

УДК 582.26:628.394(265.54)

А.А. Бегун, А.Ю. Звягинцев\*

Институт биологии моря имени А.В. Жирмунского ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17**БИОИНДИКАЦИЯ КАЧЕСТВА МОРСКОЙ СРЕДЫ  
ПО ДИАТОМОВЫМ ВОДОРΟΣЛЯМ  
В ОБРАСТАНИИ АНТРОПОГЕННЫХ СУБСТРАТОВ**

В обрастании экспериментальных пластин из оргстекла, экспонировавшихся в летне-осенний период 2000 г. в экстремально эвтрофной бухте Золотой Рог и умеренно эвтрофной бухте Рында (о. Русский) обнаружено 94 вида и внутривидовых таксона диатомовых водорослей из классов Bacillariophyceae (59 видов), Fragilariophyceae (13 видов) и Coscinodiscophyceae (22 вида). Впервые для российских вод Японского моря приводится 7 видов диатомовых водорослей. Выявлено 32 вида диатомовых водорослей, являющихся индикаторами органического загрязнения вод. Сапробиологический анализ вод исследуемых акваторий по диатомовым водорослям показал, что в импактной бухте Золотой Рог по плотности доминировали индикаторы значительного органического загрязнения воды (6,4 и 18,1 млн кл./м<sup>2</sup> в районе соответственно 42- и 44-го причалов), а в фоновой бухте Рында — индикаторы умеренного органического загрязнения (6,37 млн кл./м<sup>2</sup>). Хроническое антропогенное загрязнение вод бухты Золотой Рог органическими веществами, токсичными элементами и тяжелыми металлами обуславливало увеличение количественных показателей фитопланктонных форм диатомовых водорослей на экспериментальных пластинах (3,49 и 4,82 млн кл./м<sup>2</sup> в районе соответственно 42- и 44-го причалов) по сравнению с фоновой акваторией Рында (0,43 млн кл./м<sup>2</sup>), а также возникновение морфологических аномалий у некоторых клеток. Показана правомочность использования диатомовых водорослей обрастания в качестве экспериментальных модулей для оценки качества морских вод.

**Ключевые слова:** обрастание, диатомовые водоросли, сапробионт, загрязнение, бухта Золотой Рог, Японское море.

**Begun A.A., Zvyagintsev A.Yu.** Bioindication of marine environment quality by diatom algae fouling on anthropogenic substrata // *Izv. TINRO.* — 2010. — Vol. 161. — P. 177–198.

The 94 species and intraspecific taxa of diatom algae from the classes Bacillariophyceae (59 species), Fragilariophyceae (13), and Coscinodiscophyceae (22) are found in marine fouling on experimental plates of organic glass mounted in the extreme eutrophic Golden Horn Bay and the moderate eutrophic Rynda Bay in the western Japan Sea exposed in summer-autumn 2000, including 7 species unknown previously in the Russian waters of the Japan Sea. Among these species, 32 ones are the indicators of organic pollution. Saprobiotic species-indicators of high organic pollution dominated in the Golden Horn Bay (up to  $18.1 \cdot 10^6$  cells·m<sup>-2</sup> at the berth № 44), whereas the saprobiont species-indicators of moderate organic pollution dom-

\* Бегун Андрей Аркадьевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, e-mail: andrejbegun@yandex.ru; Звягинцев Александр Юрьевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: ayzvyagin@gmail.com.

inated in the Rynda Bay ( $6.4 \cdot 10^6$  cells $\cdot$ m $^{-2}$ ). Phytoplankton forms of diatom algae were also more abundant in the Golden Horn Bay ( $3.5\text{--}4.8 \cdot 10^6$  cells $\cdot$ m $^{-2}$  in compare with  $0.4 \cdot 10^6$  cells $\cdot$ m $^{-2}$  in the Rynda Bay), and morphological anomalies of their cells were more frequent here, aswell, because of chronic anthropogenic pollution of this bay by organic substances, toxic elements, and heavy metals. Possibility is proven to use the diatom algae fouling for estimation of marine water quality.

**Key words:** marine fouling, diatom alga, saprobiont, water pollution, Golden Horn Bay, Japan Sea.

## Введение

В настоящее время сброс сточных вод различного происхождения в Мировой океан приобрел катастрофические размеры. Промышленные, сельскохозяйственные и коммунальные неочищенные сточные воды, попадающие в море из рек от прибрежных городов, а также термальные сбросные воды электростанций существенно нарушают естественные эволюционно сложившиеся процессы в прибрежных морских экосистемах.

В природных и лабораторных условиях при загрязнении морской среды сточными водами различного происхождения на субстрате развиваются определенные виды или комплексы видов микроводорослей, перечень которых неуклонно растет (Кузьмина, Руднева, 2005). Биоиндикационные методы санитарно-биологического анализа морских вод, основанные на выявлении видов микроводорослей — индикаторов чистых и загрязненных вод, крайне эффективны и могут быть использованы в системах биологического мониторинга (Ковальчук и др., 2008). Биоиндикация на основе анализа видового состава сообществ и обилия микроводорослей дает интегральную оценку результатов всех природных и антропогенных процессов, протекающих в водной среде, и представляет собой дешевый экспресс-метод, в то время как химические анализы трудоемки и дорогостоящи.

Обновленная база данных Европейского союза содержит более 3000 записей о видах-индикаторах сапробности (Барина и др., 2006), однако все эти работы были выполнены для континентальных водоемов. С конца прошлого столетия начали проводиться исследования качества соленых вод озер и лиманов Азово-Черноморского бассейна (Герасимюк, Гусяков, 1992; Гусяков и др., 1992; Борисюк, 2001; Герасимюк, Ковтун, 2007). К настоящему времени русскими исследователями (Борисюк, 2002; Герасимюк, Ковтун, 2007; Ковтун, 2008; Рачинская, 2008; Ковтун, Герасимюк, 2009) накоплено достаточно данных, характеризующих сапробность диатомовых водорослей и их использование в биоиндикационных системах оценки качества морских вод.

В российских водах Японского моря до настоящего времени полностью отсутствовали научные данные об использовании диатомовых водорослей в обрастании антропогенных субстратов для оценки качества морской среды.

Цель настоящей работы заключалась в оценке качества морских вод по показателям качественного и количественного развития сообществ диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в двух прибрежных акваториях зал. Петра Великого Японского моря (бухты Рында и Золотой Рог) с различным уровнем антропогенной нагрузки.

## Материалы и методы

Для изучения диатомовых водорослей обрастания использовали экспериментальные образцы-пластины (80,0 x 40,0 x 1,5 мм) из оргстекла, которые экспонировались в море в течение 15 сут в период с мая-июня по октябрь 2000 г. на горизонте 2 м с борта двух судов, пришвартованных к 44-му (район станции Мальцевская) и 42-му (район станции мыс Чуркин) причалам (рис. 1). Одновременно контрольные образцы испытывали в фоновой акватории — бухте Рында (о. Русский). Перед постановкой пластины зачищали наждачной бумагой до по-

лучения матовой поверхности и протирали их этиловым спиртом. После экспозиции 15-суточных пластин обрастание снимали целиком, затем пластины снова зачищали и выставляли в море (Звягинцев, 2005). Одновременно с отбором проб водорослей в исследуемых районах отбирали пробы морской воды и определяли концентрацию растворенного (*in situ*) и биохимически поглощаемого кислорода (БПК<sub>5</sub>), величину pH, количество сапрофитов, нефтеокисляющих и сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) согласно стандартной методике (Методы ..., 1978).

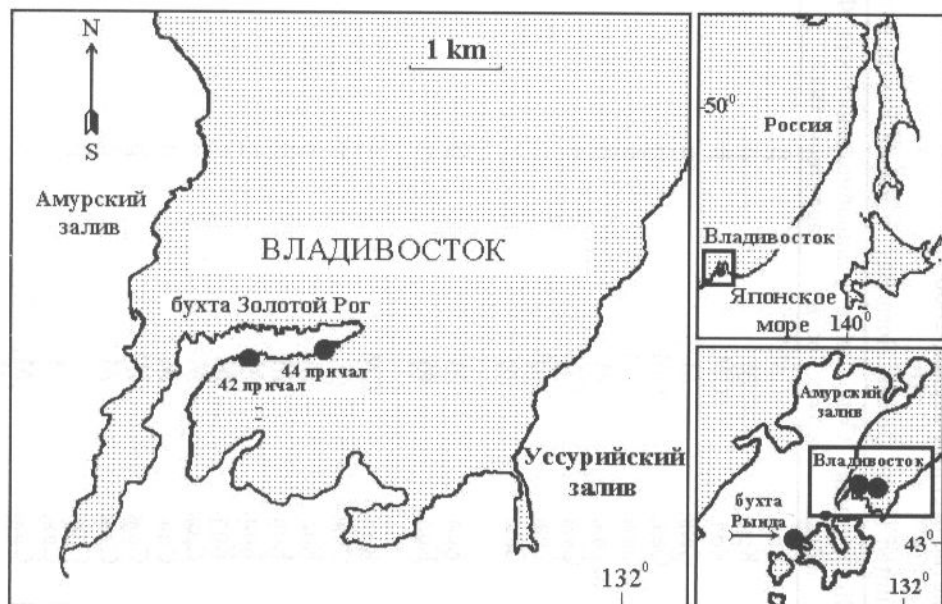


Рис. 1. Карта-схема района исследования  
Fig. 1. Scheme of the study area

Количественный учет клеток диатомовых водорослей производили в трех повторностях на временных водных препаратах под световым микроскопом "Olympus BX41", объектив UPLanF1 100x/1/.30 (Япония), масляная иммерсия. Подсчет клеток микроводорослей выполняли в камере типа Горяева на 10 см<sup>2</sup> с дальнейшим пересчетом на 1 м<sup>2</sup>. Биомассу определяли объемным методом, используя собственные и литературные данные измерений объема клеток каждого вида, считая удельный вес водорослей равным 1,2 г · мл<sup>-1</sup>. Методика микроскопических исследований диатомовых водорослей подробно описана ранее (Бегун и др., 2009а, б).

Данные о приуроченности каждого вида микроводорослей к местообитанию, солености, сапробиологической и фитогеографической принадлежности приведены согласно сводкам В.П. Герасимюк и Н.Е. Гуслякова (1992), В.П. Герасимюк и О.А. Ковтун (2007), С.С. Бариновой с соавторами (2006). Видовое разнообразие 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 Пielу ( $e$ ) вычисляли по формуле:  $e = H / \log_2 S$ , где  $S$  — общее число видов в пробе. При оценке сходства качественного состава фитопланктона использован коэффициент Серенсена-Чекановского:  $K_S = 2N_{(A+B)} / (N_A + N_B)$ , где  $N_{A+B}$  — общее число видов в описаниях А и В;  $N_A$  и  $N_B$  — число видов соответственно в описаниях А и В.

### Результаты и их обсуждение

В обрастании экспериментальных пластин из оргстекла в бухтах Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г. обнаружено 94 вида и внутривидовых таксона диатомовых водорослей (табл. 1). Представители класса

Аннотированный список диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухтах Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г.

Table 1

Annotated list of diatom algae in marine fouling on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay in Rynda Bay in summer-autumn, 2000

Таксон	Приуроченность к местообитанию	Подвижность	Жизненная форма	Отношение к солености	Сапробиологическая характеристика	Фитогеографическая характеристика
<i>Achnanthes brevipetes</i> Agardh	МФБ	Пр.	Кол.	СМ	β	К
<i>A. groenlandica</i> (Cleve) Grunov	МФБ	Пр.	Кол.	М	β	АБ
<i>A. longipes</i> Agardh	МФБ	Пр.	Кол.	СМ	β	К
<i>Actinoptuchus senarius</i> (Ehrenb.) Ehrenb.	БП	-	Свж.	М	-	К
<i>Amphora angusta</i> Greg.	МФБ	Под.	Свж.	СМ	β	АБТ
<i>A. caroliniana</i> Griffen	МФБ	Под.	Свж.	СМ	β	К
<i>A. hyalina</i> Kütz.	МФБ	Под.	Свж.	М	β	К
<i>A. proteus</i> Greg.	МФБ	Под.	Свж.	СМ	β	К
<i>A. parvula</i> Proschk.-Lavr.	МФБ	Под.	Свж.	СМ	-	Б
<i>Amphora</i> sp.	МФБ	Под.	Свж.	-	-	-
<i>Ardisonnea crystallina</i> (Agardh) Grunov	МФБ	Пр.	Кол.	М	β	БТ
= <i>Synedra crystallina</i> (Agardh) Kütz.	ФП	-	Кол.	М	-	Т
<i>Bacteriatrum furcatum</i> Schadb.						
<i>Berkeleya scopulorum</i> (Bréb. et Kütz.) E.J. Cox = <i>Navicula scopulorum</i> Bréb. et Kütz.	МФБ	Пр.	Кол.	СМ	-	АБТ
<i>Caloneis</i> sp.	МФБ	Под.	Свж.	-	-	-
<i>Cerataulina dentata</i> Hasle	ФП	-	Кол.	М	-	БТ
<i>Chaetoceros affinis</i> Laud.	ФП	-	Кол.	М	-	АБТ
<i>C. curvisetus</i> Cleve	ФП	-	Кол.	М	-	К
<i>C. didymus</i> Ehrenb.	ФП	-	Кол.	М	-	К
<i>C. peruvianus</i> Brightw.	ФП	-	Свж.	М	-	К
<i>Cocconeis costata</i> Greg.	МФБ	Пр.-под.	Свж.	М	β	К
<i>C. scutellum</i> Ehrenb.	МФБ	Пр.-под.	Свж.	СМ	β	К
<i>C. scutellum</i> var. <i>baldjickiana</i> Grunov	МФБ	Пр.-под.	Свж.	М	β	Б
<i>C. scutellum</i> var. <i>adjuncta</i> A. Schmidt	МФБ	Пр.-под.	Свж.	М	β	Б
<i>Coccinodiscus granii</i> Gough	БП	-	Свж.	М	-	К
<i>C. oculus-iridis</i> Ehrenb.	БП	-	Свж.	М	β	К
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenb.) Reim. et Lewin = <i>Nitzschia closterium</i> (Ehrenb.) W. Sm.	БП	Пр.-под.	Свж.	СМ	β	АБ

<i>Diploneis chersonensis</i> (Grunov) Cleve	МФБ	Под.	Свж.	М	-	АБТ
<i>D. interrupta</i> (Kütz.) Cleve	МФБ	Под.	Свж.	СМ	-	АБТ
<i>D. smithii</i> (Bréb.) Cleve	МФБ	Под.	Свж.	СМ	-	К
<i>D. subsincta</i> (A.S.) Cleve	МФБ	Под.	Свж.	М	-	АБТ
<i>Ditylum brightwellii</i> (T. West) Grunov	ФП	-	Свж.	М	-	БТ
<i>Donkinia recta</i> (Donkin) Grunov	БП	Под.	Свж.	М	-	БТ
= <i>Gyrosigma rectum</i> (Donkin) Cleve						
<i>Entomoneta alata</i> (Ehrenb.) Ehrenb.	БП	Под.	Свж.	С	-	АБТ
= <i>Amphiprora alata</i> (Ehrenb.) Kütz.	ФП	-	Кол.	М	-	К
<i>Eucampia zodiacus</i> Ehrenb.	МФБ	Пр.	Кол.	М	-	Б
<i>Falcula media</i> var. <i>subsalina</i> Proschk.-Lavr.	БП	-	Кол.	М	-	К
<i>Fragilaria striatula</i> Lyngb.	МФБ	Пр.	Кол.	М	β	К
<i>Grammatophora marina</i> (Lyngb.) Kütz.	ФП	-	Кол.	М	-	К
<i>Guinardia striata</i> (Stolterfoth) Hasle						
= <i>Rhizosolenia stolterfothii</i> H. Perag.						
<i>Gyrosigma tenuissimum</i> (W. Sm.) Griff. et Henfr.	МФБ	Под.	Свж.	М	-	АБТ
<i>Gomphonemopsis</i> sp.	МФБ	Пр.	Кол.	-	-	-
<i>Hastea subagnita</i> (Proschk.-Lavr.) N.I. Kar. = <i>Navicula subagnita</i> Proschk.-Lavr.	МФБ	Под.	Свж.	М	-	Б
<i>Hemiaulus hauckii</i> Grunov	ФП	-	Кол.	М	-	БТ
<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve	ФП	-	Кол.	М	-	К
<i>L. mediterraneus</i> (H. Perag.) Hasle	ФП	-	Кол.	М	-	К
<i>Limnophora abbreviata</i> Agardh	МФБ	Пр.	Кол.	М	β	АБ
<i>L. flabellata</i> Agardh	МФБ	Пр.	Кол.	М	β	БТ
<i>Limnophora</i> sp.	МФБ	Пр.	Кол.	-	-	-
<i>Lyrella hennedey</i> (W. Sm.) A.J. Stick. et D.G. Mann = <i>Navicula hennedey</i> W. Sm.	МФБ	Под.	Свж.	М	-	АБТ
<i>Melosira lineata</i> (Dillw.) Agardh						
= <i>M. juergensii</i> Agardh	БП	-	Кол.	СМ	α	АБТ
<i>M. moniliformis</i> (O.F. Müll.) Agardh	БП	-	Кол.	СМ	α	К
<i>M. moniliformis</i> var. <i>subglobosa</i> Grunov	БП	-	Кол.	СМ	α	АБ
<i>Meridion circulare</i> (Grev.) Agardh	БП	-	Кол.	П	χ <sup>0</sup>	К
<i>Navicula cryptocephala</i> Kütz.	МФБ	Под.	Свж.	ПС	α	АБ
<i>N. directa</i> (W. Sm.) Ralfs ex Pritch.	МФБ	Под.	Свж.	М	-	К
<i>N. distans</i> (W. Sm.) Ralfs.	МФБ	Под.	Свж.	М	-	БТ

Таксон	Приуроченность к местообитанию	Подвижность	Жизненная форма	Отношение к солености	Сaproбиологическая характеристика	Фитогеографическая характеристика
<i>N. perrhombus</i> Hustedt	МФБ	Под.	Свж.	М	—	БТ
<i>Navicula</i> sp.	МФБ	—	—	—	—	—
<i>Neosynedra provincialis</i> (Grunov) Williams	МФБ	Пр.	Кол.	М	—	Б
et Round = <i>Synedra provincialis</i> Grunov	МФБ	Под.	Свж.	М	—	К
<i>Nitzschia angularis</i> W. Sm.	МФБ	Под.	Свж.	М	—	БТ
<i>N. distans</i> Greg.	МФБ	Под.	Свж.	С	β	Б
<i>N. hybrida</i> f. <i>hyalina</i> Proschk.-Lavr.	БП	Под.	Свж.	СМ	—	АБТ
<i>N. longissima</i> (Bréb. ex Kütz.) Ralfs ex Pritch.						
<i>N. macilenta</i> Greg. = <i>Homoeocladia martiana</i> Agardh	МФБ	Под.	Свж.	М	—	К
<i>N. sigma</i> (Kütz.) W. Sm.	МФБ	Под.	Свж.	СМ	β-α	К
<i>N. tenuirostris</i> Mereschk.	БП	Пр.-под.	Свж.	СМ	—	К
<i>N. vermicularis</i> (Kütz.) Hantzsch ex Rabenh.	МФБ	Под.	Свж.	С	o	БТ
<i>Nitzschia</i> sp.	МФБ	—	—	—	—	—
<i>Odontella aurita</i> (Lyngb.) Agardh	БП	—	Кол.	М	—	К
<i>Parlibellus delognei</i> (V.H.) E.J. Cox						
= <i>Navicula grevillei</i> (Agardh) Cleve	МФБ	Под.	Кол.	М	—	АБТ
<i>P. rhombica</i> (Greg.) L.I. Ryab. = <i>Navicula rhombica</i> Greg.	МФБ	Под.	Кол.	СМ	—	Б
<i>Plagiotropis elegans</i> (W. Sm.) Grunov	МФБ	Под.	Свж.	М	—	Б
in V.H. = <i>Tropidoneis elegans</i> Cleve						
<i>P. lepidoptera</i> (Greg.) Reim. = <i>Tropidoneis lepidoptera</i> (Greg.) Cleve	МФБ	Под.	Свж.	М	o	К
<i>Pleurosigma clevei</i> Grunov	МФБ	Под.	Свж.	М	—	АБ
<i>P. formosum</i> W. Sm.	МФБ	Под.	Свж.	М	—	БТ
<i>P. intermedium</i> W. Sm. = <i>P. nubecula</i> Bréb.	МФБ	Под.	Свж.	М	—	Б
<i>P. naviculaceum</i> Bréb. = <i>P. japonicum</i> Castr.	МФБ	Под.	Свж.	М	—	АБТ
<i>Proschkinia porretzkajae</i> (O. Korotk.) D.G. Mann = <i>Navicula porretzkajae</i> O. Korotk. Sensu. N.I. Kar.	МФБ	Под.	Свж.	М	—	АБ
<i>Psammodictyon panduriforme</i> (Greg.) D.G. Mann = <i>Nitzschia panduriformis</i> Greg.	МФБ	Под.	Свж.	М	—	АБТ



*Pseudo-nitzschia calliantha* Lundholm,

Moestrup et Hasle

*P. pungens* (Grunov ex Cleve) Hasle

*Rhabdonema arcuatum* (Lyngb.) Kütz.

*Rhizosolenia setigera* Brightw.

*Rhoicosphenia marina* (W. Sm.) M. Schmidt

*Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve

*Striatella unipunctata* (Lyngb.) Agardh

*Surirella fastuosa* Ehrenb.

*Synedra toxoneides* (Ostrup) Hustedt

*Tabularia fasciculata* (Agardh) Williams

et Round = *Synedra tabulata* (Agardh)

Kütz. var. *fasciculata* (Kütz.) Hust.

*T. parva* (Kütz.) Williams et Round

= *Synedra tabulata* (Kütz.) Hust.

*Thalassionema nitzschioides* (Grunov)

Mereschk.

*Trigonium arcticum* f. *baleanum* (Ehrenb.)

Meunier = *Triceratium arcticum*

f. *baleana* (Ehrenb.) Meunier

*Trachyneis aspera* (Ehrenb.) Cleve

*Tryblionella hungarica* (Grunov)

D.G. Mann = *Nitzschia hungarica* Grunov

*Undatella lineolata* (Ehrenb.) L.I. Ryab.

= *Amphora lineolata* (Ehrenb.) Kütz.

ФП	—	Кол.	М	—	К
ФП	—	Кол.	М	—	К
БП	—	Кол.	М	—	К
ФП	—	Свж.	М	—	К
МФБ	Пр.	Кол.	М	β	АБ
ФП	—	Кол.	М	α	К
БП	—	Кол.	М	—	БТ
МФБ	Под.	Свж.	М	—	АБТ
МФБ	Пр.	Кол.	М	β	АБ
МФБ	—	Кол.	СМ	α	К
МФБ	Пр.	Кол.	М	α	АБТ
БП	—	Кол.	СМ	—	АБТ
МФБ	Пр.	Кол.	М	—	АБ
МФБ	Под.	Свж.	М	β	АБТ
МФБ	Под.	Свж.	С	α	К
МФБ	Под.	Свж.	СМ	β	АБТ

*Примечание.* Приуроченность к местообитанию: МФБ — микрофитобентосный, БП — бенто-планктонный, ФП — фитопланктонный; жизненная форма: Свж. — свободноживущий, Кол. — колониальный; подвижность: Под. — подвижный, Пр. — прикрепленный, Пр.-под. — прикрепленно-подвижный; приуроченность к солёности: М — морской, СМ — солоноватоводно-морской, С — солоноватоводный, ПС — пресноводно-солоноватоводный, П — пресноводный; сапробиологическая характеристика: α — альфа-мезосапробионт, β — бета-мезосапробионт, β-α — бета-альфа-мезосапробионт, о — олигосапробионт, х-о — ксено-олигосапробионт; фитогеографическая характеристика: К — космополит, Б — бореальный, АБ — аркто-бореальный, АБТ — аркто-бореально-тропический, БТ — бореально-тропический, Т — тропический.

Bacillariophyceae составляли 60,6 % общего количества видов диатомей. Классы Coscinodiscophyceae и Fragilariophyceae представлены в наименьшей степени (соответственно 23,4 и 15,9 %). Доминирующее положение по числу видов и родовому обилию занимали диатомеи из класса Bacillariophyceae: *Amphora* Ehrenb. et Kütz. (6 видов), *Nitzschia* Hassall (9) и *Navicula* Bory (5).

Впервые для российских вод Японского моря приведено 7 видов диатомей: *Ardissonaea crystallina* (Agardh) Grun., *Falcula media* var. *subsalina* Proschk.-Lavr., *Neosynedra provincialis* (Grunov) Williams et Round, *Gyrosigma tenuissimum* (W. Sm.) Griff. et Henfr., *Nitzschia hybrida* f. *hyalina* Proschk.-Lavr., *Synedra toxoneides* (Ostrup) Hustedt и *Pleurosigma clevei* Grunov.

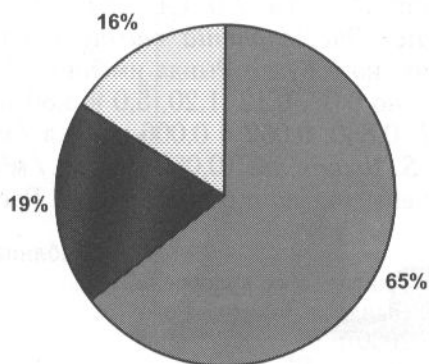
В бухте Золотой Рог в районах 42- и 44-го причалов отмечено соответственно 45 и 44 вида микроводорослей, в бухте Рында — 60. В целом флора микроводорослей бухты Золотой Рог по своему составу представляла собой обедненную флору бухты Рында, за исключением 5 видов, характерных только для кутовой части бухты Золотой Рог. Уровень качественного сходства видовых списков диатомовых водорослей в бухте Золотой Рог в районах 42- и 44-го причалов достаточно высок, коэффициент Серенсена-Чекановского составил 0,87. Сходство видовых списков диатомовых водорослей бухты Золотой Рог с фоновой акваторией Рында значительно ниже (0,64). Для обеих акваторий встречено 26 общих видов, это преимущественно широко распространенные эврибионтные, планктонные и бенто-планктонные диатомовые водоросли родов *Coscinodiscus* Ehrenb., *Melosira* C. Agardh, *Ditylum* J.W. Bailey, *Eucampia* Ehrenb., *Leptocylindrus* Cleve, *Skeletonema* Grev., *Thalassionema* Grunov ex Mereschk., осевшие на поверхность пластин из толщи воды в период массового развития фитопланктона.

Диатомовые водоросли, обнаруженные в обрастании экспериментальных пластин исследуемых акваторий, представлены подвижными (60,9 %), прикрепленными (26,5 %) и прикрепленно-подвижными (12,6 %) формами, которые в свою очередь являются свободноживущими (54 %) и колониальными (46 %) (табл. 1). Как правило, по числу видов преобладали свободноживущие виды, способные свободно передвигаться и активно заселять поверхность любых субстратов. Колонии микроводорослей имели самые разнообразные жизненные формы: пучковидные, трубчатые, находящиеся в слизистых тяжах, веерообразные, прикрепленные к субстрату с помощью слизи, нитчатые, лентовидные и зигзаговидные, у которых клетки соединены с помощью апикальных слизиевых пор. Из всех найденных видов к типичным эпифитам и обрастателям твердых субстратов относится 20 видов диатомовых водорослей. Другая часть видов принадлежит к флоре песчаных и илистых грунтов (эписаммон и эпипелон), попавших на субстрат в период взмучивания вод, либо к формам, осевшим из толщи воды.

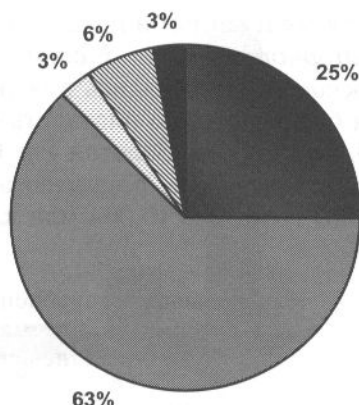
Экологическая характеристика диатомовых водорослей по отношению к местообитанию показывает, что 65 % видов являются микрофитобентосными, 19 относятся к бенто-планктонным (тихопелагическим) и 16 % — к планктонным формам (табл. 1, рис. 2). По отношению к солености преобладают эвригаллинные виды, из них морские составляют 67 %, солоноватоводно-морские — 16, солоноватоводные — 13, и в незначительной степени представлены пресноводно-солоноватоводные и пресноводные — по 2 %. Обзор флоры исследуемых водоемов существенно дополняет фитогеографическая характеристика диатомовых водорослей, тесно связанная с их экологией. Из всех встреченных видов 37 % составляют космополитные и 36 % — бореальные виды. Существенную долю составляют аркто-бореальные (14 %) и бореально-тропические (10 %) виды (рис. 2). По отношению к pH среды обитания на экспериментальных пластинах преобладают алкалофильные виды микроводорослей (98 %), и только *Tabularia fasciculata* и *T. parva* оказались индифферентными к этому показателю.

Выявлено 32 вида диатомовых водорослей, являющихся индикаторами органического загрязнения вод, среди них преобладали индикаторы умеренно загряз-

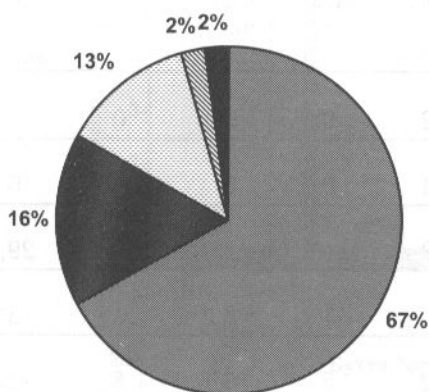




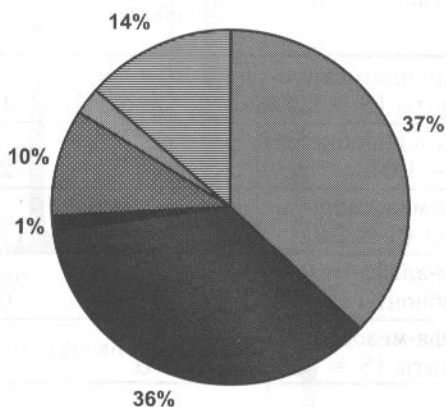
■ Микрофитобентосный  
 ■ Бенто-планктонный  
 ▨ Фитопланктонный



■ альфа-мезосапробионт  
 ■ бета-мезосапробионт  
 ▨ бета-альфа-мезосапробионт  
 ▨ олигосапробионт  
 ■ ксено-олигосапробионт



■ Морской  
 ■ Солонатоводно-морской  
 ▨ Пресноводно-солонатоводный  
 ▨ Пресноводно-солонатоводный  
 ■ Пресноводный



■ Космополит  
 ■ Бореальный  
 ■ Тропический  
 ▨ Бореально-тропический  
 ▨ Аркто-бореально-тропический  
 ▨ Аркто-бореальный

Рис. 2. Эколого-географическая характеристика видов диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухтах Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г.

Fig. 2. Ecological and geographical characteristic of diatom algae in marine fouling on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay and Rynda Bay in summer-autumn, 2000

ненных органикой вод бета-мезосапробионты (63 %). Распределение числа видов-индикаторов сапробионности по акваториям приведено в табл. 2. Максимальное число видов-индикаторов значительно загрязненных вод альфа-мезосапробионтов (8 видов) отмечено в бухте Золотой Рог в районе 44-го причала. Среди видов-индикаторов условно "чистых" вод в бухте Рында отмечено 2 олигосапробионта и 1 ксено-олигосапробионт.

Анализ количественных показателей видов-индикаторов органического загрязнения вод обнаружил следующую закономерность: виды-индикаторы условно "чистых" вод олиго- и ксено-олигосапробионты с индексами сапробионности 0,4–1,0 (*Meridion circulare*, *Nitzschia vermicularis* и *Plagiotropis lepidoptera*) отмечены только в фоновой акватории Рында при невысокой плотности (соответственно 0,006, 0,002 и 0,001 млн кл./м<sup>2</sup>). Индикаторы вод умеренного загрязне-

ния бета-мезосапробионты с индексом сапробности 2,0 (*A. crystallina*, *Grammatophora marina*, *Licmophora abbreviata*, *Rhoicosphenia marina* и виды рода *Cocconeis*) встречались в обеих акваториях, но в бухте Рында имели на 1–2 порядка более высокую плотность (соответственно 0,07, 0,12, 1,20, 5,0 и 3,30 млн кл./м<sup>2</sup>), чем в бухте Золотой Рог (0,009, 0,007, 0,860, 0,002 и 0,006 млн кл./м<sup>2</sup>). Представители группы бета-мезосапробионтов *S. toxoneides* (0,060 млн кл./м<sup>2</sup>) и *N. hybrida* f. *hyalina* (0,004 млн кл./м<sup>2</sup>) отмечены только в бухте Золотой Рог.

Таблица 2

Соотношение сапробионтных видов у диатомовых водорослей в сообществе обрастания в бухтах Рында и Золотой Рог в летне-осенний период 2000 г., %

Table 2

Percentage of saprobiontic species from diatom algae in marine fouling in the Golden Horn Bay and Rynda Bay in summer-autumn, 2000

Сапробиологическая группа и индекс сапробности	Степень сапробности видов-индикаторов	Бухта Рында		Бухта Золотой Рог, 42-й причал		Бухта Золотой Рог, 44-й причал	
		Кол-во таксонов	Доля от общего числа таксонов	Кол-во таксонов	Доля от общего числа таксонов	Кол-во таксонов	Доля от общего числа таксонов
Ксено-олигосапробионты (S = 0,4)	χ-0	1	3,2	0	0	0	0
Олигосапробионты (S = 1,0)	0	2	6,4	0	0	0	0
Бета-мезосапробионты (S = 2,0)	β	17	54,8	14	45,1	9	29,0
Бета-альфа-мезосапробионты (S = 2,4)	β-α	0	0	1	3,2	1	3,2
Альфа-мезосапробионты (S = 3,0)	α	1	3,2	5	16,1	8	22,6

Из видов-индикаторов значительного органического загрязнения альфа-мезосапробионтов с индексом сапробности 3,0 в бухте Золотой Рог встречено 9 видов: *Amphora caroliniana* (2,4 и 12,0 млн кл./м<sup>2</sup> соответственно в районе 42-го и 44-го причалов), *Melosira lineata* (0,02 и 0,09 млн кл./м<sup>2</sup>), *M. moniliformis* (0,009 и 0,020 млн кл./м<sup>2</sup>), *M. moniliformis* var. *subglobosa* (в районе 44-го причала — 0,7 млн кл./м<sup>2</sup>), *Navicula cryptocephala* (0,004 и 0,002 млн кл./м<sup>2</sup>), *T. fasciculata* (5,6 и 7,0 млн кл./м<sup>2</sup>), *T. parva* (в районе 44-го причала — 0,15 млн кл./м<sup>2</sup>) и *Tryblionella hungarica* (в районе 44-го причала — 0,012 млн кл./м<sup>2</sup>). Только один альфа-мезосапробионт *Skeletonema costatum* отмечен во всех исследуемых районах, но в районе 44-го причала его плотность была на порядок выше (12,9 млн кл./м<sup>2</sup>) по сравнению с районом 42 причалом (6 млн кл./м<sup>2</sup>).

В фоновой акватории бухты Рында в течение всего исследуемого периода преобладали бета-мезосапробионты (0,20–6,37 млн кл./м<sup>2</sup>), за исключением незначительного пика альфа-мезосапробионтов (0,20 млн кл./м<sup>2</sup>) в первой половине октября (рис. 3). В бухте Золотой Рог в районе 42-го причала большую часть исследуемого периода доминировали альфа-мезосапробионты (0,30–6,40 млн кл./м<sup>2</sup>), за исключением максимумов бета-мезосапробионтов в первой половине августа (2,14 млн кл./м<sup>2</sup>) и в первой половине июня (0,95 млн кл./м<sup>2</sup>). В другие месяцы плотность бета-мезосапробионтов была невысока и варьировала в пределах 0,1–0,4 млн кл./м<sup>2</sup>. В бухте Золотой Рог в районе 44-го причала количественные показатели диатомовых водорослей почти полностью обуславливались альфа-мезосапробионтами (0,18–18,10 млн кл./м<sup>2</sup>). Плотность бета-мезосапробионтов в этом районе была очень низка и не превышала 0,12–0,68 млн кл./м<sup>2</sup>. Среднегодовая плотность бета-мезосапробионтов составила в бухте Рында

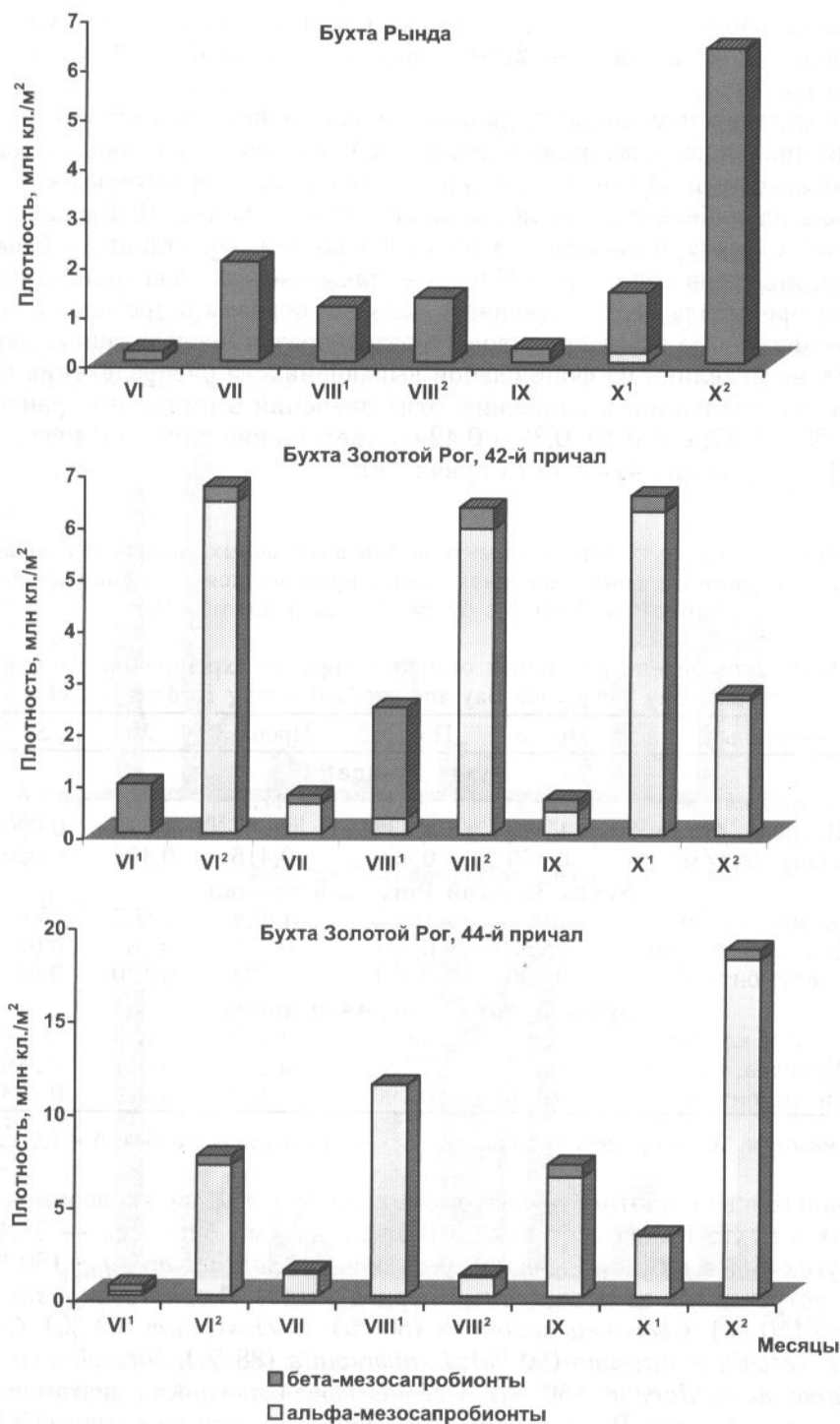


Рис. 3. Сезонная динамика плотности сапробиологических групп диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухтах Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г.: <sup>1</sup> — первая, <sup>2</sup> — вторая половина месяца

Fig. 3. Seasonal dynamics of saprobiological diatom algae density in marine fouling on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay and Rynda Bay in summer-autumn, 2000: <sup>1</sup> — the first half of month, <sup>2</sup> — the second half of month

1,79 млн кл./м<sup>2</sup>, в бухте Золотой Рог в районе 42-го причала — 0,58 млн кл./м<sup>2</sup> и в районе 44-го причала — 0,31 млн кл./м<sup>2</sup>. Соответствующие показатели для

альфа-мезосапробионтов — в бухте Рында 0,029 млн кл./м<sup>2</sup>, в бухте Золотой Рог в районе 42-го причала — 2,810 млн кл./м<sup>2</sup> и в районе 44-го причала — 6,080 млн кл./м<sup>2</sup>.

Минимальная изменчивость плотности поселения характерна главным образом для тех видов диатомовых водорослей, которые на период отбора проб были доминантными. Причем чем выше у таких видов относительная плотность, тем меньше вариабельность ее абсолютных величин (табл. 3). Вариации общих показателей структуры сообщества микроводорослей обрастания — биомассы и плотности, индексов Шеннона и Пиелу — также весьма невелики: стандартная ошибка не превысила 38 %, изменяясь главным образом в пределах 5–15 %. В целом среднегодовые значения видового разнообразия исследованных акваторий относительно невелики на фоне слабой выравненности распределения видов по индексам при тенденции к снижению этих значений в импактном районе ( $H = 1,83, 1,25$  и  $1,52$ ;  $e = 0,49, 0,35$  и  $0,42$  соответственно в бухте Рында и в бухте Золотой Рог в районах 42- и 44-го причалов).

Таблица 3

Изменчивость некоторых общих характеристик диатомовых водорослей обрастания на экспериментальных пластинах, экспонировавшихся в течение 15 сут в октябре 2000 г. в бухтах Рында и Золотой Рог

Table 3

Variability of some general parameters of diatom algae on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay and Rynda Bay and exposed during 15 days in October, 2000

Показатель	Проба 1	Проба 2	Проба 3	$\bar{X}$	SE	$\Delta, \%$
<b>Бухта Рында</b>						
Плотность, млн кл./м <sup>2</sup>	40,1	48,8	41,7	43,7	2,6	6
Индекс Шеннона, бит/м <sup>2</sup>	1,140	1,438	1,367	1,315	0,090	7
Индекс Пиелу, бит/м <sup>2</sup>	0,369	0,436	0,415	0,407	0,020	5
<b>Бухта Золотой Рог, 42-й причал</b>						
Плотность, млн кл./м <sup>2</sup>	128,1	109,5	130,4	122,7	6,6	5
Индекс Шеннона, бит/м <sup>2</sup>	0,293	0,371	0,351	0,339	0,023	7
Индекс Пиелу, бит/м <sup>2</sup>	0,106	0,131	0,124	0,120	0,008	6
<b>Бухта Золотой Рог, 44-й причал</b>						
Плотность, млн кл./м <sup>2</sup>	393,1	286,2	302,5	327,3	33,3	10
Индекс Шеннона, бит/м <sup>2</sup>	1,384	0,587	0,463	0,811	0,289	36
Индекс Пиелу, бит/м <sup>2</sup>	0,479	0,190	0,152	0,274	0,103	38

Примечание.  $\bar{X}$  — средняя численность; SE — стандартная ошибка;  $\Delta = (\bar{X}/SE) \cdot 100$ .

Среднегодовая плотность диатомовых водорослей на экспериментальных пластинах в бухте Рында составляла 10,5 млн кл./м<sup>2</sup>, биомасса — 35,4 мг/м<sup>2</sup>. Чаще других видов в бухте Рында встречались *Achnanthes brevipes* (50 % общего числа встреченных за исследуемый период видов), *Amphora angusta* (88 %), *A. hyalina* (50 %), *Cocconeis scutellum* (50 %), *C. closterium* (63 %), *G. marina* (62 %), *Nitzschia longissima* (50 %), *L. abbreviata* (88 %), *Nitzschia* sp. (88 %), *Pleurosigma naviculaceum* (50 %). Среднегодовая плотность диатомовых водорослей в бухте Золотой Рог в района 42-го причала почти не отличалась от таковой для фонового района и составляла 10,4 млн кл./м<sup>2</sup>, биомасса — 32 мг/м<sup>2</sup>. Высокую частоту встречаемости в этом районе имели виды *A. brevipes* (55 %), *A. angusta* (100 %), *C. closterium* (67 %), *L. abbreviata* (78 %), *Parlibellus delognei* (55 %), *Pleurosigma intermedium* (67 %), *P. naviculaceum* (67 %), *T. fasciculata* (55 %), *Trachyneis aspera* (78 %). В районе 44-го причала бухты Золотой Рог отмечены более низкие показатели среднегодовой плотности диатомовых водорослей (8,7 млн кл./м<sup>2</sup>) и биомассы (25,9 мг/м<sup>2</sup>). Высокую частоту встречаемости имели виды, характерные для района 42-го причала, за исключением *M. moniliformis* (78 %).

Общая плотность диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухте Рында изменялась в пределах 0,44–33,90 млн кл./м<sup>2</sup>, биомасса — от 1,01 до 94,10 мг/м<sup>2</sup> (рис. 4). Основным максимумом плотности пришелся на вторую половину июня и был связан с доминированием вида *Nitzschia tenuirostris* при минимальных величинах индексов Шеннона-Винера и Пиелу (0,51 и 0,14) (рис. 5). Помимо основного максимума, был отмечен дополнительный — во второй половине октября за счет развития мелкоклеточной диатомеи *Nitzschia* sp. (9,0 млн кл./м<sup>2</sup>), *R. marina* (6,0 млн кл./м<sup>2</sup>) и *C. scutellum* (2,7 млн кл./м<sup>2</sup>). Минимальная плотность диатомовых водорослей прослеживалась в первой половине сентября в период развития *Coscinodiscus oculus-iridis*, *A. angusta* и *T. aspera* и была сопряжена с высокими значениями индексов видового разнообразия и выравненности (2,29 и 0,77).

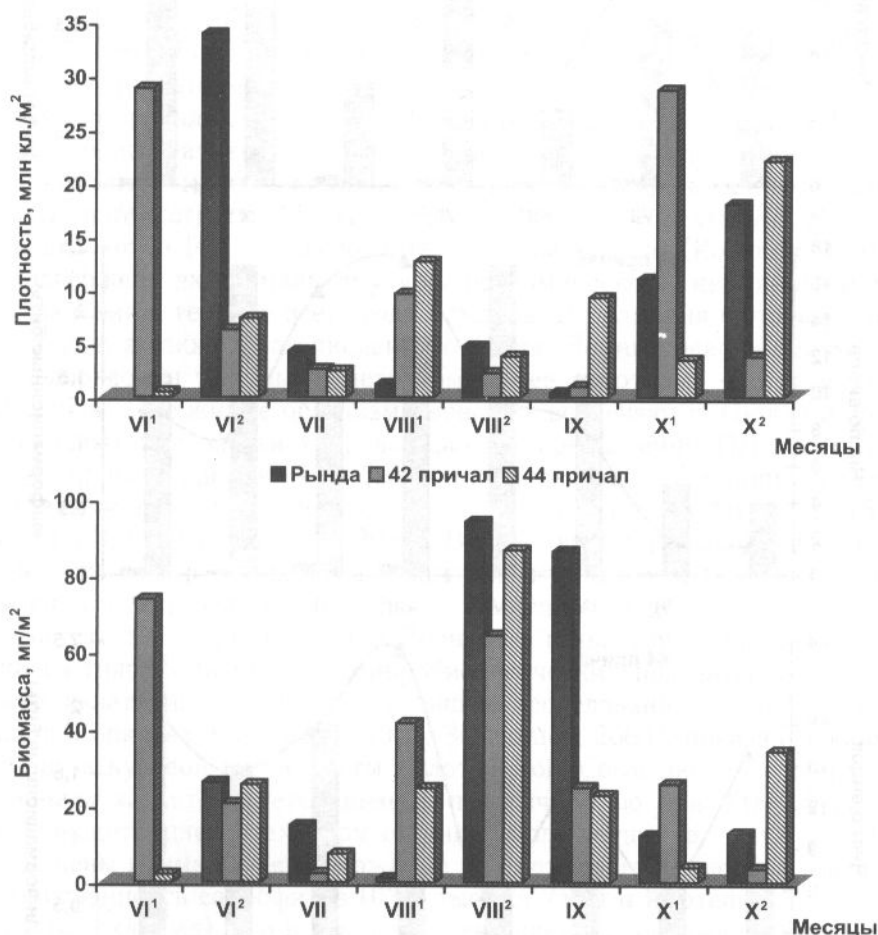


Рис. 4. Сезонная динамика общей плотности и биомассы диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухтах Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г.

Fig. 4. Seasonal dynamics of total density and biomass of diatom algae in marine fouling on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay and Rynda Bay in summer-autumn, 2000

В бухте Золотой Рог в районе 42-го причала общая плотность диатомовых водорослей варьировала в пределах 1,01–28,80 млн кл./м<sup>2</sup>, биомасса — 2,3–73,7 мг/м<sup>2</sup> (рис. 4). Отмечено два почти равных по значимости максимума плотности — в первой половине июня (28,8 млн кл./м<sup>2</sup>) и в первой половине октября (28,7 млн кл./м<sup>2</sup>). Первый максимум обусловлен доминированием вида *Fragilaria striatula* (26,2 млн кл./м<sup>2</sup>) и сопряжен с минимальными значениями индексов



Шеннона и Пиелу (0,22 и 0,10), второй — видами *Nitzschia* sp. (22,0 млн кл./м<sup>2</sup>) и *S. costatum* (6,0 млн кл./м<sup>2</sup>), значения индексов составили 1,07 и 0,26 (рис. 5). Кроме основных, прослеживался дополнительный максимум плотности — в первой половине августа при доминировании диатомей *Proschkinia poretzkajae* (3,0 млн кл./м<sup>2</sup>) и *S. costatum* (5,8 млн кл./м<sup>2</sup>). Минимальная плотность диатомей прослеживалась в первой половине сентября в период развития *Ditylum brightwellii*, *S. costatum* и *A. angusta* при высоких значениях индексов (2,16 и 0,63).

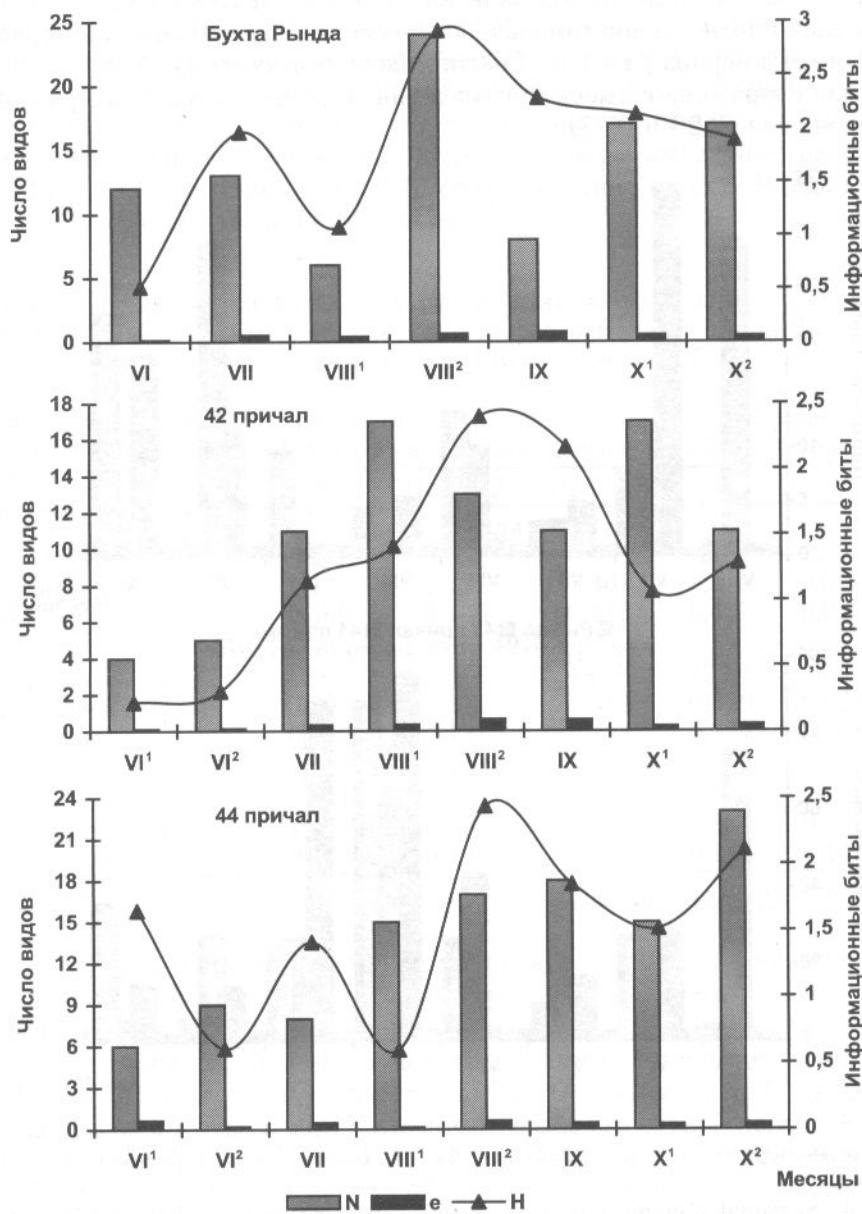


Рис. 5. Сезонная динамика индексов Шеннона ( $H$ ), Пиелу ( $e$ ) и числа видов ( $N$ ) диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухтах Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г.

Fig. 5. Seasonal dynamics of Shannon ( $H$ ) and Pielou ( $e$ ) indices and species number ( $N$ ) for the diatom algae community in marine fouling on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay and Rynda Bay in summer-autumn, 2000

В бухте Золотой Рог в районе 44-го причала общая плотность диатомовых водорослей варьировала в пределах 0,48–22,08 млн кл./м<sup>2</sup>, биомасса — 2,02–

86,70 мг/м<sup>2</sup> (см. рис. 4). Самый высокий максимум плотности отмечен во второй половине октября в период развития видов *A. caroliniana* (12 млн кл./м<sup>2</sup>) и *S. costatum* (4 млн кл./м<sup>2</sup>) при максимальном числе видов (23) и достаточно высоких показателях индексов Шеннона (2,11) и Пиелу (0,47) (рис. 5). Второй по значимости максимум зарегистрирован в первой половине августа за счет доминирования вида *S. costatum* (12 млн кл./м<sup>2</sup>) при самых высоких во второй половине месяца значениях видового разнообразия (2,44) и умеренной выравненности (0,62). Минимальная плотность прослеживалась в первой половине июня в период развития диатомей *Pseudo-nitzschia calliantha* (0,26 млн кл./м<sup>2</sup>) и *Tabularia parva* (0,15 млн кл./м<sup>2</sup>) на фоне минимального числа видов (6) и умеренных значений индексов Шеннона (1,65) и Пиелу (0,64).

Абсолютная и относительная плотность фитопланктонных форм диатомовых водорослей и их покоящихся клеток в обрастании экспериментальных пластин бухты Золотой Рог значительно выше (3,94 млн кл./м<sup>2</sup>, или 50 % среднегодовой плотности диатомей, в районе 44-го причала и 4,82 млн кл./м<sup>2</sup>, или 47 %, в районе 42-го причала), чем в бухте Рында (0,43 млн кл./м<sup>2</sup>, или 3 %) (рис. 6). В этой акватории значительную часть исследуемого периода доминировали планктонные диатомеи и их покоящиеся клетки, преимущественно *S. costatum*, *Bacteriastrum delicatulum*, *Chaetoceros peruvianus*, *D. brightwellii*, *P. calliantha*.

Бухта Золотой Рог, согласно литературным данным (Корякова и др., 2002, 2003), подвержена экстремальному уровню химического, нефтяного и термального загрязнения в течение всего года в результате влияния бытовых и промышленных стоков, а также многочисленного флота. Донные осадки бухты загрязнены сероводородом и тяжелыми металлами, в ее некоторых частях обнаружены "мертвые зоны", где живые организмы вовсе не встречаются (Белан и др., 2003). Для этой акватории зарегистрирован рекорд превышения ПДК загрязнителей различного происхождения (41,0 %), на порядок превосходящий соответствующий показатель даже для наиболее загрязненных заливов Амурский (5,9 %) и Находка (4,4 %) (Огородникова, 2001). В то же время фоновая акватория бухты Рында не испытывает влияния неочищенных сточных вод и других источников антропогенного загрязнения, ее воды по основным гидрохимическим показателям соответствуют открытым водам Японского моря (Корякова, 1987).

Анализ гидрохимических и микробиологических показателей воды для исследуемых акваторий, полученных в нашем исследовании и опубликованных в ряде работ (Корякова и др., 2002, 2003; Звягинцев, 2005), показал максимальное загрязнение в кутовой части бухты Золотой Рог. Согласно этим данным, район 44-го причала характеризуется низкой прозрачностью и в 2,0–2,5 раза более высокой концентрацией всех форм органического вещества, чем в бухте Рында. Здесь отмечены наименьшее содержание растворенного кислорода в воде, самая высокая численность сапрофитов (63,7 тыс. кл./мл) и нефтеокисляющих бактерий (14,1 тыс. кл./мл), что в два раза превышает их содержание в районе 42-го причала и соответственно в 8 и 14 раз в бухте Рында.

Содержание всех тяжелых металлов в исследуемых районах возрастает в последовательности: бухта Рында < 42-й причал < 44-й причал бухты Золотой Рог (Корякова и др., 2002). В пионерном сообществе микрообрастания экспериментальных пластин, экспонируемых в загрязненной бухте, численность всех исследуемых групп бактерий в 2–4 раза превышала этот показатель для пластин в контрольной бухте. В бухте Золотой Рог в районе 44-го причала микрообрастание заметно богаче по количеству железобактерий, гнилостных анаэробов и сапрофитов по сравнению с 42-м причалом (Корякова и др., 2003).

В фоновой акватории бухты Рында отмечены максимальные концентрации растворенного кислорода и величины рН и самое низкое значение БПК<sub>5</sub>, что обусловлено отсутствием источников хронического загрязнения и свободным водообменом с открытым морем (Корякова, 1987). По данным о тропности вод

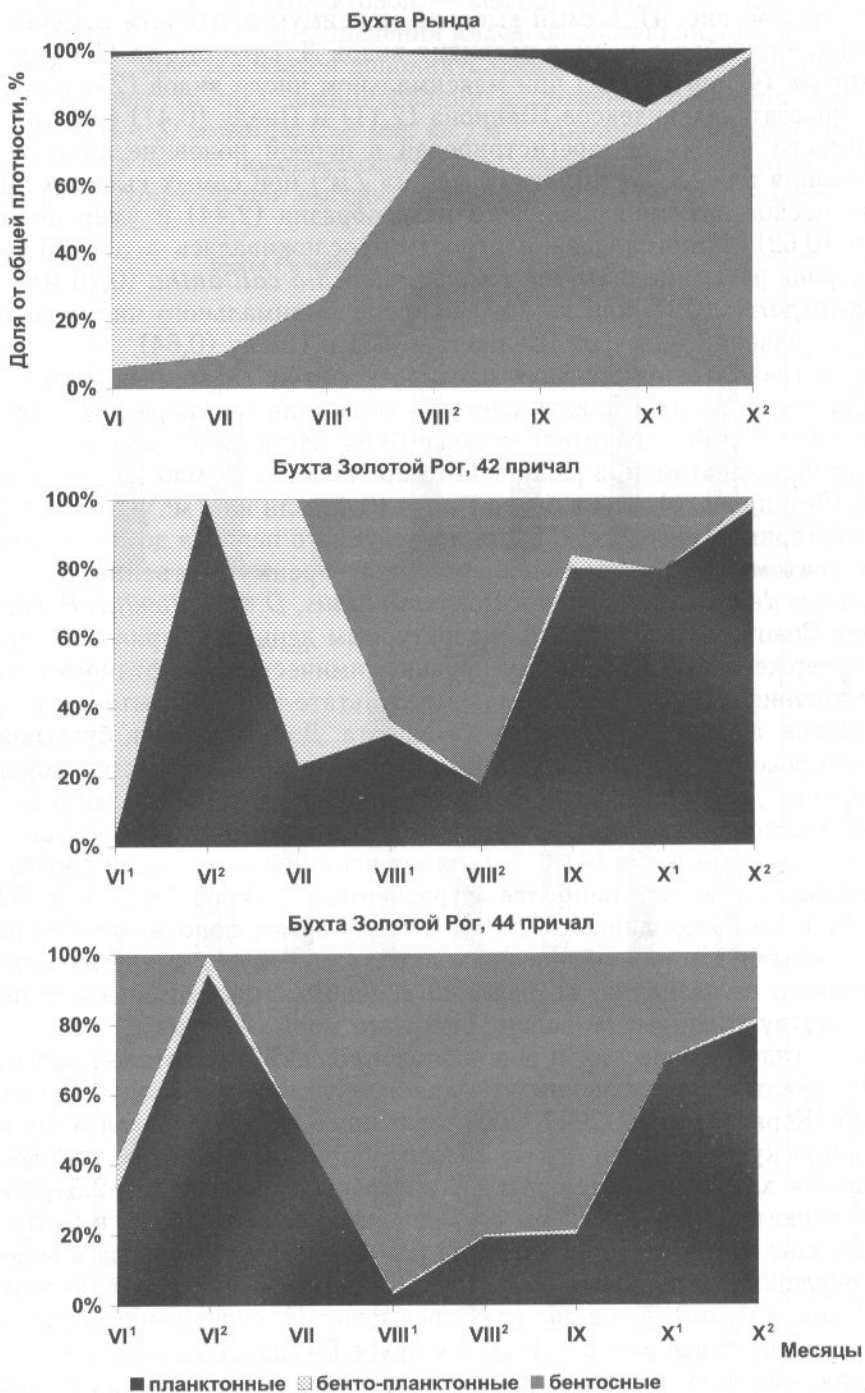


Рис. 6. Сезонная динамика относительной плотности диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухтах Золотой Рог и Рында в летне-осенний период 2000 г.

Fig. 6. Seasonal dynamics of relative density of diatom algae in marine fouling on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay and Rynda Bay in summer-autumn, 2000

по фитопланктону, полученным синхронно с данными по диатомовым водорослям обрастания, воды бухты Золотой Рог отнесены к экстремально эвтрофным, воды бухты Рында — к умеренно эвтрофным (Бегун, 2004, 2006).

Качественный анализ видового состава диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин показал преобладание в основном морских, эври-

термных и эвригалинных видов, относящихся к бореальному, аркто-бореальному и космополитическому комплексам. К круглогодичным формам диатомей относятся толерантные к воздействию неблагоприятных условий среды виды *M. moniliformis*, *G. marina*, *C. closterium*, *N. tenuirostris*, *T. fasciculata*. Диатомей *C. scutellum*, *L. abbreviata*, *T. fasciculata* и *G. marina* являются убиквистами и широко распространены на различных типах субстратов морей умеренной зоны в местообитаниях с умеренным либо с повышенным уровнем антропогенного воздействия (Бегун, Рябушко, 2008а; Бегун и др., 2009а, б; Рябушко, 2009).

В бухте Золотой Рог найдена редкая разновидность диатомовой водоросли *F. media* var. *subsalina* Proschk.-Lavr. из класса Fragilariophyceae сем. Fragilariaceae рода *Falcula* M. Voigt, 1960 (см. рис. 2). Это единственная разновидность рода, встреченная А.И. Прошкиной-Лавренко (Рябушко, Рябушко, 2001) в Керченском проливе (Черное море) среди зарослей бурой водоросли *Nereia filiformis* (J. Agardh) Zanardini, которую долгое время относили к эндемичным формам Черного моря. Недавно эта форма была найдена в Уссурийском заливе Японского моря в эпифитоне морского льна *Phyllospadix iwatensis* Makino (Бегун, Рябушко, 2008б).

В бухте Золотой Рог отмечена значительная численность бенто-планктонных и фитопланктонных видов водорослей, поскольку перифитон занимает промежуточное положение между планктоном и бентосом и представляет единый эколого-флористический комплекс в прибрежной зоне моря (Рябушко и др., 2004; Бегун и др., 2009а, б; Рябушко, 2009). Рост числа планктонных диатомовых в бентосе или обрастании соответствует времени отмирания фитопланктона, но иногда он совпадает с усилением антропогенного загрязнения акваторий токсикантами, способствующими оседанию на дно большей массы фитопланктона. При этом увеличиваются содержание детрита, органических веществ и дефицит кислорода, что угнетающе действует на микрофитобентосные диатомей (Смирнова и др., 1999; Бегун, Рябушко, 2008а).

Низкие значения количественных показателей микрофитобентосных видов диатомовых водорослей в бухте Золотой Рог по сравнению с фоновой акваторией бухты Рында могут быть обусловлены резкими скачками концентрации нефтеуглеводородов в водах р. Объяснения, впадающей в бухту, увеличением числа планктонных форм диатомовых, обычно совпадающим со временем их отмирания, высокими концентрациями взвеси и всех форм органического вещества и низкой прозрачностью воды (Корякова и др., 2002, 2003).

Снижение плотности микрофитобентосных видов диатомовых водорослей в бухте Золотой Рог во многом зависит от влияния хозяйственно-бытовых сточных вод различного происхождения, которые токсичны для диатомовых водорослей, поскольку в их состав входят нефтепродукты, пестициды, тяжелые металлы (Кузьмина, Руднева, 2005). При высоких концентрациях нефтеуглеводородов содержание "ядовитых" для диатомей веществ в бухте Золотой Рог превышает критический уровень, за которым происходят ингибирование ферментативных систем клеточных мембран, разрушение структуры хлоропластов и угнетение процесса фотосинтеза за счет блокирования функций хлорофилла, приводящие к снижению их количественных показателей (Кустенко, 2001).

Сапробиологический анализ сообщества диатомовых водорослей свидетельствует о количественном преобладании в бухте Золотой Рог, особенно в ее кутовой части, индикаторов значительного органического загрязнения альфа-мезо-сапробионтов *A. caroliniana*, *T. fasciculata*, *T. parva*, *S. costatum* и *M. moniliformis*, предпочитающих воду, обогащенную растворенным органическим веществом, и способных переходить от автотрофного к гетеротрофному или смешанному типу питания. Некоторые виды диатомовых водорослей имеют токсикорезистентность к загрязнению нефтепродуктами, поскольку нефть оказывает ингибирующее воздействие на разных стадиях их роста и репродуктивного развития (Кустенко, 2001). Массовое развитие этих видов неоднократно отмечалось



в Черном море в акватории Одесского порта в условиях хронического загрязнения сточными водами, содержащими соединения азота, фосфора и кремния, которые усваиваются микроводорослями (Александров, Гаркуша, 2008). Вид *M. moniliformis* обильно развивался в прибрежных водах Баренцева, Балтийского, Каспийского и Черного морей с высокими показателями органического и нефтяного загрязнения, обусловленными влиянием хозяйственно-бытовых и коммунальных сточных вод (Кузьминова, Руднева, 2005).

В фоновой акватории бухты Рында количественно преобладали бета-мезо-сапробионты — индикаторы умеренного загрязнения вод, а также олиго- и ксено-олигосапробионты — виды-индикаторы “чистых” вод. Экологическое состояние бухты Рында, в отличие от бухты Золотой Рог, характеризуется отсутствием источников хронического загрязнения и свободным водообменом с открытым морем (Корякова, 1987). В теплое время года здесь наблюдается природное эвтрофирование — элиминация большой массы макрофитов, во многом определяющая состав микроводорослей-доминант (Бегун, Рябушко, 2008а). В отдельные месяцы в этой акватории встречались индикаторы эвтрофирования вод диатомеи *C. closterium*, *N. tenuirostris* и *N. provincialis*, характерные для прибрежной части морей умеренной зоны. Это обусловлено прежде всего прижизненными выделениями макрофитов, способных обогащать воду растворенным органическим веществом и стимулировать кратковременное массовое развитие одноклеточных водорослей, предпочитающих органотрофию (Рябушко, Завалко, 1992). Так, в бухте Казачьей (Черное море) дополнительное поступление в бухту органических соединений азота и фосфора, а также постоянная трансформация растворенного органического вещества в прибрежном мелководье с обильно развитыми макрофитами благотворно влияли на количественное развитие микрофитобентоса (Смирнова и др., 1999).

Интересным фактом представляется массовое развитие (до 2 млн кл./м<sup>2</sup>) в августе в кутовой части бухты Золотой Рог диатомовой водоросли *Striatella unipunctata*. Этот вид образует лентовидные колонии, легко распознаваемые в световом микроскопе по розеткам хлоропластов, похожих на цветок. В относительно чистых морских акваториях *S. unipunctata* встречается редко, но высокие летние вспышки численности этого вида в Каламитском заливе и Казачьей бухте Черного моря, а также в Тилигульском лимане были обусловлены откликом на повышенное биогенное загрязнение вследствие аварийных выбросов неочищенных сточных вод. В результате *S. unipunctata* исследователи относят к индикаторам эвтрофирования морей (Ryabushko, Ryabushko, 2000; Ковальчук и др., 2008; Ковтун, 2008).

Общеизвестно, что при увеличении содержания органических веществ и усилении антропогенного пресса на акваторию на фоне общего снижения численности диатомовых “аборигенные” виды замещаются “антропогенными”, обладающими высокой толерантностью к воздействию загрязнения, в результате чего происходит формирование высокоэффективного климаксного сообщества, выдерживающего значительное загрязнение (Баринаева и др., 2006). К “антропогенным” видам в бухте Золотой Рог можно отнести *A. angusta*, *A. caroliniana*, *Nitzschia* sp. и виды рода *Melosira*, для которых характерна миксотрофность, что немаловажно при избытке органики и неблагоприятных для фотосинтеза условиях освещения. Способность переключаться с одного типа питания на другой характерна и для планктонной диатомеи *S. costatum*, доминирующей в обрастании на пластинах в бухте Золотой Рог. Этот вид достигал массового развития в фитопланктоне наиболее загрязненных прибрежных вод зал. Петра Великого (Stonik, Orlova, 2002; Бегун, 2006).

Свойство диатомовых водорослей формировать уродливые формы клеток общеизвестно и используется при идентификации загрязнения водоемов тяжелыми металлами (Ковальчук и др., 2008). Одна из ответных реакций на хрони-



ческое загрязнение на организменном уровне выражалась в появлении изменчивости формы и морфологических структур у некоторых видов диатомовых водорослей (Барина и др., 2006; Рябушко, 2009). Такие аномалии неоднократно регистрировались нами в бухте Золотой Рог у видов *Cocconeis* spp., *Licmophora* spp., *M. moniliformis*, *T. fasciculata* на протяжении всего периода исследования (рис. 7). У видов рода *Cocconeis*, предпочитающих в целом “чистые” воды, в загрязненных местах нередко отмечены уродливые створки с выемками на полюсах или с вогнутостью створок посередине, а также с морфологическими аномальными изменениями не только по форме, как у вида *C. scutellum*, но и в структуре створок, как это отмечено в срастании ребер у вида *Cocconeis costata*. Нередко встречались в кутовой части бухты Золотой Рог и деформированные цепочки клеток диатомовой водоросли *M. moniliformis* в виде разломов по всей длине створки.

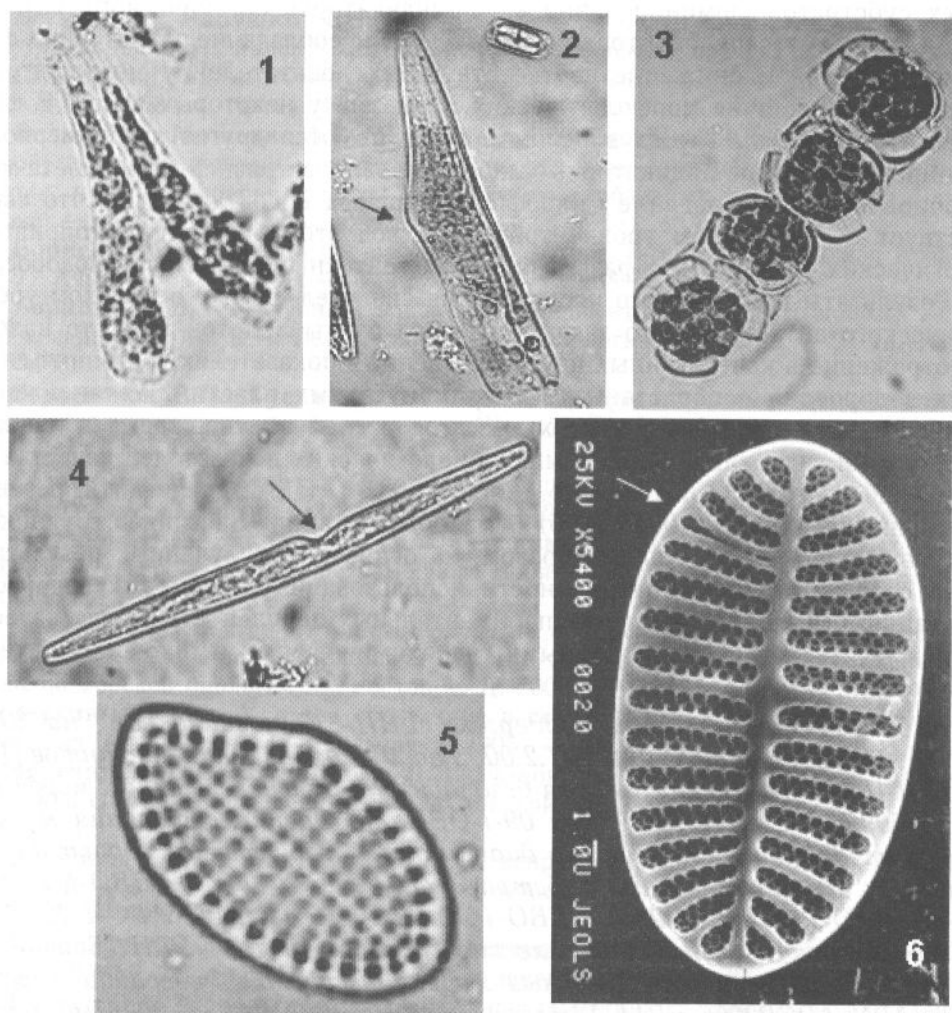


Рис. 7. Морфологические изменения у диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин в бухте Золотой Рог: 1-2 — *Licmophora* sp.; 3 — *Melosira moniliformis*; 4 — *Tabularia fasciculata*; 5 — *Cocconeis scutellum*; 6 — *Cocconeis costata*. 1-5 — световая микроскопия (СМ); 6 — сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Fig. 7. Morphological changes of diatom algae in marine fouling on experimental plates mounted in the Golden Horn Bay: 1-2 — *Licmophora* sp.; 3 — *Melosira moniliformis*; 4 — *Tabularia fasciculata*; 5 — *Cocconeis scutellum*; 6 — *Cocconeis costata*. 1-5 — light microscopy; 6 — scanning electron microscopy

В экспериментальных условиях по изучению влияния тяжелых металлов на развитие диатомовых водорослей было показано, что вид *M. moniliformis* снижал прирост численности в 12 раз при концентрации меди 0,1 мг/л, а при концентрации 1,0 мг/л наблюдался летальный исход (Ковальчук и др., 2008). При этом клетки деформировались, изменялась форма и цвет хроматофор, в конечном итоге наступал плазмолиз (Ковальчук, Мальцева, 1988). При высоких концентрациях тяжелых металлов наступает состояние метаболического и экологического регресса, которое характеризуется частичным или полным угнетением сообщества микроводорослей (Джабруева, 2008).

### Заключение

В бухте Золотой Рог, и особенно в ее кутовой части, отмечены специфические черты развития диатомовых водорослей в сообществе обрастания антропогенных субстратов: доминирование видов-индикаторов органического загрязнения вод альфа-мезосапробионтов; количественное преобладание планктонных форм микроводорослей и снижение соответствующих показателей у микрофитобентосных видов; наличие морфологических аномалий у некоторых видов. В фоновой акватории бухты Рында в целом прослеживаются другие закономерности: доминирование видов-индикаторов слабого уровня загрязнения вод бета-мезосапробионтов и преобладание микрофитобентосных видов диатомей, что свидетельствует об умеренном уровне трофности вод этой бухты и благоприятных экологических условиях для развития флоры бентосных диатомовых водорослей.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о высоком уровне хронического антропогенного загрязнения вод бухты Золотой Рог, что находит свое отражение в качественных и количественных показателях состояния диатомовых водорослей в обрастании экспериментальных пластин. Установленные закономерности в развитии диатомовых водорослей подтверждаются данными исследований гидрохимических и микробиологических показателей качества вод бухты Золотой Рог (Корякова и др., 2002, 2003), а также спецификой развития фитопланктона (Бегун, 2004, 2006) и макрообрастания (Звягинцев, Будникова, 2003; Звягинцев, 2005). Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о правомочности использования диатомовых водорослей обрастания пластин в качестве экспериментальных модулей для оценки качества морских вод наряду с традиционными гидрохимическими и микробиологическими методами.

*Работа выполнена при поддержке ФЦП "Мировой океан" на 2008–2012 гг., госконтракт № 01.420.1.2.0003 от 07 ноября 2008 г.; грантов ДВО-1 № 06-1-П-11-034 "Биологическая безопасность дальневосточных морей России" (2009–2011 гг.), ДВО-1 № 09-1-ОБН-08 "Оценка состояния морской среды методом биоиндикации по диатомовым сообществам обрастаний на природных и антропогенных субстратах" (2009–2011 гг.); ДВО-1 № 09-1-П23-12, ДВО-1 № 09-1-П23-01, ДВО-1 № 09-1-П15-03, ДВО-РФФИ № 09-04-98570-р\_Восток\_а; 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."*

### Список литературы

- Александров Б.Г., Гаркуша О.П.** Эпифитон *Enteromorpha intestinalis* и некоторые факторы, его определяющие // Экология моря. — 2008. — Вып. 76. — С. 9–15.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.** Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды : монография. — Тель-Авив : Изд. дом "Pilies Studio", 2006. — 498 с.

- Бегун А.А.** Летне-осенний фитопланктон бухты Золотой Рог (Японское море) в условиях антропогенного загрязнения // Альгология. — 2006. — Т. 16, № 4. — С. 417–434.
- Бегун А.А.** Фитопланктон бухты Золотой Рог и Уссурийского залива (Японское море) в условиях антропогенного загрязнения // Изв. ТИНРО. — 2004. — Т. 138. — С. 330–344.
- 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. — Т. 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. — Т. 19, № 3. — С. 257–272.
- Бегун А.А., Рябушко Л.И.** Отклик микроводорослей планктона и перифитона на загрязнение морских вод // Современные проблемы регионального развития : мат-лы 2-й Междунар. науч. конф. — Биробиджан, 2008а. — С. 101–102.
- Бегун А.А., Рябушко Л.И.** Диатомовые водоросли эпифитона морского льна *Phyllospadix iwatensis* Makino в бухте Лазурная Японского моря // Современные проблемы альгологии : мат-лы Междунар. науч. конф. и 7-й Школы по морской биологии. — Ростов н/Д, 2008б. — С. 44–46.
- Белан Т.А., Мощенко А.В., Чернова А.С.** Долговременные изменения видового разнообразия таксонов многощетинковых червей в прибрежной зоне Японского моря // Докл. междунар. рабоч. совещ. по изучению глобальных изменений на Дальнем Востоке. — Владивосток : Дальнаука, 2003. — С. 196–224.
- Борисюк М.В.** Видовой состав фитоперифитона Таганрогского залива Азовского моря // Альгология. — 2002. — Т. 12, № 4. — С. 408–420.
- Борисюк М.В.** К изучению Bacillariophyta перифитона Азовского моря // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер. “Биология”. — 2001. — Т. 14, № 1. — С. 37–40.
- Герасимюк В.П., Гусляков Н.Е.** Эколого-флористический анализ диатомовых водорослей бентоса Хаджибейского лимана (Черное море) // Альгология. — 1992. — Т. 2, № 3. — С. 49–53.
- Герасимюк В.П., Ковтун О.А.** Микроскопические водоросли Тилигульского лимана (Черное море, Украина) // Альгология. — 2007. — Т. 17, № 1. — С. 42–52.
- Гусляков Н.Е., Закордонцев О.А., Герасимюк В.П.** Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов. — Киев : Наук. Думка, 1992. — 115 с.
- Джабруева А.В.** Перифитонные водоросли прибрежной зоны Каспия республики Калмыкия // Современные проблемы альгологии : мат-лы Междунар. науч. конф. и 7-й Школы по морской биологии. — Ростов н/Д, 2008. — С. 125–126.
- Звягинцев А.Ю.** Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана : монография. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — 432 с.
- Звягинцев А.Ю., Будникова Л.Л.** Разноногие раки (Amphipoda, Crustacea) в обрастании системы охлаждения Владивостокской ТЭЦ-2 // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 131. — С. 280–298.
- Ковальчук Ю.Л., Мальцева Л.М.** К вопросу о роли диатомовых в механизме работы ТПК в море // 3-я Всесоюз. конф. по морской биологии : тез. докл. — Севастополь, 1988. — Ч. 2. — С. 112–113.
- Ковальчук Ю.Л., Неврова Е.Л., Шалаева Е.А.** Диатомовые обрастания твердых субстратов : монография. — М. : Тов-во науч. изд-в КМК, 2008. — 174 с.
- Ковтун О.А.** Эколого-географическая характеристика диатомовых водорослей микрорифитобентоса Тилигульского лимана (северо-западное Причерноморье) // Современные проблемы альгологии : мат-лы Междунар. науч. конф. и 7-й Школы по морской биологии. — Ростов н/Д, 2008. — С. 192–195.
- Ковтун О.А., Герасимюк В.П.** Оценка экологического состояния солоноватоводных водоемов по индикаторным видам водорослей (на примере Тилигульского лимана, северо-западное Причерноморье) // Водоросли: Таксономия, экология и использование в мониторинге : мат-лы 2-й Всерос. конф. — Сыктывкар, 2009. — С. 284–287.
- 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. — Т. 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 // Океанол. — 2003. — Т. 43, № 2. — С. 203–208.

**Кузьминова Н.С., Руднева И.И.** Влияние сточных вод на морские водоросли // Альгология. — 2005. — Т. 15, № 1. — С. 128–141.

**Кустенко Н.Г.** Некоторые особенности развития диатомовых водорослей в культурах и их устойчивость к специфическим факторам среды // Карадаг. сб. науч. тр., посвящ. 85-летию Карадагской биол. ст. им. Т.И. Вяземского. — Симферополь: Сонат, 2001. — С. 176–182.

**Методы гидрохимических исследований океана**: монография. — М.: Наука, 1978. — 270 с.

**Огородникова А.А.** Эколого-экономическая оценка воздействия береговых источников загрязнения на природную среду и биоресурсы залива Петра Великого: монография. — Владивосток: ТИПРО-центр, 2001. — 193 с.

**Рачинская А.В.** Оценка качества морской среды Одесского побережья по показателям состояния водорослей микрофитобентоса твердых субстратов // Современные проблемы альгологии: мат-лы Междунар. науч. конф. и 7-й Школы по морской биологии. — Ростов н/Д, 2008. — С. 298–300.

**Рябушко Л.И.** Микрофитобентос Черного моря: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — Севастополь, 2009. — 48 с.

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

**Рябушко Л.И., Завалко С.Е.** Микрофитообрастания искусственных и природных субстратов в Черном море // Бот. журн. — 1992. — Т. 77, № 5. — С. 33–39.

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

**Смирнова Л.Л., Рябушко В.И., Рябушко Л.И., Бабич И.И.** Влияние концентрации биогенных элементов на сообщества микроводорослей прибрежного мелководья Черного моря // Альгология. — 1999. — Т. 9, № 3. — С. 32–42.

**Ryabushko L.I., Ryabushko V.I.** Communities of diatoms on the shells of mollusks of the genus *Mytilus* L. // Int. J. on Algae. — 2000. — Vol. 2, № 2. — P. 15–22.

**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 Research. — 2002. — Vol. 24, № 4. — P. 359–365.

*Поступила в редакцию 2.03.10 г.*