

ОЦЕНКА ТАКСОНОМИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ДОННЫХ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ (BACILLARIOPHYTA) БУХТЫ ДВУЯКОРНАЯ (КРЫМ, ЧЁРНОЕ МОРЕ)

Е. Л. Неврова, А. Н. Петров

Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, РФ,
el_nevrova@mail.ru

Анализ разнообразия донных диатомовых в неизученной ранее акватории б. Двужкорная (БД) выявил 304 вида и ввт (299 видов, 78 родов, 37 семейства, 20 порядков и 3 класса Bacillariophyta). Иерархическая структура таксоцена диатомовых БД, оцененная на основе индексов TaxDI (Δ^+ и Λ^+), характеризуется низкой выровненностью и высокой вариабельностью образующих её филогенетических ветвей. Показатели индекса Δ^+ для БД меньше, а его вариабельность Λ^+ выше, чем среднее ожидаемые значения, рассчитанные для флоры диатомовых Чёрного моря. Архитектоника древа диатомовых БД образована ветвями с различной видовой насыщенностью и иерархической подчиненностью, с преобладанием поливидовых таксонов, замыкающихся на родовом уровне.

Ключевые слова: Bacillariophyta, диатомовые, таксоцен, индекс TaxDI, Чёрное море

Изучение разнообразия и структуры таксоценов донных диатомовых в прибрежных экологически разнородных биотопах Чёрного моря актуально в связи с ключевой ролью Bacillariophyta в функционировании экосистемы шельфа и необходимо для определения приоритетности сохранения видов, а также при мониторинге и биоиндикации состояния среды на основе показателей биоразнообразия. Донные диатомовые в антропогенно малонарушенной б. Двужкорная никогда не исследовались, в отличие от акваторий у Карадага [1] и Юго-западного Крыма [2–6]. Работа сфокусирована на изучении видового богатства Bacillariophyta в акватории б. Двужкорная и сравнительной оценке их таксономического разнообразия формализованными методами.

Материал и методы. Бухта Двужкорная (БД) расположена в юго-восточной части Крыма и относится к открытому типу. Акватория бухты до начала 2000-х была закрыта, вследствие чего здесь сохранились благоприятные условия морской среды. Материал собран в августе 2008 г. в акватории БД (44°59'28"N, 35°22'04"E) на 11 станциях (в двух повторностях) на глубине 2–9 м. Одновременно отобраны пробы грунта для анализа техногенных загрязнителей, который был проведен коллегами из ИКХХВ НАНУ и ИОХ НАНУ [2, 7, 8]. Идентификация диатомовых осуществлена по постоянным препаратам с помощью световой и электронной микроскопии [9], с использованием системы Ф. Раунда и др. [10, 11]. Сходство видового состава диатомовых БД и изученных нами ранее акваторий б. Севастопольская (БС), б. Балаклавская (ББ), м. Фиолент (МФ) и Карадага (К) [1–6] оценено по коэффициенту Брея–Кёртиса. Разнообразие таксоцена диатомовых оценено с помощью индексов TaxDI: Δ^+ – индекс таксономической отличительности AvTD, Λ^+ – индекс вариабельности VarTD [12, 13] в пакете PRIMERv5 [9, 14].

Результаты и обсуждение. Видовое богатство диатомовых БД представлено 304 видами и ввт, относящимися к 299 видам, 78 родам, 37 семействам, 20 порядкам и 3 классам отдела Bacillariophyta. Отмечены 67 видов и ввт из числа новых для флоры Чёрного моря и 4 вида и 1 таксономическая комбинация, описанные нами ранее как новые для науки: *Lyrella abruptapontica* Nevrova, Witkowski, Kulikovskiy et Lange-Bert., *L. pontieuxini* Nevrova, Witkowski, Kulikovskiy et Lange-Bert., *L. pseudolyra* Nevrova,

Witkowski, Kulikovskiy et Lange-Bert., *Navicula parapontica* Witkowski, Kulikovskiy, Nevrova et Lange-Bert., *N. pontica* Witkowski, Kulikovskiy, Nevrova et Lange-Bert. [15, 16]. Отмечены также виды, не регистрируемые в Черном море на протяжении последних 50 – *Navicula glabriuscula* var. *elipsoidales* Proshk.-Lavr. и 100 лет исследований – *N. petrovii* Nevrova, Witkowski, Kociolek et Lange-Bertalot (Syn.: *N. scabriuscula* (Cleve et Grove) Mereschk.), *Toxonidea insignis* Donkin и *Pinnularia trevelyana* (Donkin) Rabenh. [2, 17]. Обнаружены представители 4 родов: *Amicula*, *Astartiella*, *Chamaepinnularia*, *Cocconeopsis*, отмеченных ранее как новые для черноморской флоры [2]. К ним относятся *Amicula speculum* (Witkowski) Witkowski, *Astartiella bahusiensis* (Grunow) Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin, *A. producta* Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin, *Astartiella* sp. AW B362 1015, *Chamaepinnularia* sp.1, *Cocconeopsis breviata* (Hust.) Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin и *C. pullus* (Hust.) Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin.

Представители классов Coscinodiscophyceae и Fragilariophyceae составляют 7.2 и 6.9% общего числа видов диатомовых БД. Доминируют виды из класса Bacillariophyceae (85.8%). Порядок Naviculales наиболее обилен по числу таксонов (9 семейств, 25 родов, 122 вида и ввт). Меньшее разнообразие отмечено у порядков Achnanthales (3 семейства, 6 родов, 44 вида и ввт), Bacillariales (1 семейство, 5 родов, 34 вида и ввт), Thalassiosiphysales (1 семейство, 2 рода, 28 видов и ввт). Наибольшая видовая насыщенность в акватории БД отмечена у родов *Navicula* (41 вид и ввт), *Nitzschia* (29), *Amphora* (25), *Cocconeis* (20), *Diploneis* (16), *Lyrella*, *Fallacia* и *Planothidium* (по 10).

Высокое видовое богатство может являться следствием того, что БД относится к открытому типу и практически не подвержена техногенному загрязнению. Данные по содержанию поллютантов, способных оказывать значительное воздействие на видовое богатство и структуру таксоцены диатомовых бентоса [2], в рыхлых грунтах БД близки к аналитически нулевым значениям (за исключением содержания солей Mn и Zn), что подтверждает экологическую чистоту ранее закрытой для посещения акватории. Помимо этого, исследованный участок дна БД характеризуется разнообразием микробиотопов (глинистые субстраты, песчаный грунт, камни, макрофиты), что может способствовать развитию редких видов, высокочувствительных к загрязнению, а также реликтов понто-каспийской флоры (например, *Navicula petrovii* [17]) и видов-вселенцев (например, *Achnanthidium glyphos* Riaux-Gob., Compère et Witkowski [18], *Fogedia giffeniana* (Foged) Witkowski, Lange-Bert., Metzeltin et Bafana [19], *F. heterovalvata* (Simonsen) Witkowski, Metzeltin et Lange-Bert. [11]). Однако лишь по результатам дополнительных полевых исследований можно утверждать, являются ли видами-вселенцами новые флористические находки (67 видов и ввт) либо большинство их относится к аборигенным формам, не выявленным ранее в Чёрном море.

Сравнение видового состава диатомовых БД и изученных ранее акваторий юго-западного побережья Крыма выявило наибольшее сходство между акваториями БС и ББ (коэффициент Брея–Кёртиса 57.8%), которые характеризуются высокой степенью техногенного загрязнения [3–6], а также между МФ и БД (56.1%), которые относятся к условно чистым биотопам [2]. Наименьшее сходство видового состава таксоцены диатомовых отмечено между БС и МФ (32.3%) и между БС и БД (36.5%).

Разнообразие донных диатомовых БД по сравнению со среднеожидаемым уровнем для диатомовой флоры Чёрного моря оценено с помощью индекса таксономической отличительности AvTD (Δ^+) и его вариабельности VarTD (Λ^+) [9, 12, 13]. Значение индекса Δ^+ диатомовых БД (79.0 ± 1.2) меньше, а его вариабельность Λ^+ (345.9 ± 18.8) выше, чем соответствующие среднеожидаемые значения, рассчитанные для флоры Bacillario-

phyta Чёрного моря ($\Delta^+=82.2$; $\Lambda^+=317.0$). Точка TaxDI находится в пределах бивариантных эллипсов, оконтуривающих границы 95% вероятности 1000-кратного распределения случайных значений Δ^+ и Λ^+ , рассчитанных для разных подмножеств.

Установлено, что иерархическое древо таксоцена диатомовых БД образуют ветви различного видового насыщения, замыкающиеся на разных уровнях иерархии (от вида до порядка), с преобладанием поливидовых ветвей, замыкающихся на общий уровень рода. Следуя алгоритму расчета индекса Δ^+ [9, 12, 13], вклад (или исчезновение) значительного числа новых близкородственных видов оказывает меньшее влияние на архитектуру древа таксоцена (величину индекса TaxDI), чем появление (или элиминация) новых видов с дальней степенью филогенетического родства. Иными словами, чем выше в таксоцене доля близкородственных видов, тем ниже среднее значение индекса Δ^+ по сравнению со среднеожидаемым уровнем для Чёрного моря [2]. Оценка таксономического разнообразия позволяет выявить особенности структуры иерархического древа диатомовых, складывающейся под воздействием естественных и антропогенных факторов среды. В сильно загрязненных биотопах структура таксоценов диатомовых характеризуется пониженным разнообразием и повышенным значением индекса Δ^+ , по сравнению со среднеожидаемым для всего Чёрного моря. В менее загрязненных местообитаниях значения индекса Δ^+ (и структура таксоценов диатомовых) близки к среднеожидаемому, а в малонарушенных – чаще всего превышают.

Заключение: Таксоцен диатомовых в ранее неисследованной малонарушенной акватории БД характеризуется высокими показателями видового богатства и новых для флоры Чёрного моря таксонов. Структуру древа диатомовых БД образуют ветви различного видового насыщения и разной иерархической подчиненности, с преобладанием поливидовых таксонов, замыкающихся на уровень рода. Значения индекса TaxDI в таксоцене БД существенно отличаются от среднеожидаемых значений для всей черноморской флоры диатомовых, что указывает на низкую выровненность и высокую вариабельность структуры таксоцена БД. Выявлено наибольшее флористическое сходство диатомовых БД с акваторией со сходным минимальным уровнем антропогенной нагрузки (МФ) и наименьшее – с сильно загрязненными бухтами Севастополя и Балаклавы.

1. Неврова Е. Л. Оценка разнообразия диатомовых бентоса (Bacillariophyta) у побережья Карадага (Чёрное море, Крым) // *100 лет Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского* : Сборник науч. тр. / Ред. А. В. Гаевская, А. Л. Морозова. Севастополь–Симферополь : Н. Орианда, 2015. С. 462–492.
2. Неврова Е. Л. *Донные диатомовые водоросли (Bacillariophyta) Чёрного моря: разнообразие и структура таксоценов различных биотопов* : автореф. дис. ... докт. биол. наук. Москва. 2015. 25 с.
3. Неврова Е. Л. Таксономическое разнообразие и структура таксоцена бентосных диатомовых в Севастопольской бухте (Чёрное море) // *Мор. экол. журн.* 2013. Т. 3, № 12. С. 55–67.
4. Неврова Е. Л. Эколого-таксономическая оценка донных диатомовых в Балаклавской бухте (Юго-Западный Крым, Чёрное море) // *Альгология*. 2014. Т. 24, № 1. С. 47–66.
5. Петров А. Н., Неврова Е. Л., Малахова Л. В. Многомерный анализ распределения бентосных диатомовых (Bacillariophyta) в поле градиентов абиотических факторов в Севастопольской бухте (Чёрное море, Крым) // *Мор. экол. журн.* 2005. Т. 4, № 3. С. 65–77.
6. Petrov A., Nevrova E., Terletskaia A., Milyukin M., Demchenko V. Structure and taxonomic diversity of benthic diatoms assemblage in a polluted marine environment (Balaklava Bay, Black Sea) // *Polish Bot. J.* 2010. Vol. 55, No 1. P. 183–197.

7. Burgess R. M., Terletskaia A. V., Milyukin M. V. et al. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine // *Mar. Pollut. Bull.* 2009. Vol. 8, No 8. P. 1103–1115.
8. 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. Vol. 62, No 11. P. 2442–2462.
9. Неврова Е. Л., Снигирева А. А., Петров А. Н., Ковалева Г. В. *Руководство по изучению морского микрофитобентоса и его применению для контроля качества среды* / Ред. А. В. Гаевская. Симферополь : Н. Оріанда, 2015. 175 с.
10. Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. *The diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge: Cambridge University press, 1990. 747 pp.
11. Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. *Diatom flora of Marine coast 1. Iconographia Diatomologica*. A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2000. Vol. 7. 926 pp.
12. Warwick R. M., Clarke K. R. Taxonomic distinctness and environmental assessment // *J. Appl. Ecol.* 1998. Vol. 35. P. 532–543.
13. Warwick R. M., Clarke K. R. Practical measures of marine biodiversity based on relatedness of species // *Oceanography and Marine Biology: an annual review*. 2001. Vol. 39. P. 207–231.
14. Clarke K. R., Gorley R. N. *PRIMER : User Manual*. Tutorial. – Plymouth : PRIMER-E Ltd, 2001. Vol. 5. 92 pp.
15. Nevrova E., Witkowski A., Kulikovskiy M., Lange-Bertalot H., Kociolek J.-P. A revision of the diatom genus *Lyrella* Karayeva (Bacillariophyta: Lyrellaceae) from the Black Sea, with descriptions of five new species // *Phytotaxa*. 2013. Vol. 83, No 1. P. 1–38.
16. 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. Vol. 143, No 3. P. 307–317.
17. Witkowski A., Nevrova E., Lange-Bertalot H., Kociolek J. P. *Navicula petrovii* sp. nov. (Bacillariophyceae), a naviculoid diatom with amphoroid symmetry and its relationship to *Navicula* sensu stricto and other naviculoid genera // *Nova Hedwigia*. 2014. Beih. 143. P. 469–484.
18. Riaux-Gobin C., Witkowski A., Compère P. SEM survey and taxonomic position of small-sized *Achnanthes* (Bacillariophyceae) from coral sand of Réunion Island (Western Indian Ocean) // *Vie Milieu / Life & Environ.* 2010. Vol. 60, No 2. P. 157–172.
19. Witkowski A., Metzeltin D., Lange-Bertalot H., Bafana G. *Fogedia* gen. nov. (Bacillariophyceae), a new naviculoid genus from marine littoral // *Nova Hedwigia*. 1997. Vol. 65, No 1–4. P. 79–98.

ASSESSMENT OF TAXONOMICAL DIVERSITY OF BENTHIC DIATOMS (BACILLARIOPHYTA) AT DVUJAKORNAYA BAY (CRIMEA, THE BLACK SEA)

E. L. Nevrova, A. N. Petrov

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research, RAS, Sevastopol, RF, el_nevrova@mail.ru

Analysis of benthic diatoms diversity at uninvestigated before pristine water area Dvujakornaja Bay (BD) (South-Eastern Crimea) revealed 304 species and intraspecific taxa, belonging to 299 species, 78 genera, 37 families, 20 orders and 3 classes of Bacillariophyta. The hierarchical structure of diatom taxocene, estimated by using of taxonomical distinctness indices TaxDI, characterizes as well having low evenness as high variability. The value of taxonomic distinctness indices Δ^+ for BD (79.01 ± 1.2) is lower and the value of variability Λ^+ (345.96) is higher significantly than the average values of TaxDI, that were calculated for the Black Sea diatom flora. Hierarchical tree of BD diatom taxocene was shaped by the branches with various species saturation and subordination, where polyspecies taxa closing on genus level are dominated.

Keywords: Bacillariophyta, diatoms, taxocene, indices TaxDI, Black Sea