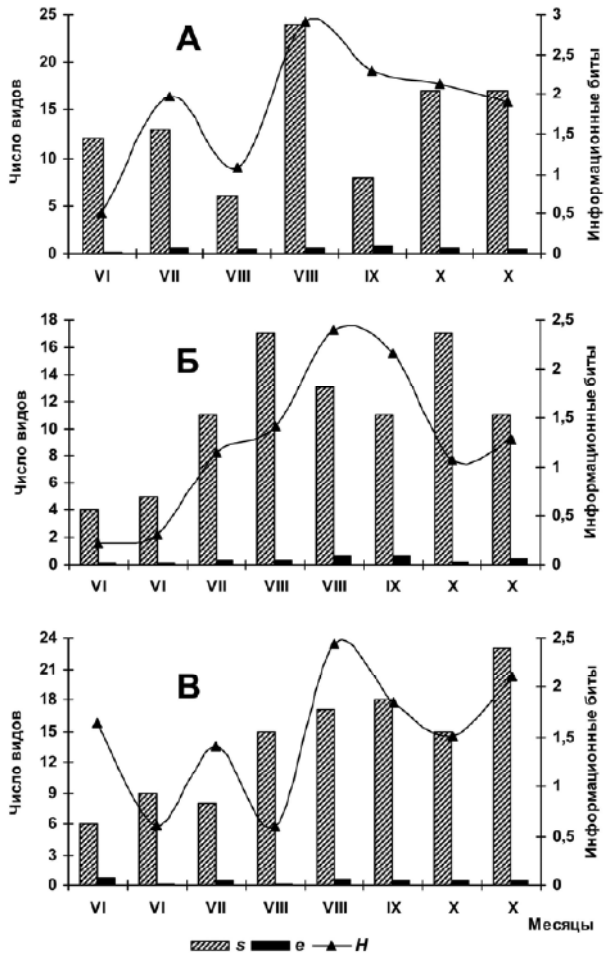

Рис. 7. Динамика числа видов (*S*), индекса видового разнообразия Шеннона (*H*) и выравненности Пиелу (*e*) *Bacillariophyta* в перифитоне экспериментальных пластин с 15-суточным сроком экспозиции в бухтах Рында (*А*) и Золотой Рог (*Б* – ст. 1, В – ст. 2) Японского моря в летне-осенний период 2000 г.

Однако данные изучения перифитона экспериментальных пластин при длительной экспозиции 134 и 143 сут значительно различались по станциям. Отмечено снижение числа видов диатомовых водорослей (27, 20 и 16 видов), индексов видового разнообразия (2,0, 0,67 и 0,29) и выравненности (0,43, 0,14 и 0,07), соответственно, в б. Рында и при продвижении от мористой к кутовой частям б. Золотой Рог (рис. 8). При этом в б. Рында преобладали *Cocconeis scutellum* (6,12 млн кл/м^2) и *Nitzschia* sp. (6 млн кл/м^2), а в б. Золотой Рог (ст. 1) – *Navicula* sp. (10 млн кл/м^2) и *Amphora caroliniana* (4 млн кл/м^2) при доминировании *S. costatum*

(24 млн кл/м^2, ст. 1), численность которой возрастала в кутовой части бухты (39,3 млн кл/м^2, ст. 2) по сравнению с б. Рында (0,54 млн кл/м^2).

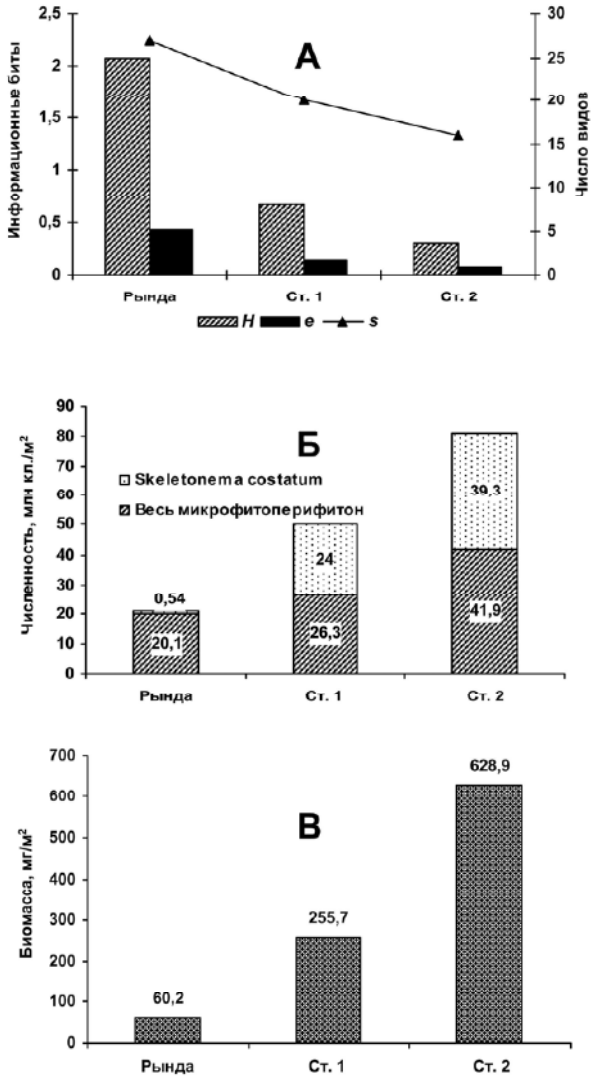

Рис. 8. Показатели числа видов (*s*), индексов Шеннона (*H*) и Пиелу (*e*) (*A*), общей численности сообществ диатомовых водорослей и *Skeletonema costatum* (*Б*) и общей биомассы (*B*) диатомовых водорослей перифитона на экспериментальных пластинах с нарастающим сроком экспозиции в бухтах Рында и Золотой Рог (ст. 1, 2) Японского моря в летне-осенний период 2000 г.

Обсуждение

Анализ видового состава и количественных характеристик диатомового сообщества на трех станциях показал, что наиболее загрязненной является акватория кутовой части б. Золотой Рог (ст. 2, 44 п ричал), которая характеризуется

низкой прозрачностью воды, в 2-2,5 раза более высокой концентрацией всех форм органического вещества, чем в б. Рында (Корякова и др., 2002, 2003). Здесь отмечено наименьшее содержание растворенного кислорода в воде, самая вы сокая численность сапрофитов (63,7 тыс. кл/мл) и нефтеокисляющих бактерий (14,1 тыс. кл/мл), что в 2 раза превышает их содержание в б. Золотой Рог (ст. 1) и в 8-14 раз в б. Рында. В фоновой акватории отмечены максимальные концентрации раст-воренного кислорода, величин pH и самые низкие значения $БПК_5$, обусловленные отсутствием источников хронического загрязнения и свободным водообменом с открытым морем (Корякова, 1987). В теплое время года здесь наблюдается естественное эвтрофирование за счет деструкции водорослей-макрофитов, отсутствующих в б. Золотой Рог, что во многом определяет разный состав микроводорослей-доминантов (Бегун, Рябушко, 2008б; Бегун и др., 2009б). В сообществе микрообрастания экспериментальных пластин, экспонируемых на двух станциях в б. Золотой Рог, численность всех исследуемых групп бактерий в 2-4 раза превышает этот показатель для пластин в б. Рында. В кутовой части б. Золотой Рог (ст. 2) микроперифитон заметно богаче по количеству железобактерий, гнилостных анаэробов и сапрофитов по сравнению с мористой частью бухты (ст. 1) (Корякова и др., 2002, 2003).

С учетом данных анализа фитопланктона б. Золотой Рог отнесена к экстремально-эвтрофным, а б. Рында к умеренно-эвтрофным водам (Бегун, 2004, 2006). Среди обнаруженных видов диатомовых водо рослей перифитона на экспериментальных пластинах преобладали в основном морские, эвритермные и эвригалинные виды, относящиеся к бореальному, аркто-бореальному и космополитичному комплексам. К круглогодичным относятся толерантные к воздействию неблагоприятных условий среды виды *Melosira moniliformis*, *Grammatpphora marina*, *Cylindrotheca closterium*, *Nitzschia tenuirostris*, *Tabullaria fasciculata*, *Surirella fastuosa*, широко встречающиеся на различных типах субст ратов в местообитаниях с низким либо повышенным уровнем антропогенного воздействия (Бегун, Рябушко, 2008б; Бегун и др., 2009 а, б). Обычно рост числа планктонных диатомовых в бентосе и перифитоне соответствует времени отмирания фитопланктона, а иногда совпадает с усилением антропогенного загрязнения акваторий токсикантами, способствующими оседанию на дно большей массы фитопланктона. На поверхности экспериментальных пластин в бухтах Золотой Рог и Рында отмечена значительная численность бенто-планктонных и планктонных видов водорослей, поскольку перифитон за нимает промежуточное положение между планктоном и бентосом, которые представляют единый эколого-флористический комплекс в прибрежной зоне моря (Рябушко, Рябушко, 2001; Рябушко и др., 2004).

По количественным показателям в микроперифитоне бухт зал. Петра Великого преобладают алкалифильные виды, что свойственно также диатомовым водорослям бентоса Черного моря (Гусляков и др., 1992). В б. Золотой Рог доминируют α- и β-мезосапробионтые виды, свидетельству ющие о наличии органического загрязнения вод. Но в фоново й акватории б. Рында количественно

преобладали β-мезосапробионтные виды слабо загрязненных вод, а также олиго - и ксеноолигосапробионты – виды-индикаторы чистых вод, которые не были отмечены в б. Золотой Рог (табл. 2).

Низкие значения численности и биомассы типичных бентосных видов в перифитоне б. Золотой Рог обусловлены разными причинами: отсутствием водорослей-макрофитов в кутовой ее части; резкими скачками концентрации нефтеуглеводородов в водах р. Объяснения, впадающей в бухту; увеличением числа планктонных форм диатомовых, обычно совпадающих со временем их отмирания; высокими концентрациями взвеси и всех форм органического вещества, способствующих низкой прозрачности воды в море; усилением антропогенного загрязнения акваторий токсическими элементами (ПХБ, ХЭБ и тяжелые металлы), способствующими оседанию на дно большей массы фитопланктона (Корякова и др., 2002, 2003; Бегун, 2004, 2006). В перифитоне б. Золотой Рог на пластинах с большим сроком экспозиции индексы видового разнообразия и выравненности видов в сообществе диатомовых водорослей в 2-4 раза ниже по сравнению с фоновыми водами б. Рында.

С ростом антропогенной эвтрофикации признаки метаболического прогресса (высокие значения продукции и биомассы отдельных видов микроводорослей) сохраняются на фоне экологического регресса – снижения числа видов и видового разнообразия. В условно «чистых» и «слабо загрязненных» водах отмечается увеличение видового разнообразия, а в «умеренно загрязненных» и «загрязненных» происходит подъем, а затем спад видового разнообразия, что характерно для «грязных» и «очень грязных» вод (Мощенко, Белан, 2007; Moshchenko, Belan, 2008).

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что качество вод б. Золотой Рог можно рассматривать как «грязные» – «очень грязные», что является результатом хронического антропогенного загрязнения, а качество вод б. Рында как «чистые» – «слабо загрязненные», находящиеся под влиянием природного эвтрофирования. При увеличении содержания органических веществ и усилении антропогенного пресса в морских экосистемах происходит снижение численности диатомовых, «аборигенные» виды замещаются видами с высокой толерантностью к воздействию загрязнения. В результате этого происходит формирование высокоэффективного климаксного сообщества микроводорослей, устойчивого к значительным загрязнениям вод.

Выводы

1. В перифитоне экспериментальных пластин в летне-осенний период 2000 г. в разных по степени трофности вод бухтах Золотой Рог и Рында Японского моря обнаружено 94 вида и внутривидовых таксона диатомовых водорослей с доминированием класса *Bacillariophyceae* (60,6 %).

2. Впервые для российских вод Японского моря указано 8 видов, разновидностей и форм диатомовых водорослей: *Ardissonea crystallina*, *Falcula media* var. *subsalina*, *Neosynedra provincialis*, *Gyrosigma tenuissimum*, *Nitzschia hybrida* f. *hyalina*, *Synedra toxoneides* и *Pleurosigma clevei*.

3. В экстремально загрязненной б. Золотой Рог обнаружено 45 видов, в фоновой б. Рында – 60. В обеих акваториях отмечено 26 общих видов. Диатомовый комплекс развивается лучше в условиях природного эвтрофирования, чем в условиях хронического антропогенного загрязнения токсичными элементами сточных вод.

4. Выявлен 31 вид диатомовых водорослей, являющихся индикаторам и органического загрязнения вод. В б. Золотой Рог преобладали α- и β-мезосапробионты. В б. Рында доминировали β-мезосапробионты. Отмечены также олиго- и ксеноолигосапробионты, которые не были зарегистрированы в б. Золотой Рог.

5. Численность сообществ диатомовых водорослей перифитона б. Золото й Рог (ст. 1, 2) составляла 1,01-28,8 и 0,48-22,08 млн кл/м^2, биомасса – 2,3-73,7 и 2,02-86,7 мг/м^2; значения индексов Шеннона H = 1,25; 1,52 и Пиелу e = 0,35 и 0,42. В б. Рында численность варьировала в пределах 0,44 -33,9 млн кл/м^2, биомасса – 1,01-94,1 мг/м^2; H = 1,83 и e = 0,49.

6. Отмечено снижение общей численности, биомассы диатомовых водорослей и увеличение числа видов, индексов Шеннона и Пиелу в перифитоне пластин с нарастающим сроком экспозиции в кутовой, наиболее загрязненной части б. Золотой Рог, что является следствием гиперэвтрофирования и нефтяного загрязнения ее вод.

Благодарности

Работы выполнены при поддержке ФЦП «Мировой океан» на 2008 –2012 гг. госконтракт № 01.420.1.2.0003 от 07 ноября 2008 г.; грантов ДВО -1 № 06-I-II-11-034 «Биологическая безопасность дальневосточных морей России» (2009 –2011 гг.), ДВО-1 № 09-I-ОБН-08 «Оценка состояния морской среды методом биоиндикации по диатомовым сообществам обрастаний на природных и антропогенных субстратах» (2009–2011 гг.); ДВО-1 № 09-I-II23-01 и ДВО-1 № 09-I-II15-03, Целевой комплексной программы ДВО РАН «Биологическая безопасность Дальневосточных морей Российской Федерации», гранта фонда APN ARCP2006-FP14–Adrianov, гранта РФФИ 09-04-00087-а, гранта РФФИ-ДВО 09-04-98580-р_восток_а «Морские биоинвазии и роль судовых балластных вод в расселении видов 2009-2010 гг.»

A.A. Begun[1], L.I. Ryabushko[2], A.Yu. Zvyagintsev[1]

[1]A.V. Zhirmunsky Institute of Marine Biology, Far East Branch of Russian Academy of Sciences,
17, Palchevsky St., 690041 Vladivostok, Russia
[2]Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, NAS of Ukraine,
2, Nakhimov Av., 99011 Sevastopol, Ukraine

BACILLARIOPHYTA OF THE PERIPHYTON OF EXPERIMENTAL PLATES OF THE GOLD HORN BAY OF THE SEA OF JAPAN (RUSSIA) IN THE CONDITIONS OF THE ANTHROPOGENIC CONTAMINATION

The composition of species, quantity, biomass, indexes of the Shannon (H), Pielou (e), coefficient of Chekanovsky-Sőrensen (K_S) of diatom communities in peryphyton of experimental plates in extremely-eutrophic Gold Horn Bay and in temperately Rynda Bay are studied in a summer-autumn 2000. Ninety-four taxa of diatoms were found with predominance of *Bacillariophyceae* (60.6%). In Gold Horn 45 taxa were revialed, Rynda Bay – 60; 26 taxa are common for both bays. Eight taxa of diatoms: *Amphora caroliniana*

Giffen, *Ardissonea crystallina* (C. Agardh) Grunow, *Falcula media* var. *subsalina* Proschk.-Lavr., *Neosynedra provincialis* (Grunow) Williams et Round, *Gyrosigma tenuissimum* (W. Sm.) Griff. et Henfr., *Nitzschia hybrida* f. *hyaline* Proschk.-Lavr., *Synedra toxoneides* (Østrup) Hust. and *Pleurosigma clevei* Grunow. are reported for Russian waters of the Sea of Japan for the first time. Species-indicators of organic contamination of waters were discovered: Gold Horn Bay prevailed α- and β-mesosaprobionts, Rynda Bay – β-mesosaprobionts. Quantity and biomass of diatoms of Gold Horn Bay in 1,5 times is higher due to planktonic species settling on substrate, as compared to a substrate of Rynda Bay, were benthic and bentho-planktonic diatoms prevailed.

K e y w o r d s : *Bacillariophyta*, periphyton, eutrophycation, Sea of Japan, Russia.

Бегун А.А. Фитопланктон бухты Золотой Рог и Уссурийского залива (Японское море) в условиях антропогенного загрязнения // Изв. ТИНРО. – 2004. – **138**. – С. 330-344.

Бегун А.А. Летне-осенний фитопланктон бухты Золотой Рог (Японское море) в условиях антропогенного загрязнения // Альгология. – 2006. – **16**, № 4. – С. 417-434.

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., Рябушко Л.И. Отклик микроводорослей планктона и перифитона на загрязнение морских вод // Мат. II междунар. науч. конф. (Биробиджан, 6-9 окт. 2008 г.). – Биробиджан, 2008а. – С. 101-102.

Бегун А.А., Рябушко Л.И. Особенности количественного развития микроводорослей перифитона бухты Золотой Рог (Японское море) в условиях антропогенного пресса // Мат. межрегион. научно-практ. конф. «Регионы нового освоения: экологические проблемы, пути решения» (Хабаровск, 10-12 окт. 2008 г.). Кн. 2. – Хабаровск: ДВО РАН, 2008б. – С. 294-296.

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. – 2009а. – **157**. – С. 50-79.

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. – 2009б. – **19**, № 3. – С. 257-272.

Гусляков Н.Е., Закордонец О.А., Герасимюк В.П. Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Чёрного моря и прилегающих водоемов. – Киев: Наук. думка, 1992. – 115 с.

Корякова М.Д. Гидрохимическая и гидрологическая характеристики морской воды одной из бухт зал. Петра Великого // Вопросы океанографии дальневосточных морей. – Л.: Гидрометиздат, 1987. – С. 59-66.

Корякова М.Д., Никитин В.М., Звягинцев А.Ю., Белогурова Л.С. Влияние загрязненных портовых вод на обрастание и коррозию высоколегированной стали // Биол. моря. – 2002. – **28**, №. 2. – С. 138-142.

Корякова М.Д., Супонина А.П., Звягинцев А.Ю. О возможности оценки загрязнения портовых вод по минеральному составу сообщества обрастания // Океанология. – 2003. – **43**, № 2. – С. 203-208.

Мощенко А.В., Белан Т.А. Новые методы оценки экологического состояния природной среды дальневосточных морей России // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 276-313.

Огородникова А.А. Эколого-экономическая оценка воздействия береговых источников загрязнения на природную среду и биоресурсы залива Петра Великого. – Владивосток: Изд-во ТИНРО, 2001. – 193 с.

Рябушко Л.И. Диатомовые водоросли верхней сублиторали северо-западной части Японского моря // Дис. ... канд. биол. наук. – Севастополь, 1986. – 266 с.

Рябушко Л.И. Микроводоросли бентоса украинского сектора Антарктики // Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг. – Севастополь, 2005. – С. 297-301.

Рябушко Л.И., Рябушко В.И. Микрофитобентос бухты Казачья Черного моря (Украина) // Альгология. – 2001. – **11**, № 1. – С. 70-82.

Рябушко Л.И., Бабич И.И., Рябушко В.И., Смирнова Л.Л. Седиментация фитопланктона в бухте Казачья Черного моря (Украина) // Там же. – 2004. – **14**, № 1. – С. 48-61.

Moshchenko A.V., Belan T.A. Ecological state and long-term changes of macrozoobenthos in the northern part of Amursky Bay (Sea of Japan) // Ecological studies and the state of the ecosystem of Amursky Bay and the estuarine zone of the Razdolnaya River (Sea of Japan). Vol. 1. – Vladivostok: Dalnauka Press, 2008. – P. 61-91.

Ryabushko L.I. Fouling diatoms on the benthic plants of the Black Sea by cape Omega // Hydrobiologia. – 1996. – **2**, N 2. – P. 15-22.

Tkalin A.V., Belan T.A., Shapovalov E.N. The state of the marine environment near Vladivostok, Russia // Mar. Poll. Bull. – 1993. – **26**, N 8. – P. 418-422.

Получена 24.01.09

Рекомендовала к печати

А.В. Лищук-Курейшевич