

УДК 582.261.1(262.5)

Е.Л. НЕВРОВА

Ин-т биологии южных морей НАН Украины,
пр. Нахимова, 2, Севастополь 99001, Украина

**ЭКОЛОГО-ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОННЫХ
ДИАТОМОВЫХ В БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЕ
(ЮГО-ЗАПАДНЫЙ КРЫМ, ЧЕРНОЕ МОРЕ, УКРАИНА)**

Эколого-таксономические исследования на 16 станциях в акватории техногенно загрязненной Балаклавской бухты и на контрольной станции за пределами бухты на илисто-песчаном субстрате в диапазоне глубин 6–23 м проведены в сентябре 2006 г. Обнаружено 278 видов и внутривидовых таксонов (ввт) диатомовых бентоса. Среди них отмечено 40 видов, новых для флоры Черного моря. Наибольшей видовой насыщенностью отличались роды *Nitzschia* (32 вида и ввт), *Amphora* (31), *Navicula* (27), *Cocconeis* (21), *Lyrella* (14) и *Diploneis* (13). Согласно результатам кластерного и ординационного анализа сходства, выделены две группы станций, различающихся по уровню абиотических переменных и пространственному расположению (I – наиболее загрязненная внутренняя часть бухты, II – ее внешняя часть). В пределах каждой группы сформирован комплекс диатомовых с определенной таксономической структурой и уровнем количественного развития видов. Разнообразие таксоцены диатомовых оценено с использованием пропорций флоры, индексов Шеннона, Маргалефа, Пиелу, Симпсона, средней таксономической отличительности AvTD (Δ^+) и его вариабельности VarTD (Λ^+). Наибольшие значения Δ^+ отмечены во внутренней части бухты, что вызвано присутствием в иерархической структуре таксоцены значительной доли моно- и олиговидовых ветвей. В менее загрязненной внешней части бухты преобладали олиговидовые ветви, поэтому значения Δ^+ близки к среднеожидаемому уровню для всего Черного моря. На контрольной станции значение Δ^+ минимально вследствие доминирования поливидовых ветвей в иерархическом древе таксоцены диатомовых.

Ключевые слова: бентосные диатомовые, *Bacillariophyta*, оценка разнообразия, индекс таксономической отличительности, Черное море.

Введение

Комплексное воздействие факторов внешней среды на структуру таксоцены донных диатомовых водорослей приобретает особое значение в связи с их ключевой ролью в трофических цепях и массовым развитием во всех прибрежных биотопах до глубины 50–70 м. При мониторинге состояния экосистемы шельфовой зоны Черного моря диатомовые бентоса играют важную роль. Поскольку, по сравнению с макро- и мейо-

© Е.Л. Неврова, 2014

бентосом, размеры микроводорослей на 2–3 порядка меньше, они характеризуются иной масштабностью и характером распределения в биотопе, в т.ч. под влиянием поллютантов, накапливающихся в донных отложениях. Такие особенности диатомовых могут обуславливать специфические изменения структуры таксоценоза в условиях воздействия естественных и антропогенных факторов, что определяет необходимость исследований данной группы бентосных организмов для использования в качестве экологических индикаторов (Никитина, Шкундина, 2009; Sládeček, 1986; Watanabe et al., 1988, 1990; Warwick, 1993; Barinova et al., 2000, 2006; Birkett, Gardiner, 2005).

В предыдущих работах был представлен анализ комбинаций абиотических факторов (включая токсические соединения), определяющих особенности структуры выделенных таксоценозических комплексов диатомовых для различных акваторий побережья юго-западного Крыма (Неврова и др., 2003; Неврова, 2013; Петров, Неврова, 2004; Ревков, Неврова, 2004; Петров и др., 2005).

Целью данной работы является анализ пространственного распределения, таксономического разнообразия и структуры таксоценоза диатомовых бентоса, формирующегося под влиянием различных абиотических факторов (включая техногенные поллютанты), в акватории Балаклавской бухты. Значительное воздействие эти факторы оказывают также на иерархию таксоценоза диатомовых, количественную оценку которого можно осуществить расчетом средней степени филогенетического сходства между найденными видами (Warwick, Clarke, 1998, 2001; Petrov et al., 2010).

Материалы и методы

Балаклавская бухта относится к акваториям активного использования, в которую постоянно поступают промышленные стоки с горнодобывающего комбината, хозяйственно-бытовые сточные воды, а также продукты деятельности инфраструктуры и объектов базы флота, вносящие в водную среду различные загрязняющие вещества. Процесс аккумуляции разнообразных соединений в донных отложениях бухты достигал наибольшей интенсивности в период базирования подводного флота с 1950-х до середины 1990-х гг. Гидродинамической особенностью данной акватории является также наличие незначительного речного стока в куте бухты и переотложение донных осадков под воздействием интенсивного передвижения водного транспорта, что оказывает влияние на видовое богатство и характер количественного распределения донных сообществ и, в частности, микрофитобентоса.

Данные для анализа абиотических переменных и структуры таксоценоза донных диатомовых получены в результате комплексной бентосной съемки Балаклавской бухты в сентябре 2006 г. на 16 станциях, находящихся на всей акватории бухты ($S = 2,5 \text{ км}^2$), и на контрольной станции за пределами бухты, в диапазоне глубин 6–23 м (рис. 1).

На каждой станции отобрано по две пробы мейобентосной трубкой ($S = 15,9 \text{ см}^2$) из верхнего (1–3 см) слоя рыхлого грунта, поднятого дно-

черпателем Петерсена (0,04 м²). Для более полного отделения эпипелона и эпипсаммона грунт обрабатывали ультразвуком в течение 20 мин. Данные о видовом составе массовых видов диатомовых на каждой станции обобщены по результатам расчета шести независимых повторностей на водных препаратах в камере Горяева объемом 0,007 см³ (×400). Для выявленных массовых видов рассчитана численность клеток на 1 см² субстрата; условная численность видов, не вошедших в количественный учет, но отмеченных в постоянных препаратах, принята 10 экз.:см⁻² (Петров и др., 2005). Полное таксономическое определение диатомовых для каждой станции, включающее верификацию массовых видов, отмеченных при просмотре водных препаратов, и идентификацию остальных видов, не вошедших в количественный учет, осуществляли при помощи микроскопа Carl Zeiss Axiostar (объектив AchroPlan ×100) на постоянных препаратах, изготовленных по стандартной методике холодного сжигания в кислотах (Диатомовые ..., 1974) и заключенных в среду Naphrax™. Микрофотографирование осуществлено на микроскопе Nikon Eclipse E600 (объектив PlanAPO ×100). При идентификации использованы определители (Диатомовый ..., 1950; Диатомовые ..., 1974; Прошкина-Лавренко, 1963; Гусяков и др., 1992; Witkowski et al., 2000; Levkov, 2009). Систематическое разнообразие *Bacillariophyta* представлено по Round et al., 1990, с последующими дополнениями (Fourtanier, Kociolek, 1999, 2007; Witkowski et al., 2000; Algae ..., 2009; Levkov, 2009). Цитирование номенклатурных названий таксонов выполнено в соответствии с правилами (Царенко, 2010; International Plant Names Index, 2012).

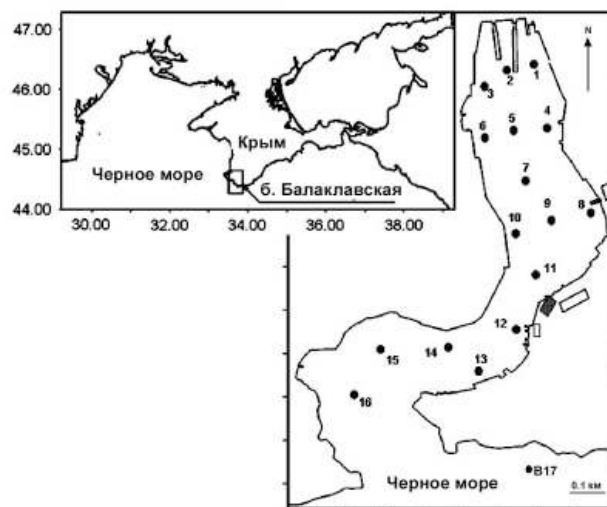


Рис. 1. Схема расположения станций в Балаклавской бухте

Измерения параметров абиотических факторов: глубина, гранулометрический состав грунта, содержание в донных отложениях Балаклавской бухты органических и неорганических контаминантов (общий углерод

$C_{\text{орг}}$, соли тяжелых металлов Zn, Ni, Cu, Pb, Hg, Cd, Cr, Mn) и хлорорганических соединений (ПАУ, пестициды, ПХБ) проведены для каждой станции из проб, отобранных из одного массива грунта, поднятого дночерпателем (Burgess et al., 2011). Данные абиотических переменных и их вариативности на исследованной части дна акватории бухты, а также средние величины абиотических параметров на различных участках бухты, включая наиболее (ст. В8) и наименее (ст. В16) загрязненные станции, опубликованы ранее (Petrov et al., 2010). В табл. 1 приведены упомянутые выше данные с указанием параметров на контрольной точке (ст. В17).

Таблица 1

Значения абиотических параметров в донных отложениях б. Балаклавская

| Станции | Абиотические переменные | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------------|-------|------|--------|------|------|-------|------|-------|-------|-----------|-------|------------------|----------|
| | Zn | Cu | Ni | Pb | Cr | Cd | Ag | Hg | Mn | ПХБ | Пестициды | ПАУ | $C_{\text{орг}}$ | Ил-глина |
| Внутренняя часть | 206,5 | 146,8 | 33,1 | 224,5 | 34,0 | 0,34 | 0,32 | 0,61 | 365,1 | 84,2 | 15,6 | 3759 | 2,34 | 80,9 |
| Внешняя часть | 185,5 | 130,7 | 16,2 | 317,6 | 12,8 | 0,11 | 0,31 | 1,12 | 225,2 | 122,7 | 9,3 | 10470 | 4,83 | 36,3 |
| Ст. В8 | 600,0 | 350,0 | 44,0 | 1500,0 | 67,5 | 0,50 | 0,40 | 0,85 | 325,0 | 435,0 | 93,0 | 2700 | 4,20 | 72,0 |
| Ст. В16 | 53,0 | 33,8 | 10,5 | 51,2 | 13,8 | 0,05 | 0,20 | 0,43 | 192,0 | 79,0 | 12,0 | 1200 | 2,80 | 20,2 |
| Ст. В17 | 29,2 | 10,5 | 6,2 | 9,5 | 17,2 | 0,02 | <0,03 | 0,14 | 140,0 | н/о | н/о | н/о | 0,90 | 4,4 |

Примечание. Содержание металлов указано в $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы, органических контаминантов – в $\text{мкг} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы донных отложений, $C_{\text{орг}}$ и размерная фракция грунта (ил-глина) – в %; н/о – концентрация элемента ниже допустимого уровня определения.

Изменения количественного развития и структуры таксоцено донных диатомовых под влиянием факторов окружающей среды выявлены с помощью алгоритмов многомерного статистического анализа (пакет PRIMER v5.2) (Clarke, Gorley, 2001). Сходство между станциями оценено по коэффициенту Брэй-Куртиса на основе матрицы исходной численности диатомовых, трансформированной в степени 0,25. Оценка достоверности различий видовой структуры таксоцено осуществлена на основе алгоритма сравнения вариативности средних значений ранговых сходств (R-статистика)

для одноуровневого теста по методу рандомизации (программа ANOSIM). Основные результаты статистического анализа опубликованы ранее (Petrov et al., 2010; Nevrova et al., 2011).

Разнообразие таксоцена диатомовых на каждой станции оценено по индексам: d (индекс видового богатства Маргалефа), J' (индекс выровненности Пиелу), H' (индекс Шеннона), 1-Lambda' (индекс Симпсона), Δ^+ (индекс средней таксономической отличительности AvTD), Λ^+ (индекс вариабельности VarTD) (Warwick, Clarke, 1998, 2001; Clarke, Gorley, 2001). Индекс Δ^+ – средняя условная «длина пути» между каждой парой видов. Λ^+ – индекс Λ^+ – варианса попарных длин путей (ω_{ij}) между парами видов i и j по отношению к их средней величине (Δ^+). Показатель Λ^+ отражает горизонтальную асимметричность таксономического древа, т.е. разную представленность низших таксонов в высших по различным иерархическим уровням. (Nevrova et al., 2011). Рассчитаны также пропорции флоры (на разных иерархических уровнях) для таксоцена диатомовых изученной части акватории бухты.

Результаты и обсуждение

При исследовании б. Балаклавская на 16 станциях обнаружен 191 вид и ввт диатомовых бентоса, на контрольной станции В17, расположенной недалеко от устья бухты, – 153. Общее число диатомовых составило 278 видов и ввт, принадлежащих к 266 видам, 73 родам, 41 семейству, 21 порядку, 3 классам отдела *Bacillariophyta* (табл. 2).

Таблица 2

Представленность *Bacillariophyta* на рыхлых грунтах в б. Балаклавской

| Класс | Пор. | Сем. | Род | Вид | ввт |
|----------------------------|------|------|-----|-----|-----|
| <i>Coscinodiscophyceae</i> | 5 | 9 | 16 | 29 | 30 |
| <i>Fragilariophyceae</i> | 8 | 9 | 13 | 23 | 23 |
| <i>Bacillariophyceae</i> | 8 | 23 | 44 | 214 | 225 |
| Всего | 21 | 41 | 73 | 266 | 278 |

Список видов и ввт донных диатомовых, обнаруженных на рыхлых грунтах б. Балаклавская и контрольной станции (* – виды, новые для флоры Черного моря; ** – новые для науки (Nevrova et al., 2013; Witkowski et al., 2010); *** – виды, не регистрируемые в Черном море с начала или середины прошлого столетия):

Achnanthes brevipes C. Agardh, *A. brevipes* var. *intermedia* (Kütz.) Cleve, *A. brockmannii* Hust., *A. placentuloides* (Gusl.) Witkowski et Lange-Bert., *A. longipes* C. Agardh, *Achnanthes* sp. B06, *Actinocyclus octonarius* Ehrenb., *Actinocyclus* sp., *Amphora acuta* W. Greg., *A. arcus* W. Greg., *A. aspera* Petit, *A. bigibba* Grunow ex A.W.F. Schmidt, *A. caroliniana* Giffen, *A. cf. hyalina* Kütz., *A. cf. Jostesorum* Witkowski, Metzeltin et Lange-Bert., *A. crassa* W. Greg., *A. exilitata* Giffen*, *A. graeffeana* Hendey, *A. cf. graeffeana* Hendey, *A. helenensis* Giffen*, *Amphora inflexa* (Bréb. ex Kütz.) H.L.

Smith, *A. marina* W. Sm., *A. obtusa* W. Greg., *A. ocellata* Donkin, *A. ostrearia* Bréb., *A. proteus* W. Greg., *A. pusio* Cleve*, *A. staurophora* Jahlin-Dannfelt, *A. subacutiuscula* Schoeman, *A. wisei* (Salah) Simonsen, *Amphora* sp. 1, *Ardissonea baculus* (W. Greg.) Grunow, *A. crystallina* (C. Agardh) Grunow, *A. robusta* (Ralfs) De Not., *Astartiella bahusiensis* (Grunow) Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin*, *Auliscus sculptus* (W. Sm.) Ralfs, *Auricula intermedia* (Lewis) Cleve, *Bacillaria paxillifera* (O.F. Müll.) Hendey, *Biremis ambigua* (Cleve) D.G. Mann, *B. ridicula* (Giffen) D.G. Mann*, *Biremis* sp. 1B, *Caloneis liber* (W. Sm.) Cleve, *C. westii* (W. Sm.) Hendey, *Campylodiscus decorus* Brüb., *C. thuretii* Bréb., *Campylodiscus* sp. 1, *Catenula adhaerens* Mereschk., *Cerataulus turgidus* Ehrenb., *Chamaepinnularia* sp. 1F, *Cocconeis clandestina* A.W.F. Schmidt*, *C. costata* W. Greg., *C. dirupta* W. Greg. var. *flexella* (Janisch et Rabenh.) Grunow, *C. discrepans* A.W.F. Schmidt*, *C. distans* W. Greg., *C. euglypta* Ehrenb., *C. guttata* Hust. et Aleem*, *C. maxima* (Grunow) H. Perag. et Perag., *C. molesta* Kütz. var. *crucifera* Grunow, *C. pelta* A.W.F. Schmidt*, *C. peltoides* Hust.*, *C. placentula* Ehrenb., *C. pseudocostata* Romero*, *C. pseudomarginata* W. Greg., *C. cf. pelta* A.W.F. Schmidt, *C. pseudograta* Hust.*, *C. scutellum* Ehrenb., *C. scutellum* var. *parva* (Grunow) Cleve, *C. stauroneiformis* (Rabenh.) Okuno, *Cocconeis* sp. 4, *Cocconeis* sp. 5, *Coscinodiscus concinnus* W. Sm., *C. radiatus* Ehrenb., *Coscinodiscus* sp. 1, *Craticula halophila* (Grunow ex Van Heurck) D.G. Mann, *Cyclotella choctawhatcheeana* Prasad*, *Cyclotella meneghiniana* var. *kuetzingiana* (Thwaites) Playfair, *C. operculata* (C. Agardh) Kütz., *Cyclotella* sp. 1, *Cymbella angusta* (W. Greg.) Gusl., *C. cf. angusta* (W. Greg.) Gusl., *C. prostrata* (Berk.) Cleve, *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin, *Delphineis minutissima* (Hust.) Simonsen*, *Dickieia subinflata* (Grunow) D.G. Mann, *Dimeregramma minor* (W. Greg.) Ralfs, *Diploneis bombus* (Ehrenb.) Cleve, *D. chersonensis* (Grunow) Cleve, *D. coffeaeformis* (A.W.F. Schmidt) Cleve, *D. crabro* Ehrenb., *D. litoralis* (Donkin) Cleve, *D. notabilis* (Grev.) Cleve, *D. notabilis* var. *tenera* Proshk.-Lavr., *D. papula* (A.W.F. Schmidt) Cleve, *D. smithii* (Bréb.) Cleve, *D. smithii* var. *pumila* (Grunow) Hust., *D. vacillans* (A.W.F. Schmidt) Cleve, *Diploneis* sp. 1, *Diploneis* sp. 2, *Entomoneis gigantea* (Grunow) Nizam., *E. paludosa* (W. Sm.) Reimer, *Fallacia aequorea* (Hust.) D.G. Mann*, *F. florinae* (Møller) Witkowski*, *F. forcipata* (Grev.) Stickle et D.G. Mann, *F. oculiformis* (Hust.) D.G. Mann*, *F. pygmaea* (Kütz.) Stickle et D.G. Mann, *F. subforcipata* (Hust.) D.G. Mann, *Fallacia* sp. 11K, *Fallacia* sp. 3F, *Fogedia finmarchica* (Cleve et Grunow) Witkowski, Metzeltin et Lange-Bert., *F. giffeniana* (Foged) Witkowski, Lange-Bert., Metzeltin et Bafana*, *Fragilaria capucina* Desm., *F. pinnata* Ehrenb., *Fragilaria* sp. 1, *Glyphodesmis distans* (W. Greg.) Grunow, *Gomphonema angustatum* (Kütz.) Rabenh., *G. parvulum* (Kütz.) Kütz., *Grammatophora marina* (Lyngb.) Kütz., *G. oceanica* Ehrenb., *G. serpentina* (Ralfs) Ehrenb., *Gyrosigma acuminatum* (Kütz.) Rabenh., *G. attenuatum* (Kütz.) Cleve, *G. balticum* (Ehrenb.) Rabenh., *G. fasciola* (Ehrenb.) Cleve, *Halamphora acutiuscula* (Kütz.) Levkov, *H. angularis* (W. Greg.) Levkov, *H. coffeaeformis* (C. Agardh) Levkov, *H. cf. coffeaeformis* (C. Agardh) Levkov, *H. cuneata* (Cleve) Levkov, *H. cf. cuneata* (Cleve) Levkov, *H. eunotia* (Cleve) Levkov, *H. tenerrima* (Aleem et Hust.) Levkov, *Hantzschia amphioxys* (Ehrenb.) Grunow, *H. amphioxys* f. *capitata* O. Müll., *H. marina* Donkin*, *H. virgata* (Roper) Grunow, *H. virgata* var. *capitellata* Hust., *H. virgata* var. *gracilis* Hust., *Haslea spicula* (Hickie) Lange-Bert., *H. subagnita* (Proshk.-Lavr.) I.V. Makarova et Karaeva, *Hippodonta* sp. 1,

Hippodonta sp. 2, *Hippodonta* sp. 3, *Hippodonta* sp. 4, *Hippodonta* sp. 5, *Hyalodiscus ambiguus* (Grunow) Temp. et H. Perag., *H. scoticus* (Kütz.) Grunow, *Hyalosira delicatula* Kütz., *Licmophora abbreviata* C. Agardh, *L. ehrenbergii* (Kütz.) Grunow, *L. flabellata* (Carmichael ex Grev.) C. Agardh emend Sar et Ferrario, *L. gracilis* (Ehrenb.) Grunow, *Luticola mutica* (Kütz.) D.G. Mann, *Lyrella abrupta* (W. Greg.) D.G. Mann, *L. abruptapontica* Nevrova, Witkowski, Kulikovskiy et Lange-Bert.**, *L. atlantica* (A.W.F. Schmidt) D.G. Mann, *L. barbara* (Heiden) D.G. Mann*, *L. dilatata* (A.W.F. Schmidt) Nevrova, Witkowski, Kulikovskiy et Lange-Bert.), *L. fogedii* Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin*, *L. granulata* Nevrova, Witkowski, Kulikovskiy et Lange-Bert.*, *L. hennedyi* (W. Sm.) Stickle et D.G. Mann, *L. lyra* (Ehrenb.) Karaeva, *L. lyroides* (Hendey) D.G. Mann, *L. majuscula* (Hust.) Witkowski*, *L. nebulosa* (W. Greg.) D.G. Mann, *L. spectabilis* (W. Greg.) D.G. Mann, *Lyrella* sp. 1B, *Melosira moniliformis* (O.F. Müll.) C. Agardh, *N. arenaria* Donkin*, *N. besarensis* Giffen*, *N. cancellata* Donkin, *N. cf. syvertsenii* Witkowski, Metzeltin et Lange-Bert., *N. cincta* (Ehrenb.) Ralfs, *N. cryptocephala* Kütz., *N. directa* (W. Sm.) Ralfs, *N. glabriuscula* Hust. var. *elipsoidales* Proshk.-Lavr.***, *N. gregaria* Donkin, *N. northumbrica* Donkin*, *Navicula palpebralis* Brèb., *N. palpebralis* var. *angulosa* (W. Greg.) Van Heurck, *N. palpebralis* var. *semiterna* (W. Greg.) Cleve, *N. palpebrulum* Cholnoky*, *N. parapontica* Witkowski, Kulikovskiy, Nevrova et Lange-Bert.**, *N. peregrina* (Ehrenb.) Kütz., *N. perminuta* Grunow, *N. pontica* Witkowski, Kulikovskiy, Nevrova et Lange-Bert., *N. radiosa* Kütz., *N. ramosissima* (C. Agardh) Cleve, *N. salinicola* Hust., *N. scabriuscula* (Cleve et Grove) Mereschk.***, *N. subrostellata* Hust., *N. veneta* Kütz., *N. viminoides* Giffen*, *N. viridula* var. *rostellata* (Kütz.) Cleve*, *Navicula* sp. 2, *Nitzschia acuminata* (W. Sm.) Grunow, *N. aequorea* Hust., *N. capitellata* Hust., *N. angularis* var. *affinis* (Grunow) Grunow, *N. aurariae* Cholnoky*, *N. coarctata* Grunow, *N. compressa* (Bailey) Boyer, *N. compressa* var. *elongata* (Grunow) Lange-Bert., *N. dissipata* (Kütz.) Grunow, *N. dubia* W. Sm., *N. frustulum* (Kütz.) Grunow, *N. gracilis* Hantzsch, *N. granulata* Grunow, *N. hungarica* Grunow, *N. hybrida* Grunow, *N. insignis* W. Greg., *N. levidensis* (W. Sm.) Grunow, *N. liebethuthii* Rabenh., *N. linearis* (C. Agardh) W. Sm., *N. longissima* (Brèb.) Grunow, *N. miserabilis* Cholnoky*, *N. ovalis* Arnott ex Grunow, *N. pellucida* Grunow, *N. persuadens* Cholnoky*, *N. pusilla* (Kütz.) Grunow emend. Lange-Bert., *Nitzschia sigma* (Kütz.) W. Sm., *N. sigma* var. *intercedens* Grunow, *N. thermaloides* Hust., *Nitzschia* sp. 1, *Nitzschia* sp. 5, *Nitzschia* sp. B13, *Nitzschia* sp. B21, *Opephora marina* (W. Greg.) Petit, *O. pacifica* (Grunow) Petit*, *Paralia sulcata* (Ehrenb.) Cleve, *Parlibellus delognei* (Van Heurck) E.J. Cox, *P. hamulifer* (Grunow) E.J. Cox, *P. plicatus* (Donkin) E.J. Cox, *Parlibellus* sp. 4D, *Petrodictyon gemma* (Ehrenb.) D.G. Mann, *Petroneis humerosa* (Brèb.) Stickle et D.G. Mann, *Pinnularia cruciformis* (Donkin) Cleve, *P. gibba* Ehrenb., *P. quadratarea* (A.W.F. Schmidt) Cleve, *P. trevelyana* (Donkin) Rabenh.***, *Plagiogramma tenuissima* Hust.*, *Plagiotropis lepidoptera* (W. Greg.) Kuntze, *Planothidium delicatulum* (Kütz.) Round et Bukht., *P. dispar* (Cleve) Witkowski, Metzeltin et Lange-Bert., *P. quarnerensis* (Grunow) Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin, *Pleurosigma aestuarii* (Brèb. ex Kütz.) W. Sm., *P. angulatum* (Queck.) W. Sm., *P. elongatum* W. Sm., *P. rigidum* W. Sm., *P. laevis* (Ehrenb.) Compère*, *Podosira hormoides* (Mont.) Kütz., *P. pellucida* Proshk.-Lavr., *Proshkinia complanatoidea* (Hust.) Karaeva, *Proshkinia* sp. 1, *Psammodictyon panduriforme* (W. Greg.) D.G. Mann, *Psammodiscus nitidus* (W. Greg.) Round et D.G.

Mann, *Rhabdonema adriaticum* Kütz., *Rhoicosigma compactum* (Grev.) H. Perag.*, *Rhoicosphenia abbreviata* (C. Agardh) Lange-Bert., *Rhopalodia gibba* (Ehrenb.) O. Müll., *Rh. musculus* (Kütz.) O. Müll., *Stauronella indubitabilis* Lange-Bert. et Genkal, *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Surirella brebissonii* Krammer et Lange-Bert., *S. fastuosa* (Ehrenb.) Kütz., *Synedra gaillonii* (Bory) Ehrenb., *Tabularia tabulata* (C. Agardh) P.J.M. Snoeijs, *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Mereschk., *Thalassiosira baltica* (Grunow) Ostenf., *Th. decipiens* (Grunow) Jørg., *Th. excentrica* (Ehrenb.) Cleve emend. Fryxell et Hasle, *Th. excentrica* var. *fasciculata* (Hust.) Nizam., *Th. parva* Proshk.-Lavr., *Th. subsalina* Proshk.-Lavr., *Thalassiosira* sp., *Toxarium undulatum* J.W. Bailey, *Toxonidea insignis* Donkin***, *Trachyneis aspera* (Ehrenb.) Cleve, *Triceratium antediluvianum* (Ehrenb.) Grunow.

Таким образом, в районе Балаклавской бухты выявлено более 40 новых для флоры Черного моря видов бентосных диатомовых; некоторые из них представлены в табл. I. Обнаружены также представители новых для флоры Черного моря родов: *Astartiella* A. Witkowski, H. Lange-Bert. & D. Metzeltin in G. Moser et al. 1998, *Chamaepinnularia* H. Lange-Bert. & K. Krammer in H. Lange-Bert. & D. Metzeltin 1996, *Rhoicosigma* A. Grunow 1867. Подавляющее большинство новых для флоры Черного моря родов и видов отмечено на контрольной ст. В17, находящейся за пределами б. Балаклавская.

В таксоцено диатомовых бентоса рыхлых субстратов в акватории бухты наибольшая видовая насыщенность отмечена для родов *Nitzschia* (32 вида и ввт), *Amphora* (31), *Navicula* (27), *Cocconeis* (21), *Lyrella* (14) и *Diploneis* (13). Наименьшая видовая насыщенность выявлена у порядков *Paraliales*, *Rhabdonematales*, *Thalassionematales* и *Toxariales*, где обнаружено лишь по одному представителю.

В исследованном биотопе доминируют виды, отличающиеся наиболее стабильными параметрами развития и формирующие основной характер структуры таксоцено донных диатомовых (табл. 3).

Наиболее массовые виды донных диатомовых Балаклавской бухты представлены в табл. II. В экологическом отношении виды-доминанты характеризуются как полигалобы, алкалифилы, α - и β -мезосапробы, эпипелики, космополиты и бореальные формы, которые обильно развиваются во всех зонах сублиторали и в массе встречаются в биотопах с повышенным уровнем антропогенного воздействия (Прошкина-Лавренко, 1963; Гусяков и др., 1992; Неврова и др., 2003; Барина и др., 2006).

Указанные выше виды особо значимы в таксоцено диатомовых рыхлых грунтов б. Балаклавская, поскольку вносят наибольший вклад в функционирование сообществ микрофитобентоса и определяют основные черты структуры комплексов диатомовых в акватории бухты. Вследствие высоких количественных показателей они могут выполнять роль индикаторных и дискриминационных видов при анализе особенностей сходства и различных участков бухты, которые могут возникать под влиянием

янием градиента факторов внешней среды, в т. ч. различных загрязнений донных отложений (Petrov et al., 2010).

Таблица 3

Показатели численности и встречаемости доминирующего комплекса видов донных диатомовых в б. Балаклавская

| Таксон | Численность, 10 ⁶ экз. · см ⁻² | | Встречаемость, % |
|------------------------------------|--|-------|------------------|
| | ср. | макс. | |
| <i>Nitzschia compressa</i> | 59,8 | 180,0 | 100 |
| <i>N. sigma</i> | 30,2 | 90,0 | 100 |
| <i>Thalassionema nitzschioides</i> | 6,0 | 33,8 | 100 |
| <i>Cocconeis scutellum</i> | 2,5 | 11,3 | 100 |
| <i>Bacillaria paxillifera</i> | 16,2 | 124,0 | 93,8 |
| <i>Nitzschia coarctata</i> | 1,8 | 45,0 | 93,8 |
| <i>Diploneis smithii</i> | 6,4 | 22,5 | 93,8 |
| <i>Grammatophora marina</i> | 4,9 | 22,5 | 93,8 |
| <i>Psammodyctyon panduriforme</i> | 2,5 | 16,9 | 93,8 |
| <i>Tabularia tabulata</i> | 6,0 | 39,4 | 87,5 |
| <i>Lyrella abrupta</i> | 6,4 | 16,9 | 87,5 |
| <i>Cymbella angusta</i> | 0,4 | 5,6 | 81,3 |
| <i>Fallacia forcipata</i> | 3,2 | 45,0 | 62,5 |
| <i>Amphora coffeaeformis</i> | 2,8 | 33,8 | 62,5 |
| <i>Caloneis liber</i> | 5,6 | 33,8 | 53,0 |

По результатам сопоставления биотической (показатели численности и числа видов) и абиотической (физико-химические параметры окружающей среды) матриц сходства проведен анализ коэффициента ранговой корреляции Спирмана (ρ). Наиболее высокие его значения ($\rho_{\max} = 0,62-0,63$) выявлены для комбинации из следующих 6 абиотических факторов: **глубина + фракция грунта % + $C_{\text{орг}}$ + пестициды + ПХБ + Hg**. Изменение перечисленных факторов в наибольшей степени может определять количественное распределение диатомовых и видовой состав таксоцены в изученной части Балаклавской бухты (Petrov et al., 2010).

Далее мы попытались оценить возможные изменения структуры таксоцены диатомовых в загрязненных и относительно чистых местообитаниях (см. табл. 1) с помощью различных методов (кластерный и ординационный анализ, индексы видового разнообразия, индексы таксономической отличительности, пропорции флоры).

В результате кластерного и ординационного анализа сходства станций по параметру численности и видового богатства в акватории бухты выделены (на уровне сходства 35 %) две пространственно-компактные группы станций, различающихся по среднему уровню ключевых абиотических переменных и расположению (группа I – наиболее загрязненная внутренняя часть бухты, группа II – менее загрязненная внешняя часть) (рис. 2). На уровне сходства около 20 % выделены отдельные станции,

существенно различающиеся по структурным показателям таксоцены диатомовых (см. табл. 4), а также по своим биотопическим условиям: донные отложения на ст. 13 состоят из битой ракушки и створок мидий с примесью ила, ст. 16 расположена у выхода из бухты, ст. 17 находится за пределами акватории бухты.

В каждой группе станций формируется комплекс диатомовых с определенной таксономической структурой и уровнем количественного развития видов. Установлена достоверность различий между выделенными группами станций и составом таксоценологических комплексов на основе алгоритма сравнения степени вариабельности средних значений ранговых сходств (R -статистика = 0,65 для уровня значимости < 0,1 %).

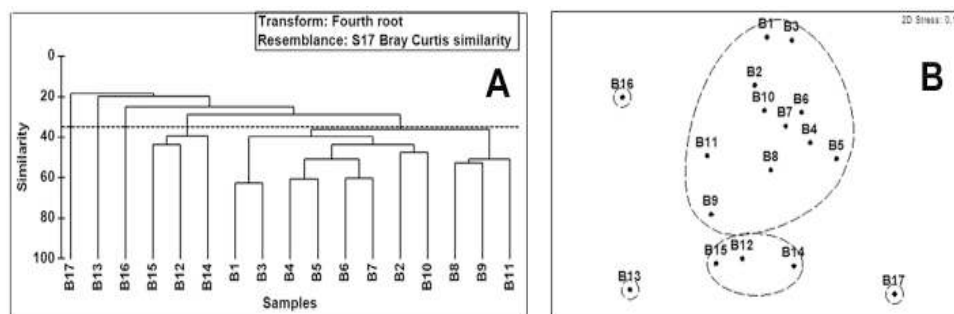


Рис. 2. Результаты кластерного (А) и ординационного (В) анализа: группирование станций исследованной части акватории Балаклавской бухты на основе показателей общей численности и видового богатства диатомовых

Рассчитаны структурные показатели сообщества диатомовых бентоса, обитающих на рыхлых грунтах в исследованной части акватории Балаклавской бухты: количество видов, общая численность, индексы видового богатства (d , H , $1-\text{Lambda}'$) и выровненности (J) (табл. 4).

Наименьшими показателями общей численности диатомовых отличаются ст. 13 и 3, общего количества видов – ст. 5, 6 и 13. Наибольшими показателями общей численности характеризуются комплексы диатомовых на станциях 15, 14, 4, 11 и 9, общего видового богатства – на ст. 8, 15, 10, 4, 9 и 17. Видовое богатство на контрольной точке ст. 17 резко отличается от значений на всех остальных станциях исследованной части акватории бухты, превышая их в 2–3 раза.

Наибольших значений индекс видового богатства Маргалефа (d) достигает на станциях 8, 10, 15 (максимально повышаясь на ст. 17), наименьших – на ст. 5, 6, 13. Значения индекса Шеннона (H') минимальны на ст. 7, 1, 5 и максимальны на ст. 14, 15, 9. Показатели индексов Пиелу (J') и Симпсона ($1-\text{Lambda}'$) относительно сходны по всей акватории бухты, с небольшим понижением на ст. 7, 3, 1, 5. Очевидно, что применение этих индексов оценки видового разнообразия оказывается малоэффективным при выявлении воздействия факторов окружающей

среды на изменения таксоцено донных диатомовых водорослей. К такому же выводу пришли ученые, использовавшие различные количественные индексы разнообразия для оценки влияния деградирующих факторов окружающей среды, особенно в отношении сообществ бентоса (Magurran, 2004; Karydis, 2009).

Таблица 4

Показатели структуры и разнообразия таксоцено диатомовых б. Балаклавская

| Станция | Глубина, м | S | N | d | J' | H' | 1- Lambda' |
|------------|---------------|-----|--------|-----|-----|-----|---------------|
| V01 | 6,0 | 40 | 135,11 | 2,1 | 0,4 | 1,5 | 0,6 |
| V02 | 8,0 | 59 | 135,07 | 3,1 | 0,5 | 2,1 | 0,8 |
| V03 | 9,5 | 51 | 101,32 | 2,7 | 0,4 | 1,6 | 0,7 |
| V04 | 10,0 | 69 | 366,21 | 3,5 | 0,4 | 1,8 | 0,7 |
| V05 | 9,5 | 25 | 298,30 | 1,2 | 0,5 | 1,6 | 0,6 |
| V06 | 9,0 | 35 | 315,35 | 1,7 | 0,5 | 1,8 | 0,7 |
| V07 | 11,0 | 48 | 247,92 | 2,4 | 0,4 | 1,4 | 0,6 |
| V08 | 14,0 | 79 | 163,35 | 4,1 | 0,5 | 2,2 | 0,9 |
| V09 | 14,0 | 59 | 276,11 | 3,0 | 0,7 | 2,8 | 0,9 |
| V10 | 12,0 | 70 | 174,41 | 3,6 | 0,4 | 1,8 | 0,8 |
| V11 | 15,0 | 51 | 321,00 | 2,5 | 0,6 | 2,5 | 0,9 |
| V12 | 12,0 | 51 | 163,41 | 2,6 | 0,7 | 2,6 | 0,9 |
| V13 | 19,5 | 38 | 95,81 | 2,0 | 0,6 | 2,3 | 0,9 |
| V14 | 12,0 | 48 | 495,66 | 2,3 | 0,8 | 3,1 | 0,9 |
| V15 | 23,0 | 75 | 591,49 | 3,7 | 0,7 | 3,0 | 0,9 |
| V16 | 20,0 | 42 | 112,65 | 2,2 | 0,6 | 2,1 | 0,9 |
| V17 | 12,0 | 153 | 287,35 | 7,8 | 0,5 | 2,7 | 0,9 |

Обозначения. S – количество видов, ед.; N – общая численность, $\times 10^6$ экз.·см⁻²; d – индекс Маргалефа; J' – индекс Пielу; H' – индекс Шеннона (log_e); 1-Lambda' – индекс Симпсона.

Традиционно используемые индексы часто имеют существенные недостатки, не позволяющие применить их для адекватной оценки биоразнообразия в морских биотопах. В последнее время вновь разработанный индекс таксономической отличительности (Warwick, Clarke, 1998, 2001), позволяющий учитывать таксономическую взаимосвязь между видами в сообществе, все шире применяется в практике биомониторинга для оценки биоразнообразия различных групп наземной и водной биоты в разных регионах мира (Warwick et al., 2002; Leonard et al., 2006; Ceschia et al., 2007). Имеется небольшое количество работ, посвященных биоразнообразию перифитона (Izsak et al., 2002), личинок водных насекомых (Campbell et al., 2007) и пресноводной микрофлоры (Leira et al., 2009). Но индекс таксономической отличительности для оценки антропогенного влияния на морской микрофитобентос ещё не использовался, поэтому для диатомологии наши разработки являются

первыми (Неврова, Петров, 2008; Неврова, 2013; Petrov et al., 2010; Petrov, Nevrova, 2011).

Для сравнительной оценки возможных отклонений таксономической структуры таксоценоза диатомовых в разных частях бухты от среднеожидаемого уровня (диатомовая флора всего Черного моря) для каждой станции были рассчитаны значения индекса средней таксономической отличительности Δ^+ и его вариабельности Λ^+ (Warwick, Clarke, 1998). Для расчета этих индексов список видов диатомовых Черного моря (1098 видов и ввт) агрегирован вдоль 7 восходящих иерархических уровней (от ввт до отдела) и использован для построения 95 % вероятностных воронок, на которых распределены значения Δ^+ и Λ^+ для всего таксоценоза диатомовых Балаклавской бухты в целом (рис. 3) и каждой исследованной станции (рис. 4).

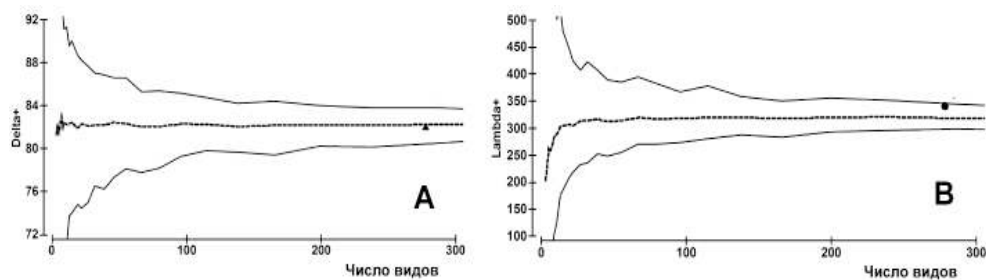


Рис. 3. Значения индекса таксономической отличительности Δ^+ (A) и Λ^+ (B) для таксоценоза диатомовых Балаклавской бухты в целом, рассчитанных на основе мастер-листа для всего Черного моря (95 % вероятности)

Расположение точек на графиках отражает среднюю вертикальную выровненность распределения таксонов вдоль иерархического древа (Δ^+) и их горизонтальную вариабельность (Λ^+). Анализ этих двух показателей необходим для оценки возможного влияния различных абиотических факторов биотопа на разнообразие таксоценоза диатомовых.

Значение индекса Δ^+ , рассчитанного для таксоценоза диатомовых бентоса Балаклавской бухты в целом (81,9), оказалось близким к среднеожидаемой величине, рассчитанной для всего списка флоры Черного моря (82,14) (см. рис. 3, A). Значение индекса вариабельности Λ^+ (342,5) превысило среднеожидаемый уровень для Черного моря (318,9) и находится у верхнего предела 95 % доверительной воронки (см. рис. 3, B). Это позволяет охарактеризовать таксономическую структуру диатомовой флоры Балаклавской бухты в целом как иерархически выровненную в средней степени наряду с высокой степенью вариабельности.

Точки, соответствующие значениям индекса Δ^+ для ст. В3, 4 и 7, расположены вблизи центра воронки (рис. 4, A). Это означает, что структура таксоценоза диатомовых на этих участках близка к среднеожидаемому значению для всего Черного моря.

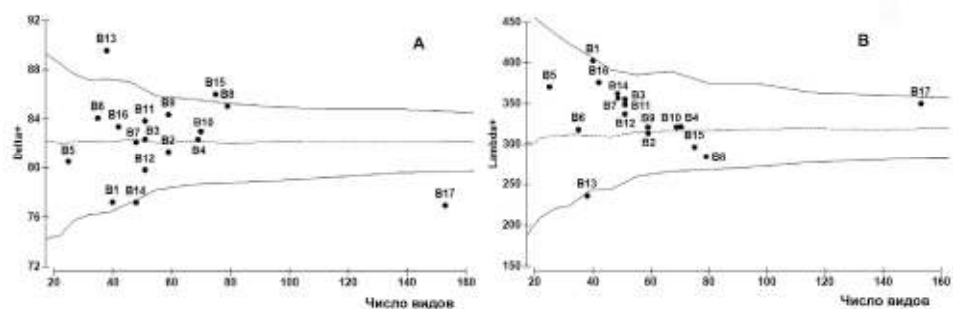


Рис. 4. Графики (95 % вероятности), отражающие распределение значений индекса таксономической отличительности AvTD (A) и VarTD (B) для каждой из 17 станций Балаклавской бухты, рассчитанных на основе мастер-листа для всего Черного моря

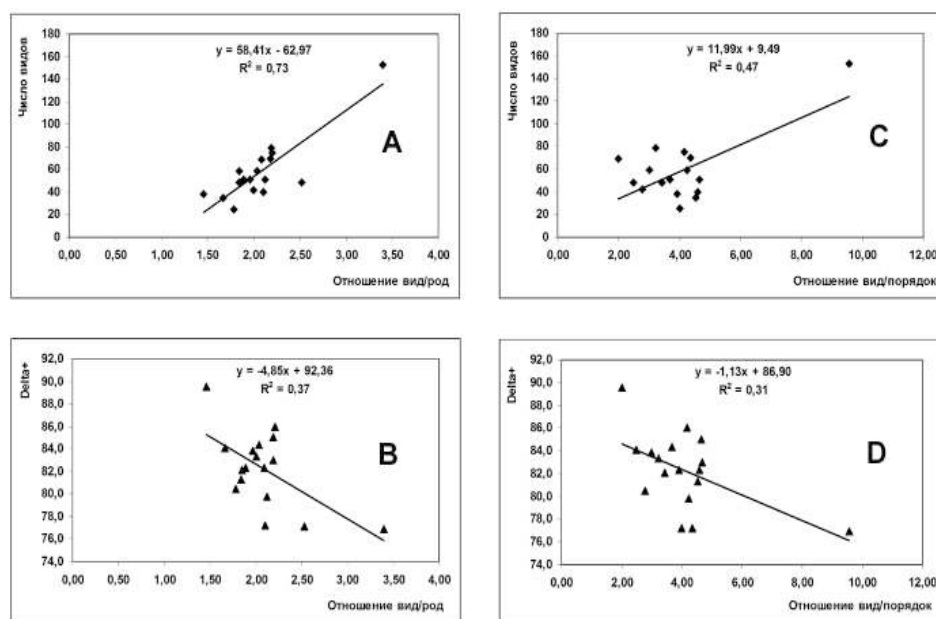


Рис. 5. Зависимость изменения количества видов (A, C) и значений индекса Δ^+ (B, D) от пропорций флоры диатомовых Балаклавской бухты

Расположение точек, соответствующих значениям Δ^+ для ст. В13 и В15, над верхней границей графика, позволяет охарактеризовать таксономическую структуру комплексов диатомовых на этих станциях как содержащую большую долю моно- и олиговидовых таксонов. Отношение вид/род в комплексах донных диатомовых, обнаруженных на данных станциях, довольно сходно (1,4 и 2,0 соответственно), несмотря на то, что количество видов различается примерно в два раза (38 и 73 соответственно).

При сравнении станций с разным количеством видов диатомовых видно, что возрастание видового богатства происходит за счет добавления новых так-

сономических ветвей, которые могут относиться к различным уровням иерархии — от вида до порядка. При этом появление новых ветвей на видовом уровне, замыкающихся на общий родовой узел, происходит гораздо интенсивнее, чем новых ветвей, сходящихся на уровне семейств или порядков. То есть, процесс возрастания видового богатства происходит преимущественно за счет возрастания числа новых близкородственных видов. Виды, принадлежащие к отдельным таксономическим ветвям, замыкающимся на более высоких уровнях иерархии (семейство, порядок), появляются в структуре таксоцены намного реже.

Поэтому при расчете среднего расстояния между любыми случайными парами видов до общего таксономического узла (согласно алгоритму расчета значений индекса Δ^+) относительный вклад новых близкородственных видов в архитектуру таксономического древа оказывается намного существеннее вклада новых далекородственных видов, замыкающихся на более высоком иерархическом уровне. Иными словами, чем выше видовое богатство таксоцены, основанное на поливидовых близкородственных ветвях, тем ниже среднее значение индекса Δ^+ .

Следовательно, точки значений индекса Δ^+ , соответствующие станциям с низким видовым богатством диатомовых, как правило, располагаются на графике вблизи или выше верхней границы 95 % доверительного интервала (см. рис. 4, А). В свою очередь, точка значения Δ^+ , соответствующая таксоценологическому комплексу контрольной станции В17 с максимальным видовым богатством (153 вида с высокой долей поливидовых близкородственных таксонов), на графике занимает положение вблизи или даже за пределами нижней границы доверительной воронки.

Установлена линейная зависимость возрастания отношения вид/род и вид/порядок от увеличения количества видов, обнаруженных на исследованной части акватории бухты (рис. 5, А, С). Опосредованно процесс снижения величины значений Δ^+ с ростом числа видов, обнаруживаемых на станциях, прослеживается по возрастанию пропорций флоры диатомовых (соотношение вид/род, вид/порядок) на тех же станциях (рис. 5, В, D).

При анализе рассчитанных соотношений выявлено, что архитектура таксономического древа, соответствующего таксоцену диатомовых на ст. В13 (значение индекса Δ^+ расположено выше верхнего доверительного предела на рис. 4, А), характеризуется наличием значительной доли олиговидовых ветвей, агрегирующихся на лежащем выше уровне (отношение вид/род = 1,5; вид/семейство = 1,65; вид/порядок = 2,0). Это означает, что каждые три вида замыкаются на два рода. При сравнении со структурой таксоцены диатомовых на ст. В17 (где отношение вид/род = 3,4; вид/семейство = 5,3; вид/порядок = 9,6, а значение индекса Δ^+ находится на графике ниже нижней границы 95 % доверительной воронки), видно, что каждые 10 видов агрегируются в 3 рода, т.е. архитектура древа характеризуется преобладанием поливидовых ветвей и уплощенной структурой.

Таким образом, таксономическая отличительность и соответствующее этой характеристике разнообразия количественное значение индекса Δ^+ для

таксоцена диатомовых на ст. В13 максимально, а для ст. В17 – минимально, несмотря на почти 4-кратное превышение видового богатства за счет увеличения числа близкородственных видов. На ст. В13 от уровня семейства и выше агрегация таксонов практически не выражена – 38 видов агрегируются в 23 семейства и затем в 19 порядков. На ст. В17 процесс агрегирования продолжается более интенсивно – 153 вида замыкаются в 29 семейств и далее в 16 порядков. Очевидный, на первый взгляд, парадокс – 4-кратное превышение количества видов на ст. В17, по сравнению со ст. В13, оказывается мнимым, поскольку число порядков на контрольной станции на три единицы ниже, чем на последней.

В результате исследований прослежены отрицательные тренды: чем выше значение пропорций флоры (отношение вид/род, вид/порядок) в таксоцене диатомовых, тем ниже рассчитанное значение индекса таксономической отличительности (рис. 5, B, D).

Между ключевыми абиотическими факторами, выделенными в результате анализа коэффициента ранговой корреляции Спирмана, и изменениями в значениях индекса AvTD выявлены одномерные зависимости (рис. 6) (Petrov et al., 2010).

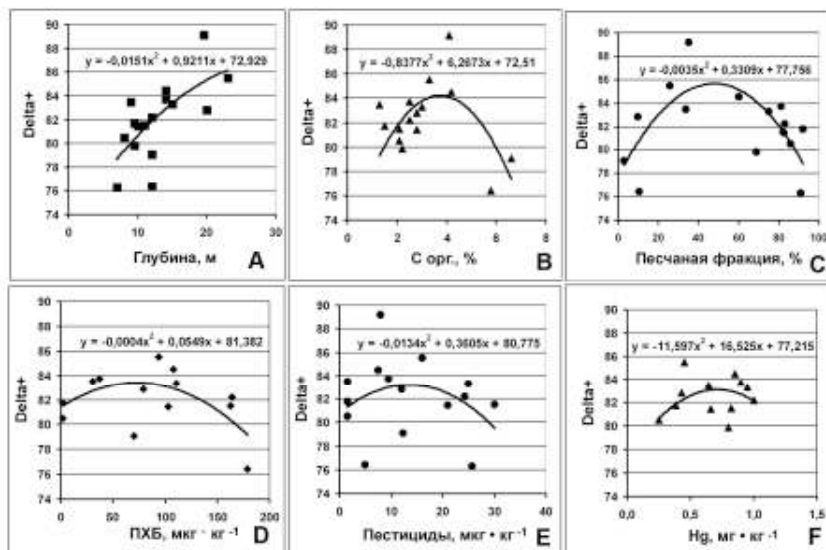


Рис. 6. Зависимость между абиотическими факторами и значениями индекса AvTD для таксоцена диатомовых б. Балаклавская: A – глубина; B – C_{орг}; C – песчаная фракция грунта; D – ПХБ; E – пестициды; F – Hg

Кривые на графиках изменения значений Δ^+ вдоль оси абиотических параметров (C_{орг}, гранулометрический состав грунта) и поллютантов (ПХБ, пестициды, Hg) имеют куполообразную форму. Это означает, что значение таксономической отличительности может возрастать до определенного уровня, соответствующего предельно допустимому уровню каждого из проанализированных ключевых факторов, но при дальнейшем увеличении

количественного значения данного фактора и возрастании его влияния значение индекса Δ^+ начинает уменьшаться.

Обнаруженные закономерности выявляют отклонения таксономической выровненности структуры таксоцены Балаклавской бухты от среднего уровня вследствие влияния перечисленных факторов окружающей среды. В исследовании по диатомовым пресноводным водоемам (Leira et al., 2009) также показано, что таксономическое разнообразие повышается по отношению к начальному уровню вследствие относительного преобладания олиговидовых ветвей в иерархической структуре сообщества.

Такие изменения могут быть вызваны увеличением антропогенных нарушений в биотопе. Однако дальнейшее усиление негативного воздействия (включая загрязнения) может привести к деградации сообщества, исчезновению олиговидовых ветвей и их постепенному замещению в таксономической структуре сообщества поливидовыми ветвями. Другими авторами также отмечено, что различные экологические нарушения (природного либо антропогенного происхождения) приводят к элиминации моно- и олиговидовых ветвей, в то время как поливидовым таксономическим группам удается поддерживать стабильность структуры (Протасов, 2002; Warwick, Clarke, 1998, 2001). В целом, значения таксономической отличительности в деградировавших биотопах обычно значительно ниже, чем в относительно ненарушенных местообитаниях, как показано в результате исследований различных групп организмов (например, бентосных нематод, демерсальных рыб, иглокожих) (Warwick et al., 2002; Leonard et al., 2006; Ceschia et al., 2007).

Применение индексов таксономической отличительности AvTD и VarTD рекомендуется при интегральной оценке деградирующих изменений в разнообразии сообществ, вызванных воздействием различных экологических факторов (Izsak et al., 2001). Использование этих показателей является важным компонентом при мониторинге морских прибрежных экосистем (Leonard et al., 2006), когда оценка разнообразия бентосных диатомовых может быть рассмотрена в качестве ключевого биоиндикатора (Petrov et al., 2010).

Заключение

Проанализированы особенности видового богатства, пространственного распределения и таксономического разнообразия диатомовых бентоса в зависимости от абиотических факторов среды в Балаклавской бухте (юго-западный Крым, Черное море).

В акватории бухты выделены две компактные группы, а также три отдельные станции, различающиеся по структурным показателям таксоцены диатомовых, среднему уровню ключевых абиотических переменных и пространственному расположению (группа I – наиболее загрязненная внутренняя часть бухты, группа II – менее загрязненная ее внешняя часть). В пределах каждой группы станций сформирован комплекс диа-

томовых с определенной таксономической структурой и уровнем количественного развития видов.

Структура таксоцены диатомовых изученной акватории Балаклавской бухты в целом оказалась близка к среднеожидаемому уровню таксономической структуры, рассчитанному для всего Черного моря. Наибольшие значения Δ^+ отмечены во внутренней части бухты, что вызвано присутствием в структуре таксоцены значительной доли моно- и олиговидовых ветвей. В менее загрязненной внешней части бухты преобладают олиговидовые ветви, вследствие этого значения Δ^+ близки к среднеожидаемому уровню для всего Черного моря. На контрольной станции значение Δ^+ минимально, что вызвано доминированием поливидовых ветвей в иерархическом древе таксоцены.

Значения пропорций вид/род и вид/порядок возрастают в линейной зависимости от увеличения количества видов, в то же время с ростом значений данных пропорций в таксоцене диатомовых отмечены отрицательные тренды снижения величины значений Δ^+ . Прослежена зависимость между ключевыми абиотическими факторами и изменениями значений индекса таксономической отличительности: значение Δ^+ повышается до определенного уровня конкретного фактора, но при его дальнейшем возрастании значение индекса Δ^+ начинает уменьшаться.

Применение индекса таксономической отличительности может быть использовано в экологическом мониторинге для оценки биоразнообразия и сравнительного выявления отклонений иерархической структуры таксоцены в конкретных биотопах под влиянием различных экологических условий.

Выражаем глубокую благодарность к.б.н. А.Н. Петрову (ИнБЮМ НАНУ) за статистический анализ и ценные замечания при подготовке статьи, к.б.н. Н.К. Ревкову (ИнБЮМ НАНУ) за помощь в съемках и критические замечания, а также профессорам А. Витковски и Х. Ланге-Берталот (Университет г. Щецина, Польша) за предоставленное оборудование для микрофотосъемок и консультации при идентификации видов диатомовых. Исследование частично финансировано Агентством по охране окружающей среды (США), при содействии Украинского Научно-Технологического центра (Киев) в ходе выполнения проекта Р-277 (2006–2009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. – Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. – 498 с.
- Гусяков Н.Е., Загордонцев О.А., Герасимюк В.П. Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов. – Киев: Наук. думка, 1992. – 115 с.
- Диатомовый анализ. – М.: Госгеолитиздат, 1950. – Т. 3. – 398 с.
- Диатомовые водоросли СССР. – Л.: Наука, 1974. – Т. 1. – 403 с.
- Неврова Е.Л., Ревков Н.К., Петров А.Н. Микрофитобентос // Современное состояние

- биоразнообразия прибрежных вод Крыма (Черноморский сектор). – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – С. 270–282; 288–302; 351–362.
- Неврова Е.Л., Петров А.Н. Таксономическое разнообразие диатомовых бентоса Черного моря. Гл. 4 // Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – С. 60–84.
- Неврова Е.Л. Таксономическое разнообразие и структура таксоцены бентосных диатомовых (*Bacillariophyta*) в Севастопольской бухте (Чёрное море) // Мор. экол. журн. – 2013. – 12(3). – С. 55–67.
- Никитина О.А., Шкундина Ф.Б. Выделение индикаторных видов автотрофного бентоса водотоков г. Стерлитамака (Россия) // Альгология. – 2009. – 19(4). – С. 412–422.
- Петров А.Н., Неврова Е.Л. Сравнительный анализ структуры таксоцены донных диатомовых (*Bacillariophyta*) в районах с различным уровнем техногенного загрязнения (Черное море, Крым) // Мор. экол. журн. – 2004. – 3(2). – С. 72–83.
- Петров А.Н., Неврова Е.Л., Малахова Л.В. Многомерный анализ распределения бентосных диатомовых (*Bacillariophyta*) в поле градиентов абиотических факторов в Севастопольской бухте (Черное море, Крым) // Там же. – 2005. – 4(3). – С. 65–77.
- Протасов А.А. Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсиколия. – Киев, 2002. – 106 с.
- Прошкина-Лавренко А.И. Диатомовые водоросли бентоса Черного моря. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. – 243 с.
- Ревков Н.К., Неврова Е.Л. Изучение особенностей структуры таксоцены бентосных диатомовых (*Bacillariophyta*) с помощью методов многомерной статистики (бухта Ласпи, Черное море, Украина) // Альгология. – 2004. – 14(2). – С. 161–170.
- Царенко П.М. Рекомендации по унификации цитирования фамилий авторов таксонов водорослей // Альгология. – 2010. – 20(1). – С. 86–121.
- Algae of Ukraine. Diversity. Nomenclature. Taxonomy. Ecology and Geography. 2. Bacillariophyta* / Eds. P.M. Tsarenko, S.P. Wasser, E. Nevo. – Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag K.-G., 2009. – 413 p.
- Burgess R.M., Konovets I.M., Kipnis L.S. et al. Distribution, magnitude and characterization of the toxicity of Ukrainian estuarine sediments // Mar. Pollut. Bull. – 2011. – 62. – P. 2442–2462.
- Campbell W.B., Novelo-Gutierrez R. Reduction in odonate phylogenetic diversity associated with dam impoundment is revealed using taxonomic distinctness // Fund. and Appl. Limnol. – 2007. – 168. – P. 83–92.
- Ceschia C., Falace A., Warwick R. Biodiversity evaluation of the macroalgal flora of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) using taxonomic distinctness indices // Hydrobiologia. – 2007. – 580. – P. 43–56.
- Clarke K.R., Gorley R.N. PRIMER v5: User Manual. Tutorial. – Plymouth: PRIMER-E, 2001. – 92 p.
- Fourtanier E., Kociolek J.P. Catalogue of Diatom Genera // Diatom Res. – 1999. – 14(1). – P. 1–190.
- Fourtanier E., Kociolek J.P. Catalogue of Diatom Names. – California Acad. Sci. on-line

- Version. Comp. by Fourtanier E., J.P. Kociolek. – 2007. – Mode of Access : <http://www.calacademy.org/research/diatoms/names/index.asp>.
- International Plant Names Index* [Electronic resource]. – 2012. – Mode of Access : <http://www.ipni.org>
- Izsak C., Price A.R.G., Hardy J.T., Basson P.W.* Biodiversity of periphyton (diatoms) and echinoderms around a refinery effluent, and possible associations with stability // *Aquat. Ecosyst. Health & Manag.* – 2002. – **5**(1). – P. 61–70.
- Karydis M.* Eutrophication assessment of coastal waters based on indicators: a literature review // *Global Nest. J.* – 2009. – **11**(4). – P. 373–390.
- Leira M., Chen G., Dalton C., Irvine K., Taylor D.* Patterns in freshwater diatom taxonomic distinctness along an eutrophication gradient // *Freshwat. Biol.* – 2009. – **54**. – P. 1–14.
- Leonard D., Clarke K., Somerfield P., Warwick R.* The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessment // *J. Environ. Manag.* – 2006. – **78**. – P. 52–62.
- Levkov Z.* *Amphora sensu lato* // *Diatoms of Europe.* – Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag K.-G., 2009. – 916 p.
- Magurran A.E.* *Measuring Biological Diversity.* – Oxford: Black. Publ., 2004. – 256 p.
- Nevrova E.L., Petrov A., Witkowski A. et al.* Current state of benthic diatoms exploration in the Black Sea: diversity. taxonomic structure and response to pollution // 5 Central Europ. Diatom Meet. (24–27 March 2011, Szczecin, Poland). – Szczecin: Wydaw. Nauk. Univ. Szczec., 2011. – P. 89–90.
- Nevrova E.L., Witkowski A., Kulikovskiy M., Lange-Bertalot H.* A review of the the Black Sea diatom taxa belonging in *Lyrella* Karaeva 1978 with a description of five species new for science // *Phytotaxa.* – 2013. – **83**(1). – P. 1–38.
- Petrov A., Nevrova E., Terletsкая A. et al.* Structure and taxonomic diversity of benthic diatoms assemblage in a polluted marine environment (Balaklava Bay, Black Sea) // *Polish Bot. J.* – 2010. – **55**(1). – P. 183–197.
- Petrov A.N., Nevrova E.L.* The taxonomic diversity indices of benthic diatoms at two environmentally different estuaries of SW Crimea (Black Sea) // 5 Central Europ. Diatom Meet. (24–27 March 2011, Szczecin, Poland). – Szczecin: Wydaw. Nauk. Univ. Szczec., 2011. – P. 93–94.
- Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G.* *The diatoms. Biology and morphology of the genera.* – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990. – 747 p.
- Sladeczek V.* Diatoms as indicator of Organic Pollution // *Acta Hydrochim. et Hydrobiol.* – 1986. – **14**(5). – P. 555–566.
- Warwick R.M.* Environmental impact studies on marine communities: Pragmatical considerations // *Austral. J. Ecol.* – 1993. – **18**. – P. 63–80.
- Warwick R.M., Clarke K.R.* Taxonomic distinctness and environmental assessment // *J. Appl. Ecol.* – 1998. – **35**. – P. 532–543.
- Warwick R.M., Clarke K.R.* Practical measures of marine biodiversity based on relatedness of species // *Oceanogr. and Mar. Biol.: Annual Rev.* – 2001. – **39**. – P. 207–231.
- Warwick R.M., Ashman C.M., Brown A.R. et al.* Inter-annual changes in the biodiversity and community structure of the macrobenthos in Tees Bay and the Tees estuary. UK. associated with local and regional environmental events // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* – 2002. – **234**. – P. 1–13.

- Watanabe T., Asai K., Houki A.* Numerical water quality monitoring of organic pollution using diatom assemblages // Proc. 9th Int. Diatom Symp. – Koenigstein: Koeltz Sci. Books, 1988. – P. 123–141.
- Watanabe T., Asai K., Houki A.* Numerical simulation of organic pollution in flowing waters // Encyclopedia Environmental Control Technology. V. 4. Hazardous Waste: Containment and Treatment. – Houston: Gulf Publ. Co., 1990. – P. 252–281.
- Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D.* Diatom flora of Marine Coast. 1. Iconographia Diatomologica. – Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag K.-G., 2000. – 926 p.
- Witkowski A., Kulikovskiy M., Nevrova E., Lange-Bertalot H., Gogorev R.* The genus *Navicula* in ancient basins. I. Two novelties from the Black Sea // Plant Ecol. Evol. – 2010. – **143**(3). – P. 307–317.

Поступила 19 июня 2012 г.

Подписала в печать Г.Г. Миничева

E.L. Nevrova

Institute of Biology of Southern Seas NAS of Ukraine,
2, Nakhimov Av., 99011 Sevastopol, Ukraine

TAXONOMIC DIVERSITY AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF BENTHIC DIATOMS AT BALAKLAVA BAY (SOUTH-WESTERN CRIMEA, THE BLACK SEA, UKRAINE)

At heavy polluted Balaklava Bay (Southwestern Crimea, the Black Sea) and on reference site the 17 stations on soft bottom in depths range 6–23 m in September 2006 were fulfilled. Total 278 species and infraspecies taxa of benthic diatoms were found, among them 40 species were found as newly for the Black Sea flora. The most representative genera were *Nitzschia* (32 sp. & ssp.), *Amphora* (31), *Navicula* (27), *Cocconeis* (21), *Lyrella* (14) and *Diploneis* (13). Based on abundance calculation results and using cluster and MDS analysis, 2 groups of stations were distinguished (I group is at the most polluted internal part of the bay, II one – an external part). The diatom taxocenotic complex with the certain structure was formed within each of the group and characterized by well-defined taxonomic structure. Diversity of diatom taxocen was estimated using of flora ratio, Shannon, Pielow, Simpson, Margalef indices. The indices of taxonomic distinctness AvTaxD (Δ^+) and VarTD (Λ^+) also were calculated for every investigated station. The greatest values Δ^+ was noted at internal part of the bay that is caused by presence in taxocen structure the considerable share of mono- and oligo-species branches. In less polluted external part of the bay values Δ^+ are close to the expected mode, corresponding to structure of whole Black Sea benthic diatoms inventory that means prevailing of oligo-specific branches. At reference site the value Δ^+ is minimum that is caused by domination of polyspecies branches in a hierarchical tree of taxocen.

Key words: benthic diatoms, *Bacillariophyta*, Black Sea, structure of taxocene, taxonomic distinctness indices, diversity assessment.

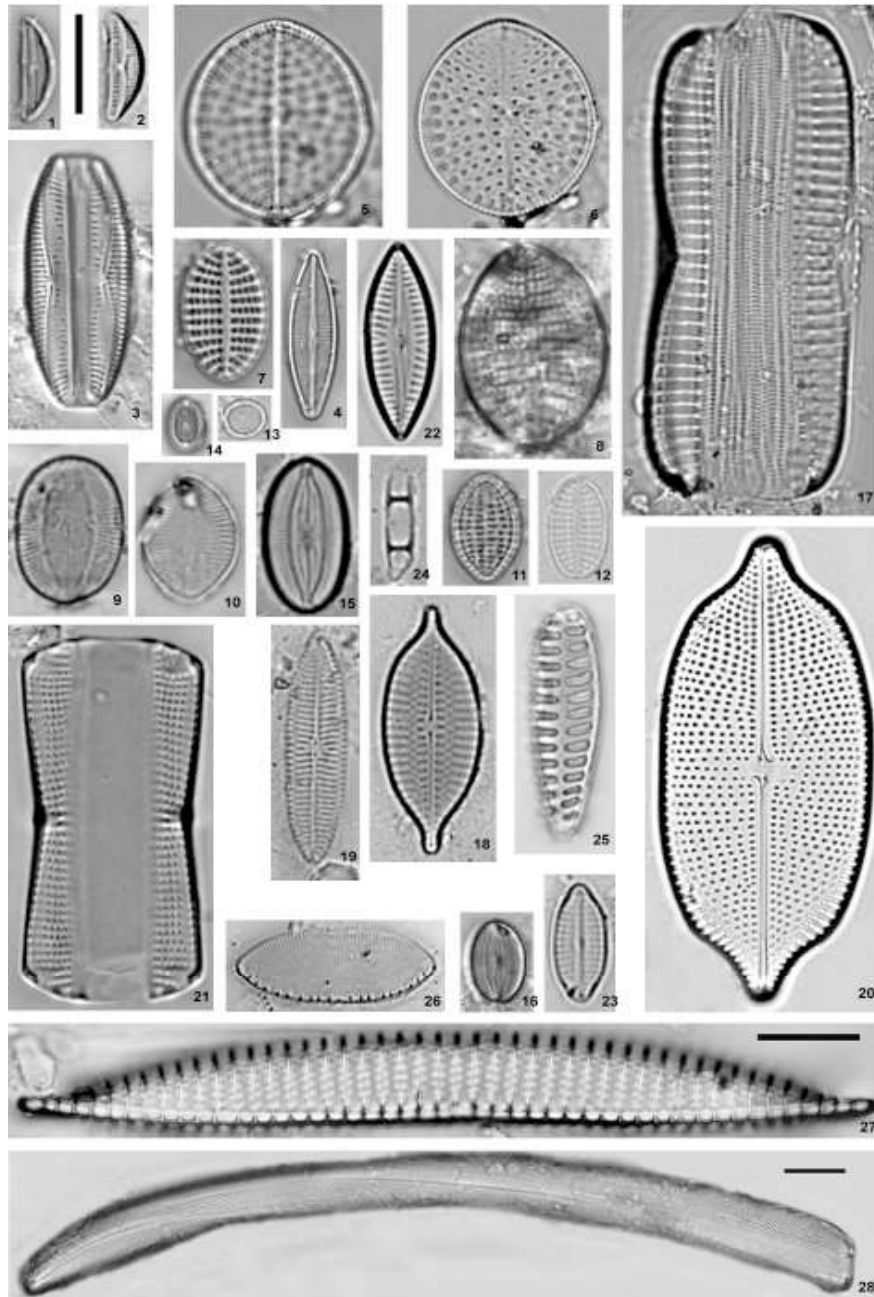


Табл. I. Новые для флоры Черного моря виды диатомовых: 1 – *Amphora exilitata*; 2 – *A. helenensis*; 3 – *A. pusio*; 4 – *Astartiella bahusiensis*; 5, 6 – *Cocconeis guttata* (при разном фокусе); 7 – *C. pseudocostata*; 8 – *C. clandestina*; 9 – *C. pelta*; 10 – *C. pseudograta*; 11 – *C. discrepans*; 12 – *C. peltoides*; 13 – *Cyclotella choktawhatcheeana*; 14 – *Fallacia aequorea*; 15 – *F. oculiformis*; 16 – *F. florinae*; 17 – *B. ridicula*; 18 – *Fogedia giffeniana*; 19 – *Navicula arenaria*; 20 – *N. besarensis*; 21 – *N. northumbrica*; 22 – *N. palpebrulum*; 23 – *N. viminoides*; 24 – *Plagiogramma tenuissima*; 25 – *Opehora pacifica*; 26 – *Nitzschia persuadens*; 27 – *Hantzschia marina*; 28 – *Rhoicosigma compactum*. Шкала 10 мкм

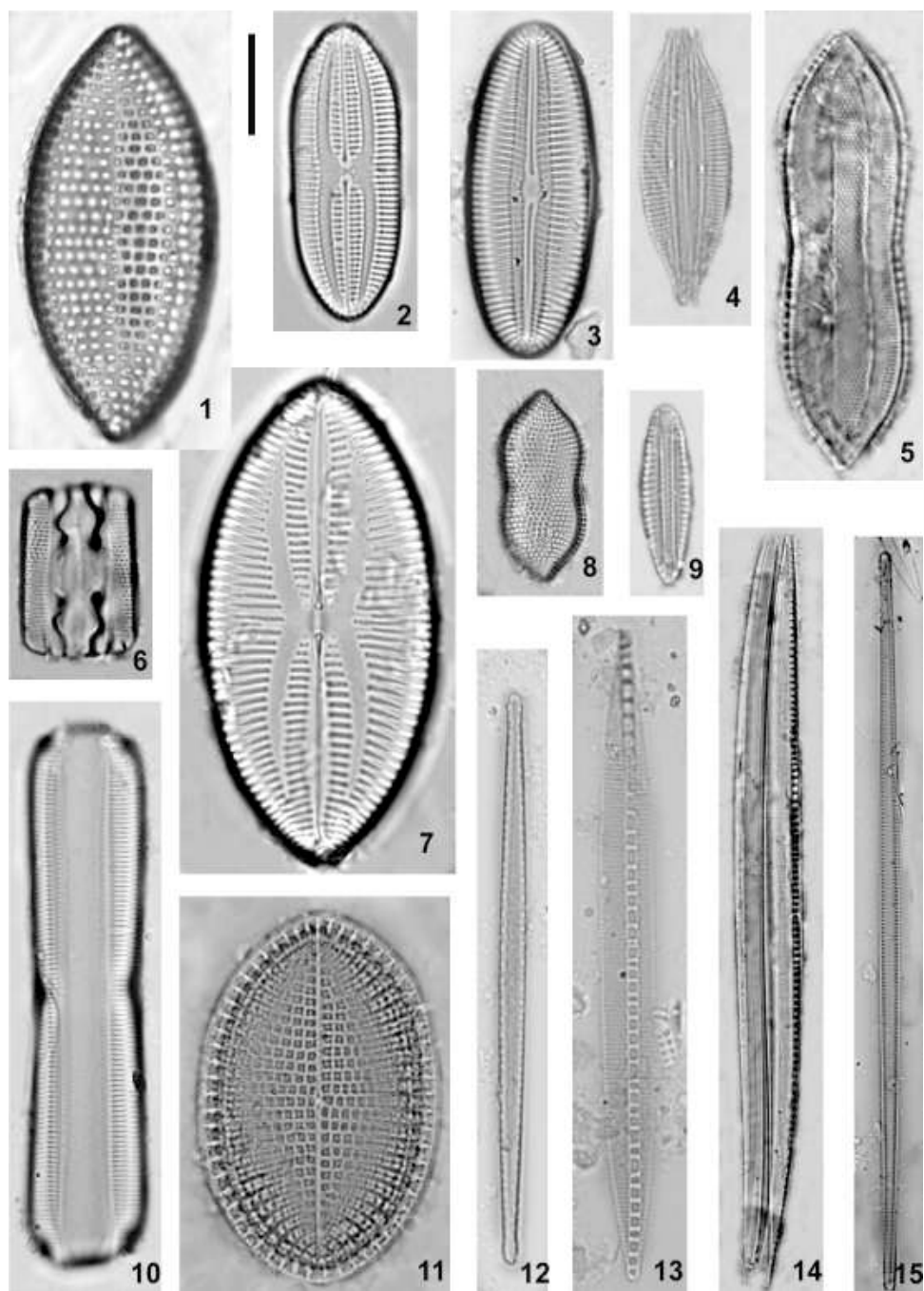


Табл. II. Доминирующие виды донных диатомовых на рыхлых грунтах в Балаклавской бухте: 1 – *Nitzschia compressa*; 2 – *Fallacia forcipata*; 3 – *Diploneis smithii*; 4 – *Halamphora coffeaeformis*; 5 – *Psammodictyon panduriforme*; 6 – *Grammatophora marina*; 7 – *Lyrella abrupta*; 8 – *Nitzschia* cf. *coarctata*; 9 – *Cymbella angusta*; 10 – *Caloneis liber*; 11 – *Cocconeis scutellum*; 12 – *Thalassionema pseudonitzschioides*; 13 – *Bacillaria paxillifera*; 14 – *Nitzschia sigma*; 15 – *Tabularia tabulata*. Шкала 10 мкм