



DOI 10.23859/estr-220927

EDN ZFXKDL

УДК 582.261.1:574.64 (262.5)

Научная статья

Анализ разнообразия бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) в районе ООПТ мыс Сарыч и других акваториях Крыма (Черное море)

Е.Л. Неврова 

Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН", 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2

el_nevrova@mail.ru

Аннотация. С помощью индекса TaxDI проанализирована структура таксоценов диатомовых акватории ООПТ «Прибрежный аквальный комплекс у м. Сарыч» и ранее изученных районов Крыма (условно чистые м. Фиолент, п. Новый Свет, б. Двукорная и сильно загрязненные б. Балклавская, б. Карантинная, б. Инкерман, б. Севастопольская). У м. Сарыч выявлены 82 вида и внутривидовых таксона диатомовых, принадлежащих к 35 родам, 25 семействам, 15 порядкам, 3 классам Bacillariophyta, среди которых 18 видов, новых для флоры Черного моря. Структура таксоценов диатомовых чистых акваторий сформирована ветвями разной иерархии с доминированием поливидовых таксонов, замыкающихся на уровне рода. Таксоцены диатомовых загрязненных акваторий характеризуются высокой долей моно- и олиговидовых ветвей, замыкающихся на уровнях семейства или порядка, что приводит к снижению таксономического разнообразия, повышению выравненности и уменьшению вариабельности их иерархической структуры. Воздействие техногенных поллютантов вызывает трансформацию первичного звена экосистемы морской сублиторали, выраженную в редуцировании структуры таксоценов диатомовых и исчезновении низкорезистентных видов.

Ключевые слова: индекс таксономической отличительности, TaxDI, AvTD, VarTD, иерархическое разнообразие, структура таксоценов, побережье Крыма

Финансирование. Работа осуществлена по теме № 121030100028-0 Госзадания ФИЦ ИнБЮМ.

Благодарности. Автор благодарит к.б.н. А.Н. Петрова (ФИЦ ИнБЮМ) за помощь при отборе бентосных проб и расчетах индексов TaxDI, ведущего инженера В.Н. Лишаева (ФИЦ ИнБЮМ) за микрофотосъемки на СЭМ, профессора А. Витковски (Щецинский университет, г. Щецин, Польша) за оборудование для микрофотосъемки на СМ и консультации при идентификации, профессора Х. Ланге-Берталот и инженер-магистра М. Руппель (университет г. Франкфурт-на-Майне, Германия) за микрофотосъемки на СЭМ и консультации по таксономии Bacillariophyta.

ORCID:

Е.Л. Неврова, <https://orcid.org/0000-0001-9963-4967>

Для цитирования: Неврова, Е.Л., 2023. Анализ разнообразия бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) в районе ООПТ мыс Сарыч и других акваториях Крыма (Черное море). *Трансформация экосистем* 6 (5), 43–64. <https://doi.org/10.23859/estr-220927>

Поступила в редакцию: 27.09.2022

Принята к печати: 21.10.2022

Опубликована онлайн: 08.12.2023

DOI 10.23859/estr-220927

EDN ZFXKDL

UDC 582.261.1:574.64 (262.5)

Article

Comparison of benthic diatoms diversity (Bacillariophyta) in the Special Protected Area Cape Sarych and other water areas of the Crimea (the Black Sea)

Elena L. Nevrova 

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, pr. Nakhimova 2, Sevastopol, 299011 Russia

el_nevrova@mail.ru

Abstract. The structure of diatom taxocenes in the Special Protected Area “Coastal Aquatic Complex Cape Sarych” and the previously studied areas of the Crimea (conditionally clean Cape Fiolent, Novy Svet settl., Bay Dvuyakornaya and heavily polluted bays Balaklavskaya, Karantinnaya, Inkerman, and Sevastopolskaya) were analyzed with the use of the index TaxDI. At Cape Sarych, we identified 82 species and intraspecific taxa of diatoms belonging to 35 genera, 25 families, 15 orders, 3 classes of Bacillariophyta, among which 18 species were new to the flora of the Black Sea. The structure of diatom taxocenes in pristine water areas was formed by branches of different hierarchy and predominance of close at the genus level polyspecies taxa. Diatom taxocenes of polluted waters were characterized by a high proportion of mono- and oligospecies branches closing at the family or order levels that brought to reduced diatom taxonomic diversity, increased evenness and decreased variability of their hierarchical structure. The impact of technogenic pollutants caused a transformation of the primary link of the marine sublittoral ecosystem which is expressed in the reduced structure of diatom taxocenes and disappearance of diatom species with low resistance to negative factors.

Keywords: taxonomic distinctness index, TaxDI, AvTD, VarTD, hierarchical diversity, taxocene structure, Crimean coast

Funding. The study was carried out as a part of State Task of the FRC IBSS (registration No. 121030100028-0).

Acknowledgements. The author would thank Petrov A.N (PhD) for assistance in collecting benthic samples and calculating TaxDI indices; Lishaev V.N., a leading engineer (FRC IBSS) for SEM microphotography; Professor A. Witkowski (University of Szczecin, Szczecin, Poland) for sharing the equipment for LM microphotography and consultations on identification; Professor H. Lange-Bertalot and master engineer M. Ruppel (University Frankfurt am Main, Germany) for SEM microphotographs and consultations on Bacillariophyta taxonomy.

ORCID:E.L. Nevrova, <https://orcid.org/0000-0001-9963-4967>

To cite this article: Nevrova, E.L., 2023. Comparison of benthic diatoms diversity (Bacillariophyta) in the Special Protected Area Cape Sarych and other water areas of the Crimea (the Black Sea). *Ecosystem Transformation* 6 (5), 43–64. <https://doi.org/10.23859/estr-220927>

Received: 27.09.2022

Accepted: 21.10.2022

Published online: 08.12.2023

Введение

Концепция организации особо охраняемых природных территорий (ООПТ) в Российской Федерации охватывает включение новых объектов для их сохранения, наряду с расширением уже существующих заповедных территорий. В программе «Оценка необходимости сохранения биоразнообразия в Крыму» среди пятнадцати районов, которым присвоена категория наивысшей приоритетности охраны, указан участок «м. Айя – м. Сарыч» (юго-западное побережье Крыма) (Выработка приоритетов..., 1999). Памятник природы «Прибрежный аквальный комплекс у м. Сарыч» создан в 1972 г., его границы утверждены в 2005 г., статус ООПТ регионального значения подтвержден Постановлением Правительства г. Севастополь в 2015 г. (Милячакова и др., 2015).

Гидрологический памятник природы у м. Сарыч отличается обилием уникальных местообитаний различных групп гидробионтов, в связи с чем имеет высокую природоохранную ценность. Первоочередными задачами по сохранению биоразнообразия аквального комплекса м. Сарыч являются усиленный контроль состояния прибрежной экосистемы, паспортизация и оценка биоразнообразия всех ее звеньев.

Ключевым звеном в функционировании прибрежных экосистем Черного моря являются бентосные диатомовые водоросли (Bacillariophyta). Характеристика их видового богатства необходима для определения приоритетности сбережения видов, а также решения задач мониторинга и биоиндикации состояния морской среды (Неврова, 2022; Blanco et al., 2012; Borja et al., 2013; Keck et al., 2016; Stenger-Kovács et al., 2014; Tokatli et al., 2020). В гидроэкологических исследованиях черноморского шельфа изучение разнообразия донных диатомовых приобретает особое значение вследствие интенсивного антропогенного загрязнения прибрежных акваторий, вызывающего трансформирование структуры таксоценов и изменения видового и таксономического богатства Bacillariophyta (Неврова и др., 2015; Петров и Неврова, 2004; Петров и др., 2005; Petrov and Nevrova, 2007). Для выявления различных аспектов биоразнообразия и разработки рекомендаций по сохранению Bacillariophyta необходим комплексный анализ и обобщение результатов, полученных как на основе традиционных флористических исследований, так и с помощью современных формализованных методов. Значимой, но недостаточно разработанной проблемой является сравнительный анализ показателей видовой структуры и таксономического разнообразия таксоценов диатомовых в экологически гетерогенных биотопах (Heino et al., 2007; Petrov and Nevrova, 2007, 2014; Petrov et al., 2010; Stenger-Kovács et al., 2014).

Данная работа сфокусирована на анализе видового состава бентосных диатомовых в прежде неисследованном малонарушенном биотопе аквального комплекса ООПТ регионального значения м. Сарыч г. Севастополя и сравнении особенностей таксономического разнообразия с ранее изученными районами побережья Крыма, находящимися под антропогенным воздействием различной степени. С этой целью проведена количественная оценка структуры таксоценов Bacillariophyta в акваториях м. Сарыч и сопоставляемых биотопах с помощью индекса таксономической отличительности TaxDI (Warwick and Clarke, 1998, 2001) и выявлены причины обнаруженных различий, оказывающие влияние на процессы изменения разнообразия донных Bacillariophyta.

Материалы и методы

М. Сарыч является самой южной географической точкой п-ова Крым и расположен между б. Ласпи и пос. Форос (Рис. 1). Скалистое побережье образовано глыбами твердого мраморизованного известняка. Дно представлено скальными валунами, покрытыми макрофитами, изредка встречаются прогалины гальки, мелкого гравия и крупного песка.

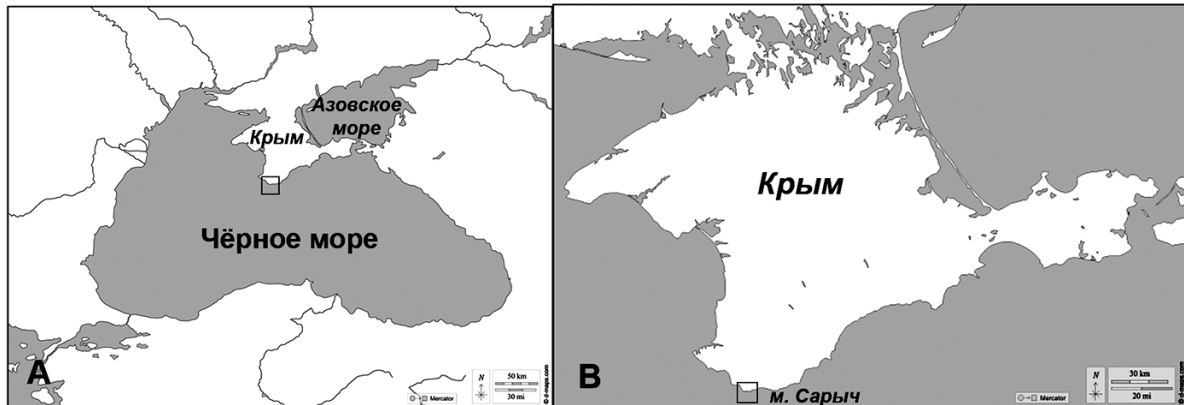


Рис. 1. Карта района работ в акватории ООПТ м. Сарыч (южное побережье Крыма, Черное море). **А** – п-ов Крым; **В** – расположение полигона исследований.

Биоматериал для изучения донных диатомовых собран на 4 станциях в акватории ООПТ регионального значения г. Севастополя «Мыс Сарыч» (N 44.38728°, E 33.73833°) в августе 2007 г. С помощью мейобентосной трубки ($S = 15.9 \text{ cm}^2$) на глубине от 3 до 5 м отобрано 8 проб (по 2 на каждой станции) рыхлого грунта, состоящего из мелкого щебня и крупного песка. Пробы взяты из верхнего (2–3 см) слоя донных отложений, далее обработаны ультразвуком для более полного отделения эпипелона и эпипсаммона. Створки диатомовых очищены методом сжигания в кислотах (Диатомовые водоросли СССР, 1974), заключены в среду Naphrax® и исследованы при помощи светового микроскопа (СМ) Nikon Eclipse E600 с объективом PlanAPO 100×145 и цифровой камеры Nikon DS-Fi1, Япония (Институт морских наук при Университете г. Щецина, Польша), а также с использованием сканирующих электронных микроскопов (СЭМ) Hitachi S4500, Япония (Университет Гете, г. Франкфурт-на-Майне, Германия) и Hitachi SU3500, Япония (ФИЦ ИнБЮМ). Измерение створок диатомовых проведено в программе ImageJ v 1.53e (<https://imagej.nih.gov/ij/>). Классификация Bacillariophyta основана на системе Ф.Е. Раунда и др. (Round et al., 1990) с дальнейшими разработками ряда авторов (Гусяков и др., 1992; Catalogue of Diatom Names¹; Guiry and Guiry, 2003; Levkov, 2009, Witkowski et al., 2000 и др.). Номенклатурные наименования таксонов приведены по International Plant Names Index². Карта района работ создана на базе сайта d-maps (<https://d-maps.com>) и отредактирована в программе Adobe Photoshop® v 21.2.10.

Сравнительная оценка таксономического разнообразия таксоценов диатомовых акваторий м. Сарыч и других ранее исследованных районов черноморского побережья Крыма проведена с помощью программы PRIMER v6 (Clarke and Gorley, 2006) на основе индексов таксономической отличительности (TaxDI). Алгоритм расчетов индекса средней таксономической отличительности AvTD (Δ^+) и его вариабельности VarTD (Λ^+) изложен в работах Е.Л. Невровой (2022) и Р.М. Варвик и К.Р. Кларк (Warwick and Clarke, 1998, 2001).

Результаты и обсуждение

Исследования видового богатства донных диатомовых в районе ООПТ м. Сарыч проведены впервые, и полученные результаты должны инициировать их продолжение. Отметим, что в соответствии с ранее проведенной нами прогностической оценкой таксономического состава Bacillariophyta в прибрежных районах Крыма при рассмотрении любой одной станции на полигоне может быть выявлено 35% общего видового состава, при анализе любых четырех станций – около 70%. Статистически подтверждена высокая достоверность различий между видовым составом диатомовых бентоса на соседних станциях полигона (Petrov and Nevrova, 2013, 2014). В связи с вышеизложенным, в результате анализа 8 станций в районе ООПТ м.Сарыч могло быть выявлено свыше 80% общего видового состава диатомовых бентоса.

¹ Catalogue of Diatom Names. California Academy of Sciences, USA. Интернет-ресурс. URL: <http://researcharchive.calacademy.org/research/diatoms/names/index.asp> (дата обращения: 10.09.2022).

² International Plant Names Index. Интернет-ресурс. URL: <http://www.ipni.org> (дата обращения: 10.09.2022).

В результате исследований в границах ООПТ м. Сарыч на рыхлых грунтах обнаружено 82 вида и внутривидовых таксона (ввт) донных диатомовых, принадлежащих к 35 родам, 25 семействам, 15 порядкам, 3 классам отдела Bacillariophyta (Табл. 1). В списке отмечено 18 видов, новых для флоры диатомовых Черного моря, а также 1 вид, описанный ранее в прибрежье Крыма как новый для науки (Witkowski et al., 2010). Некоторые таксоны не идентифицированы до видового уровня, однако включены в общий список для последующего анализа, поскольку морфологически отличаются от известных и задокументированы микрофотографиями. Описание новых видов пока не может быть выполнено вследствие недостаточного объема биоматериала из различных черноморских популяций диатомовых.

Значительное богатство видов донных диатомовых, обнаруженное в акватории ООПТ м. Сарыч, подтверждает его высокую категорию приоритетности сохранения биоразнообразия гидробионтов. Поскольку заповедная акватория м. Сарыч удалена от источников различных техногенных загрязнений, при дальнейшем изучении южного побережья Крыма прогнозируется пополнение списка Bacillariophyta данного района, обнаружение флористических находок и описание новых для науки таксонов. Массовые, редкие, новые для флоры Черного моря и неидентифицированные виды, обнаруженные у м. Сарыч, представлены на Рис. 2–7.

Усиливающееся антропогенное воздействие на шельфовую зону Крыма вызывает значительное уменьшение видового богатства диатомовых бентоса и, как следствие, трансформацию экосистемы морской сублиторали в целом, поэтому одной из важнейших задач сохранения альгофлоры Черного моря является оценка разнообразия бентосных Bacillariophyta с целью разработки мер по его сбережению. Насыщенная структура таксоценов донных диатомовых и значительное видовое богатство в условно чистых акваториях в случае их контаминации могут быстро редуцироваться по причине исчезновения многих низкорезистентных видов и их замещения немногими видами, толерантными к воздействию поллютантов. Оценка структуры таксоценов диатомовых бентоса в условно чистых прибрежных местообитаниях и техногенно загрязненных биотопах позволяет выявить аспекты биоразнообразия в различных условиях среды (Неврова, 2022; Facca and Sfriso, 2007; Izsak et al., 2002; Leira et al., 2009; Stenger-Kovács et al., 2016).

Публикации по донным диатомовым в Черном море в основном посвящены выявлению видового состава и установлению трендов сезонных изменений видов-доминантов на твердых есте-

Табл. 1. Представленность диатомовых бентоса у побережья м. Сарыч. * – виды, новые для диатомовой флоры Черного моря; ** – виды, описанные нами ранее как новые для науки, *** – редкие виды.

| Таксон | Виды |
|--|--|
| Класс Coscinodiscophyceae Порядки: 2 Семейства: 3 Роды: 4 Виды: 5 | <i>Cyclotella operculata</i> (C. Agardh) Kütz. <i>Pantocsekiella ocellata</i> (Pant.) K.T. Kiss & Ács <i>Thalassiosira eccentrica</i> (Ehrenb.) Cleve, <i>T. parva</i> Proshk.-Lavr. <i>Triceratium antediluvianum</i> (Ehrenb.) Grunow*** |
| Класс Fragilariophyceae Порядки: 5 Семейства: 5 Роды: 7 Виды: 7 | <i>Ardissonea baculus</i> (W. Greg.) Grunow <i>Grammatophora marina</i> (Lyngb.) Kütz. <i>Licmophora gracilis</i> (Ehrenb.) Grunow <i>Microtabella delicatula</i> (Kütz.) Round <i>Opephora marina</i> (W. Greg.) P. Petit <i>Tabularia tabulata</i> (C. Agardh) P.J.M. Snoeijis <i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschk. |

| Таксон | Виды |
|---|---|
| | <i>Achnanthes brevipes</i> var. <i>intermedia</i> (Kütz.) Cleve |
| | <i>Achnanthidium minutissimum</i> (Kütz.) Czarn.*** |
| | <i>Amphora exilitata</i> Giffen*, <i>A. helenensis</i> Giffen*, <i>A. pediculus</i> (Kütz.) Grunow, <i>A. proteus</i> W. Greg., <i>Amphora</i> sp. S1 |
| | <i>Bacillaria paxillifera</i> (O.F. Müll.) T. Marsson |
| | <i>Berkeleya scopulorum</i> (Bréb.) E.J. Cox |
| | <i>Caloneis densestriata</i> (Proshk.-Lavr.) Gusl., <i>C. liber</i> (W. Sm.) Cleve, <i>Caloneis</i> sp. 3 |
| | <i>Campylodiscus thuretii</i> Bréb. |
| | <i>Cocconeis britannica</i> Naegeli*, <i>C. diminuta</i> Pant.* , <i>C. costata</i> W. Greg., <i>C. euglypta</i> Ehrenb., <i>C. pediculus</i> Ehrenb., <i>C. placentula</i> Ehrenb., <i>C. pseudocostata</i> O.E. Romero*, <i>C. scutellum</i> Ehrenb., <i>C. scutellum</i> var. <i>parva</i> (Grunow) Cleve, <i>Cocconeis</i> sp. G2, <i>Cocconeis</i> sp. 5W |
| | <i>Diploneis chersonensis</i> (Grunow) Cleve***, <i>D. smithii</i> (Bréb. ex W. Sm.) Cleve, <i>D. vacillans</i> (A.W.F. Schmidt) Cleve, <i>Diploneis</i> sp. 5 |
| | <i>Encyonopsis microcephala</i> (Grunow) Krammer* |
| | <i>Fallacia pulchella</i> Sabbe et Muylaert*, <i>Fallacia</i> sp. 10S |
| | <i>Halamphora angularis</i> (W. Greg.) Levkov, <i>H. coffeaeformis</i> (C. Agardh) Levkov, <i>H. cf. exigua</i> (W. Greg.) Levkov, <i>H. subacutiuscula</i> (Schoemann) Levkov***, <i>H. tenerrima</i> (Aleem et Hust.) Levkov* |
| Класс Bacillariophyceae Порядки: 8 Семейства: 17 Роды: 24 Виды: 69 Виды и ввт: 70 | <i>Haslea subagnita</i> (Proshk.-Lavr.) I.V. Makarova et Karayeva, <i>H. cf. howeana</i> (Hagelstein) Giffen* |
| | <i>Hippodonta</i> sp. 7 |
| | <i>Mastogloia cuneata</i> (Meister) Simonsen* |
| | <i>Navicula</i> cf. <i>duerrenbergiana</i> Hust., <i>N. cf. phylleptosoma</i> Lange-Bert.* , <i>N. hamiltonii</i> Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin* , <i>N. palpebrulum</i> Cholnoky* , <i>N. parapontica</i> Witkowski, Kulikovskiy, Nevrova et Lange-Bert.** , <i>N. perminuta</i> Grunow ex Van Heurck, <i>N. ramosissima</i> (C. Agardh) Cleve, <i>N. salinicola</i> Hust., <i>N. viminoides</i> var. <i>cosmomarina</i> Lange-Bert.* , Witkowski, Bogaczewicz-Adamchak et Zgrundo* , <i>Navicula</i> sp. B1 |
| | <i>Nitzschia aequorea</i> Hust.* , <i>N. agnita</i> Hust.* , <i>N. angularis</i> var. <i>affinis</i> (Grunow) Grunow, <i>N. capitellata</i> Hust.***, <i>N. coarctata</i> Grunow, <i>N. cf. coarctata</i> Grunow, <i>N. dissipata</i> (Kütz.) Grunow, <i>N. fonticola</i> Grunow, <i>N. frustulum</i> (Kütz.) Grunow, <i>N. inconspicua</i> Grunow, <i>N. perindistincta</i> Cholnoky* |
| | <i>Parlibellus hendeyi</i> Witkowski, Lange-Bert. et Metzeltin* |
| | <i>Plagiotropis lepidoptera</i> (W. Greg.) Kuntze |
| | <i>Planothidium</i> cf.1 <i>delicatum</i> (Kütz.) Round et Bukht., <i>P. cf. delicatum</i> (Kütz.) Round et Bukht., <i>Planothidium</i> sp. 3F |
| | <i>Pleurosigma rigidum</i> W. Sm. |
| | <i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (C. Agardh) Lange-Bert. |
| <i>Seminavis</i> sp. 2 | |
| <i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenb.) Cleve | |

ственных и искусственных субстратах. Менее исследованы таксоцены диатомовых на рыхлых грунтах; кроме того, почти совсем не разработана проблема оценки разнообразия Bacillariophyta. В публикациях чаще всего представлены списки обнаруженных видов диатомовых и отсутствуют количественные показатели плотности поселения или биомассы, в связи с чем для измерения биоразнообразия становится невозможным применение традиционных индексов (Шеннона, Маргалефа, Пиелу и др.). Аналогичная ситуация возникает и в случаях, когда характер биотопов или количество отобранных проб значительно отличаются, либо сопоставляются таксоцены со сходными параметрами видового богатства (Неврова, 2022; Warwick and Clarke, 1998, 2001). Упомянутые таксоцены могут включать виды как филогенетически близкие (принадлежащие к одному роду), так и далекие (относящиеся к разным семействам, порядкам и классам). В этом случае таксономические аспекты разнообразия различны, даже если сравниваются два таксоцена с одинаковым богатством видов. Существующие прежде классификации Bacillariophyta целиком опирались на морфологию панцирей диатомовых; лишь в последнее время стали учитываться результаты исследований филогенетики и полового воспроизведения. Очевидно, что таксоцен, состоящий из близкородственных видов, менее таксономически разнообразен, чем таксоцен, насчитывающий такое же количество видов, но принадлежащих к различным таксономическим уровням (Warwick and Clarke, 1998, 2001).

Количественная оценка таксономической структуры сообществ отличается от традиционных индексов разнообразия тем, что основана на иерархических связях. Индекс TaxDI используется для оценки таксономического разнообразия различных групп животных (Arvanitidis et al., 2005; Campbell et al., 2007; Ceschia et al., 2007; Ellingsen et al., 2005; Heino et al., 2007; Leonard et al., 2006; Mouliliott et al., 2005; Munari et al., 2009; Warwick et al., 2002) и растительных (Leira et al., 2009; Izsak et al., 2002; Yang et al., 2016) гидробионтов пресноводных водоемов и Мирового океана, но для оценки таксономического разнообразия морских бентосных диатомовых пока применен только нами (Неврова, 2013а, б, 2014, 2015, 2016, 2022; Неврова и др., 2015; Nevrova and Petrov, 2019b; Petrov et al., 2010).

Мы проанализировали разнообразие таксоценов бентосных диатомовых в прибрежных местообитаниях Крыма с различным уровнем антропогенной нарушенности и разными показателями видового богатства Bacillariophyta. К категории условно чистых акваторий отнесены ООПТ м. Сарыч (82 вида и ввт диатомовых), м. Фиолент (290), пос. Новый Свет (93) и б. Двужкорная (304), а к группе сильно загрязненных акваторий принадлежат б. Севастопольская (186), б. Карантинная (135), б. Балаклавская (191) и полигон Инкерман (116). Средние концентрации солей тяжелых металлов и 3 классов органических поллютантов в рыхлых грунтах акваторий побережья Крыма приведены ранее (Неврова, 2015).

Максимальное сходство видового богатства диатомовых выявлено при попарном сравнении таксоценов в наиболее техногенно загрязненных бухтах: Карантинная – Севастопольская (коэффициент сходства Брея-Куртиса = 64.8), Балаклавская – Севастопольская (57.8) и Балаклавская – Карантинная (54.0). Очевидно, что данный результат обусловлен редуцированием структуры таксоценов диатомовых в антропогенно нарушенных биотопах. Высокий уровень сходства отмечен также и между таксоценами Bacillariophyta условно чистых районов: б. Двужкорная – м. Фиолент (55.9), м. Сарыч – пос. Новый Свет (39.01). Наименьшее сходство выявлено между таксоценами диатомовых акватории м. Сарыч – б. Карантинная (28.7), м. Сарыч – б. Инкерман (27.4) и м. Сарыч – б. Севастопольская (20.2). Оценка видового разнообразия донных диатомовых в изученных местообитаниях с помощью традиционных индексов Маргалефа и Шеннона дает малоинформативные результаты. Выявленные максимальные значения этих индексов для б. Двужкорная и м. Фиолент и минимальные – для м. Сарыч и побережья пос. Новый Свет обусловлены соответствующими максимальным и минимальным количеством обнаруженных видов в указанных акваториях (Табл. 2).

Полученные результаты не позволяют оценить реальную картину разнообразия диатомовых и выяснить причины, оказывающие влияние на его формирование. В связи с этим мы проанализировали таксономическое разнообразие диатомовых в упомянутых акваториях с помощью индекса TaxDI: индекс средней таксономической отличительности ($AvTD, \Delta^+$) и ее вариабельность ($VarTD, \Lambda^+$) (Неврова, 2013а, б, 2014, 2015, 2016, 2022; Nevrova and Petrov, 2019а, б; Warwick and Clarke, 1998, 2001) (Табл. 2). Общий список бентосных Bacillariophyta Черного моря (1100 видов и ввт) агрегирован по 7 иерархическим уровням (от ввт до отдела) и использован для построения бивариантных эллипсов, границы которых соответствуют 95% вероятностным контурам облака

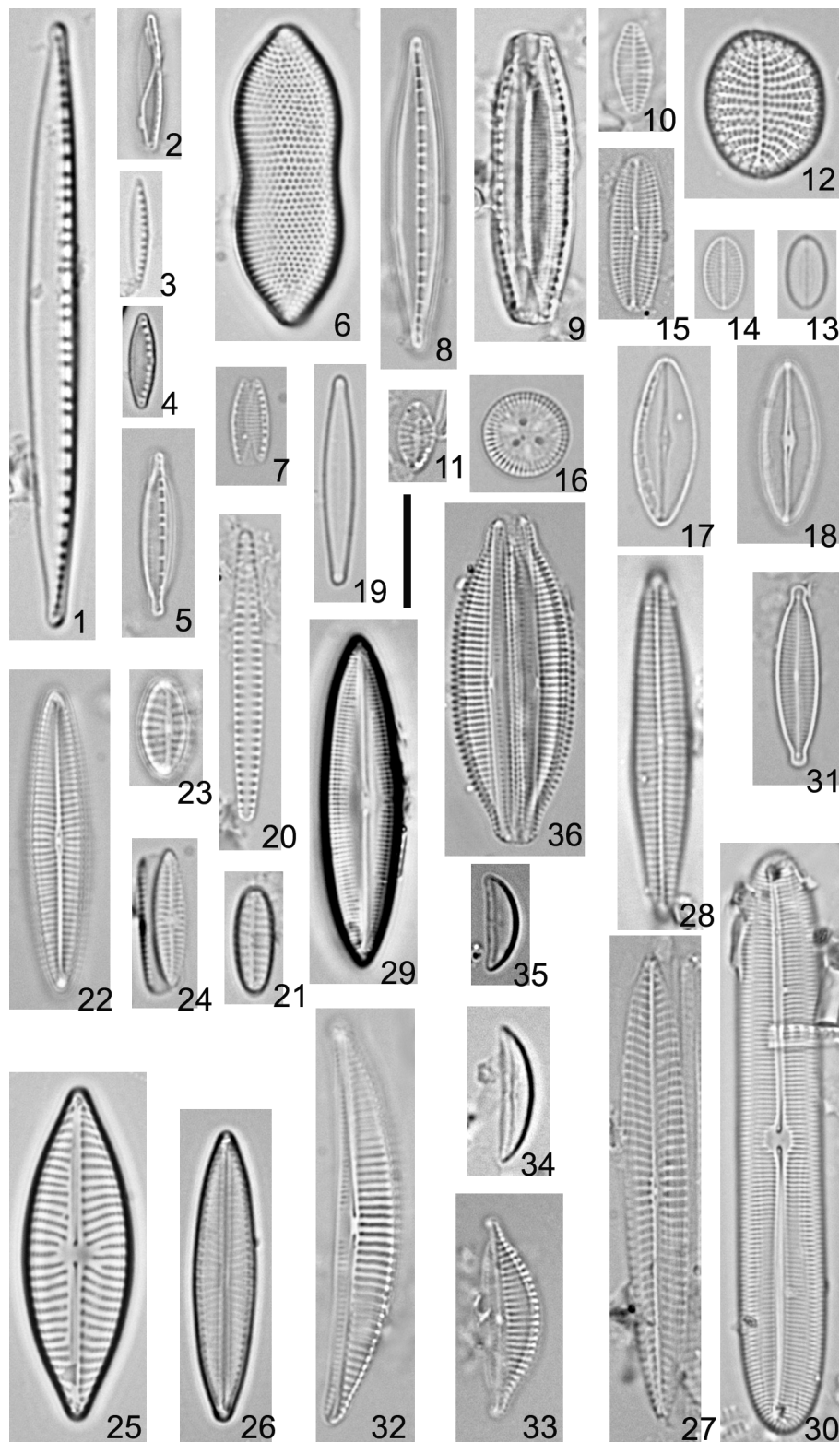


Рис. 2. Бентосные диатомовые водоросли, обнаруженные у м. Сарыч (СМ): 1 – *Nitzschia capitellata*; 2 – *N. aequorea*; 3 – *N. inconspicua*; 4 – *N. perindistincta*; 5 – *N. dissipata*; 6 – *Nitzschia* cf. *coarctata*; 7 – *N. frustulum*; 8 – *N. angularis* var. *affinis*; 9 – *N. fonticola*; 10 – *Planothidium* cf. *delicatulum*; 11 – *Planothidium* cf. 1 *delicatulum*; 12 – *Cocconeis britannica*; 13, 14 – *Cocconeis* sp. 5W (шовная и бесшовная створки); 15 – *Fallacia* sp. 10S; 16 – *Pantocsekiella ocellata*; 17, 18 – *Mastogloia cuneata* (различный фокус); 19 – *Hyalosira delicatula*; 20 – *Opephora marina*; 21 – *Hippodonta* sp. 7; 22 – *Navicula parapontica*; 23 – *N. viminoides* var. *cosmomarina*; 24 – *N. salinicola*; 25 – *Navicula* cf. *phylleptosoma*; 26 – *Haslea subagnita*; 27 – *Haslea* cf. *howeana*; 28 – *Navicula duerrenbergiana*; 29 – *Caloneis densestriata*; 30 – *C. liber*; 31 – *Encyonopsis microcephala*; 32 – *Halamphora* cf. *exigua*; 33 – *Halamphora subacutuscula*; 34 – *Amphora helenensis*; 35 – *A. exilitata*; 36 – *Halamphora angularis*. Шкала 10 мкм.

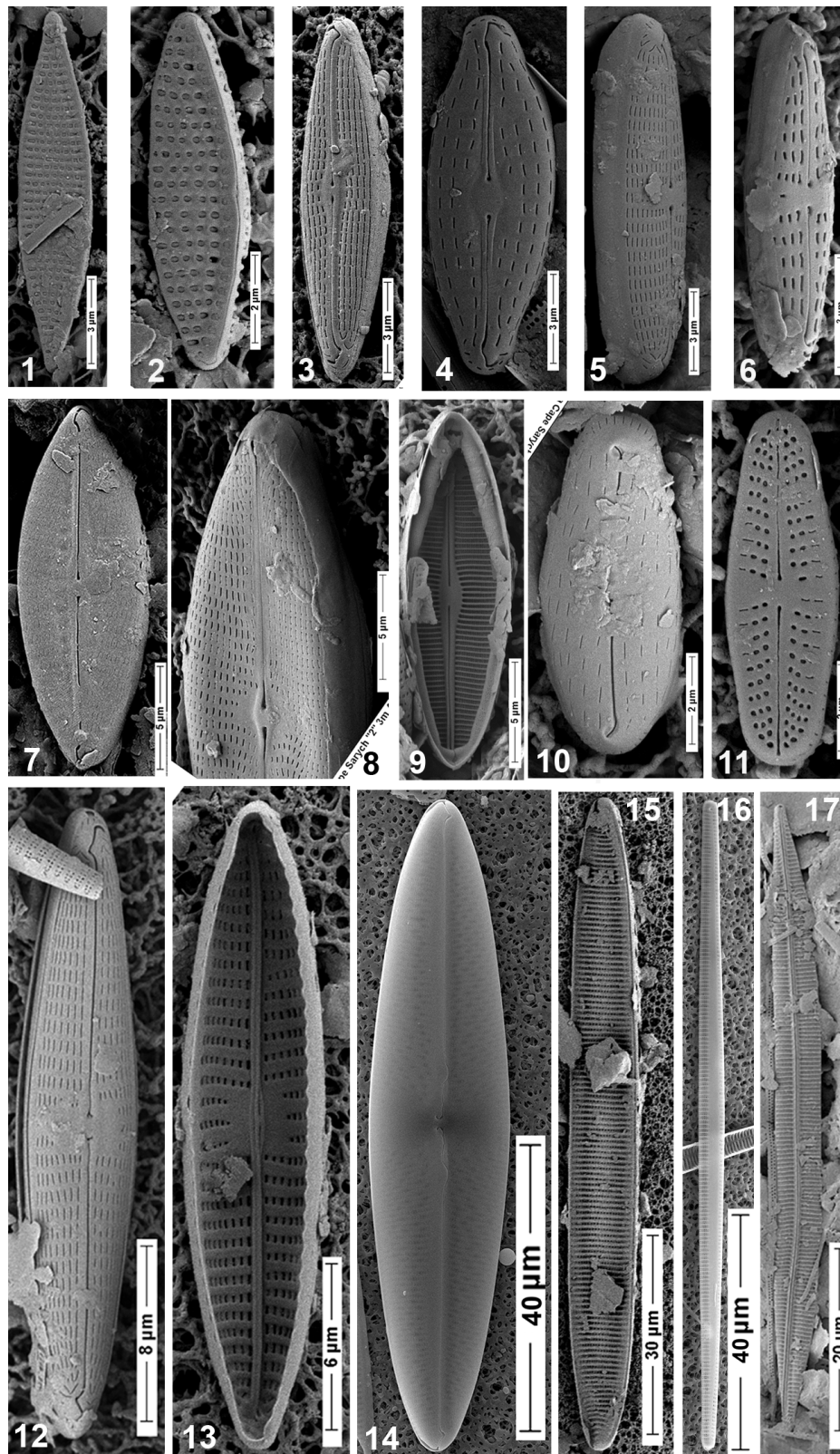


Рис. 3. Бентосные диатомовые водоросли, обнаруженные у м. Сарыч (СЭМ): 1 – *Nitzschia aequorea*; 2 – *Nitzschia frustulum*; 3 – *Navicula salinicola*; 4 – *Navicula viminoides* var. *cosmomarina*; 5 – *Navicula* sp. B1; 6 – *Navicula perminuta*; 7 – *Navicula palpebrulum*; 8 – *Navicula hamiltonii*; 9 – *Mastogloia cuneata* (вид изнутри); 10 – *Hippodonta* sp. 7; 11 – *Achnantheidium minutissimum*; 12, 13 – *Navicula parapontica* (соответственно вид снаружи и изнутри); 14 – *Trachyneis aspera*; 15 – *Ardissonea baculus*; 16 – *Tabularia tabulata*; 17 – *Bacillaria paxillifera*. Размерная шкала: 1, 3, 4, 5, 6 – 3 мкм; 2, 10, 11 – 2 мкм; 7, 8, 9 – 5 мкм; 12 – 8 мкм; 13 – 6 мкм; 14, 16 – 40 мкм; 15 – 30 мкм; 17 – 20 мкм.

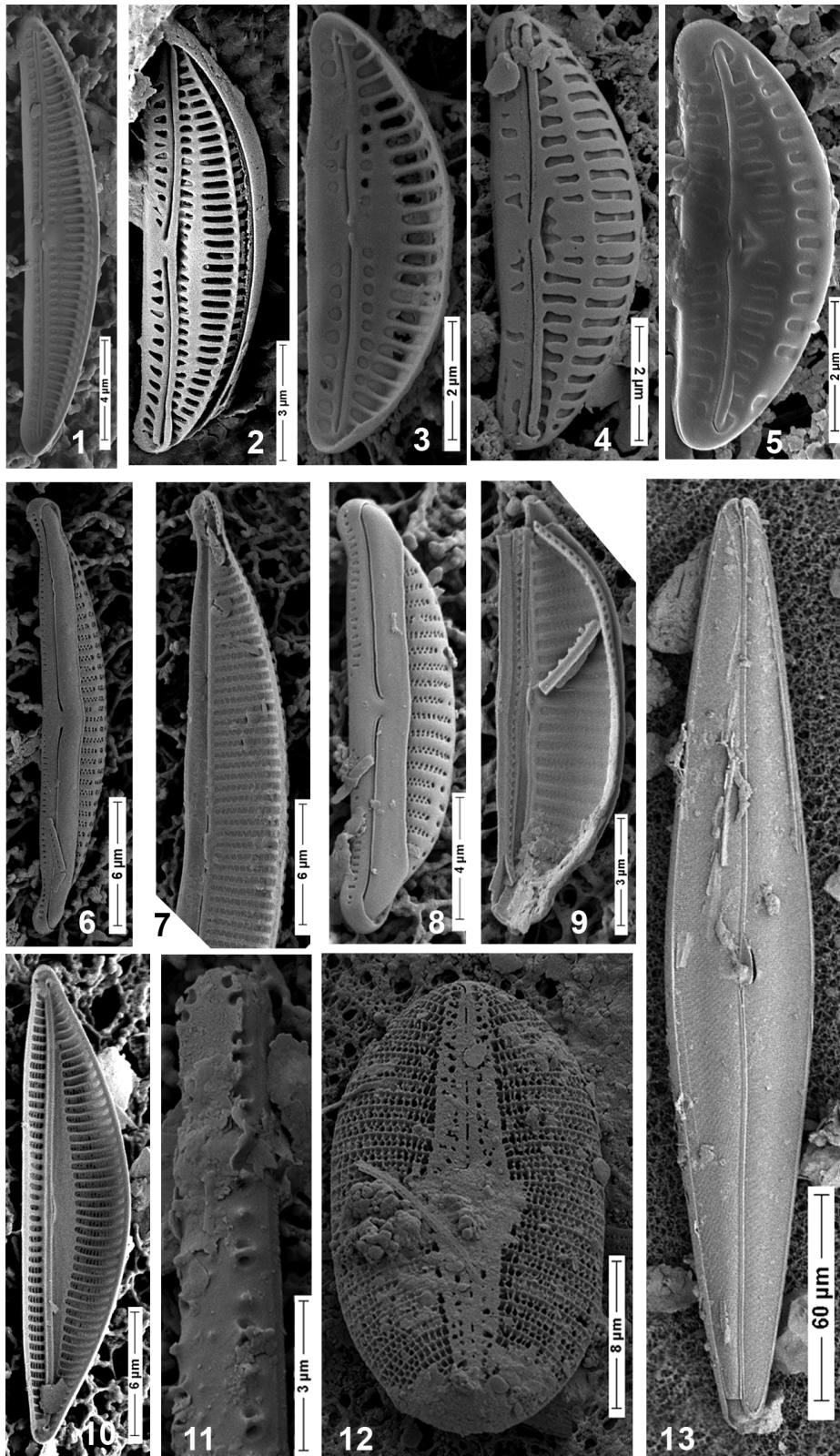


Рис. 4. Бентосные диатомовые водоросли, обнаруженные у м. Сарыч (СЭМ): 1 – *Amphora* sp. S1 (вид изнутри); 2, 3 – *Amphora helenensis* (соответственно вид снаружи и изнутри); 4, 5 – *Amphora exilitata* (соответственно вид снаружи и изнутри); 6, 7 – *Halamphora coffeaeformis* (соответственно вид снаружи и изнутри); 8, 9 – *Halamphora tenerrima* (соответственно вид снаружи и изнутри); 10 – *Seminavis* sp. 2 (вид изнутри); 11 – *Thalassionema pseudonitzschioides*; 12 – *Diploneis smithii*; 13 – *Pleurosigma rigidum*. Размерная шкала: 1 – 4 мкм; 2, 9, 11 – 3 мкм; 3, 4, 5 – 2 мкм; 6, 7, 10 – 6 мкм; 8 – 4 мкм; 6 – 8 мкм; 9, 10 – 6 мкм; 13 – 60 мкм.

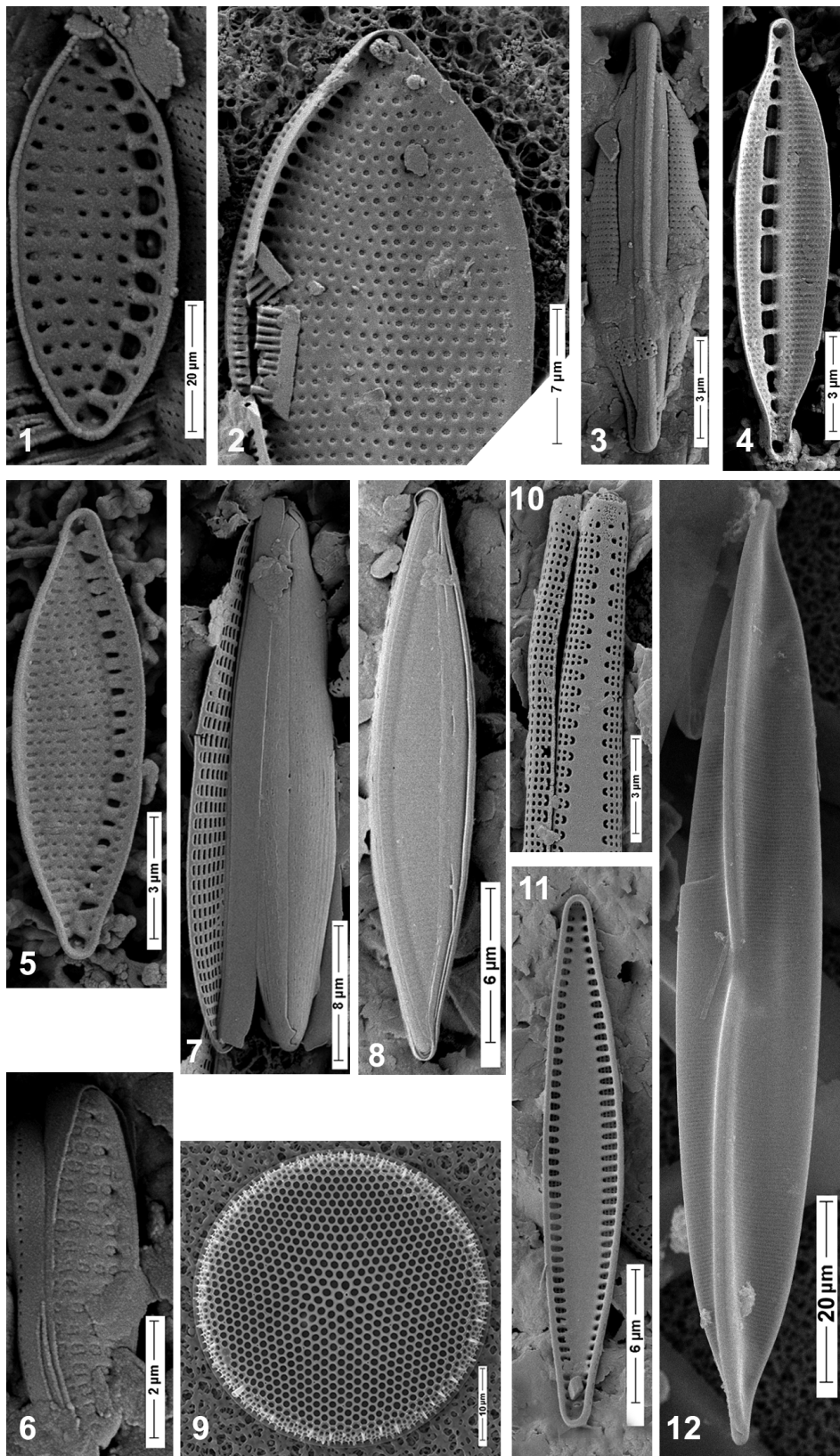


Рис. 5. Бентосные диатомовые водоросли, обнаруженные у м. Сарыч (СЭМ): 1 – *Nitzschia inconspicua*; 2 – *Nitzschia* cf. *coarctata*; 3, 4 – *Nitzschia dissipata*; 5, 6 – *Nitzschia perindistincta* (соответственно вид снаружи и изнутри); 7 – *Haslea* cf. *howeana*; 8 – *Nitzschia agnita*; 9 – *Thalassiosira excentrica*; 10, 11 – *Tabularia tabulata* (соответственно вид снаружи и изнутри); 12 – *Plagiotropis lepidoptera*. Размерная шкала: 1, 6 – 2 мкм; 2 – 7 мкм; 3, 4, 5, 10 – 3 мкм; 7 – 8 мкм; 8, 11 – 6 мкм; 9 – 10 мкм; 12 – 20 мкм.

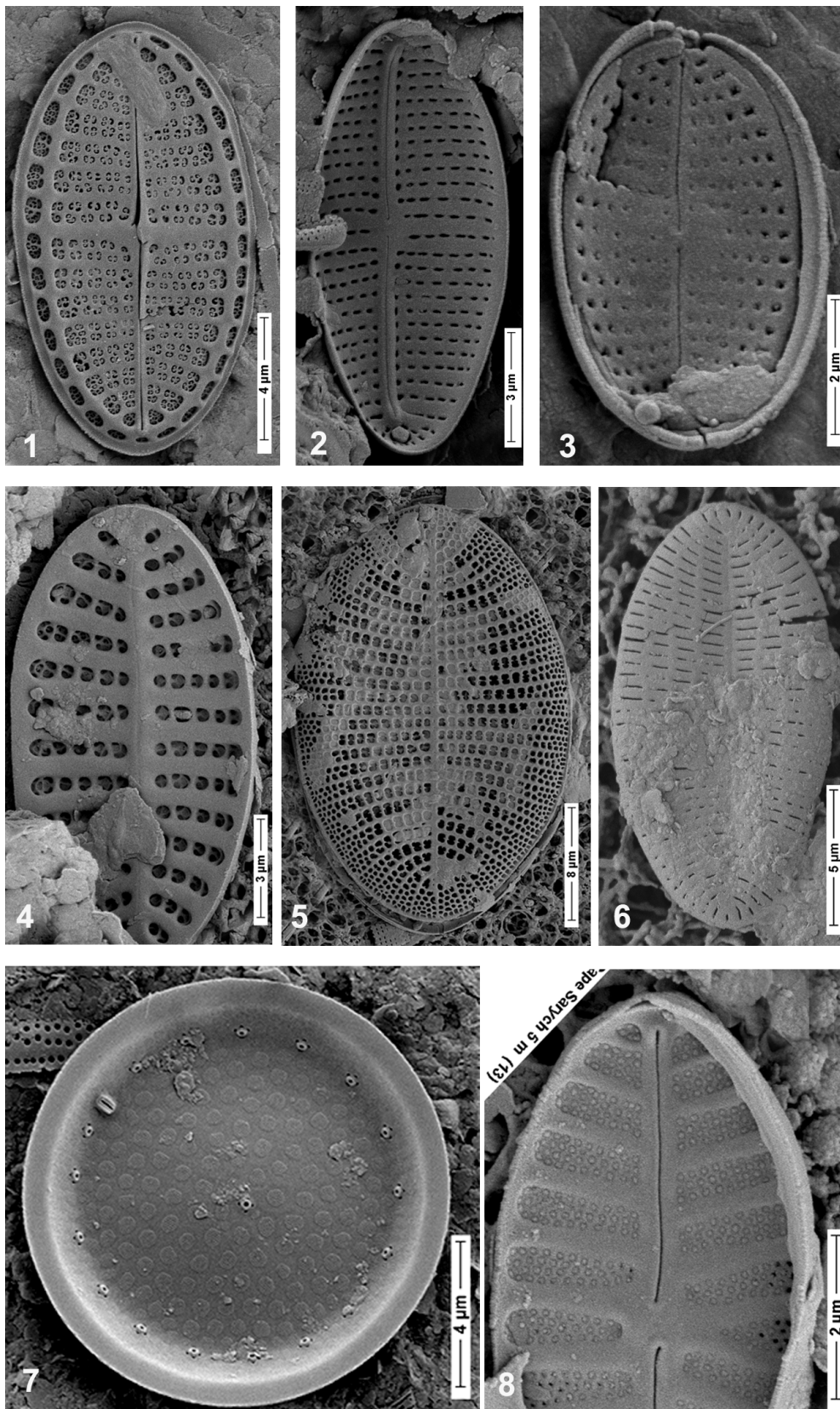


Рис. 6. Бентосные диатомовые водоросли, обнаруженные у м. Сарыч (СЭМ): 1 – *Cocconeis pseudocostata*; 2 – *Cocconeis* sp. G2 (вид изнутри); 3 – *Cocconeis diminuta*; 4 – *Cocconeis costata*; 5 – *Cocconeis scutellum*; 6 – *Cocconeis placentula*; 7 – *Thalassiosira parva* (вид изнутри); 8 – *Planothidium* cf. *delicatulum*. Размерная шкала: 1, 7 – 4 мкм; 2, 4 – 3 мкм; 3, 8 – 2 мкм; 6 – 5 мкм; 5 – 8 мкм.

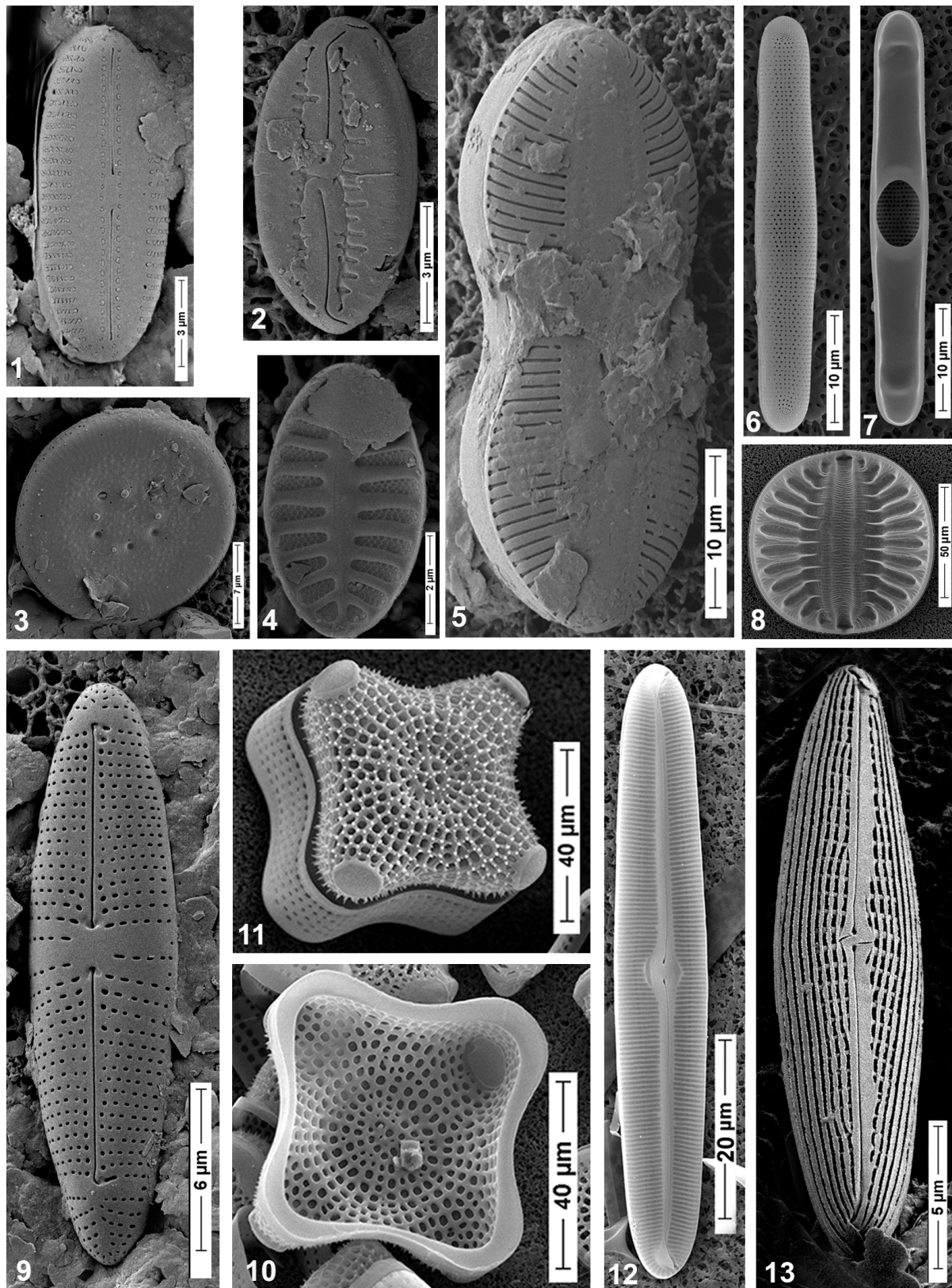


Рис. 7. Бентосные диатомовые водоросли, обнаруженные у м. Сарыч (СЭМ): 1 – *Diploneis* sp. 5; 2 – *Fallacia pulchella*; 3 – *Cyclotella operculata*; 4 – *Planothidium* sp. 3F; 5 – *Diploneis chersonensis*; 6, 7 – *Grammatophora marina* (соответственно вид снаружи и изнутри); 8 – *Campylodiscus thuretii*; 9 – *Parlibellus hendeyi*; 10, 11 – *Triceratium antediluvianum*; 12 – *Caloneis liber*; 13 – *Haslea subagnita*. Размерная шкала: 1, 2 – 3 мкм; 3 – 7 мкм; 4 – 2 мкм; 5, 6, 7 – 10 мкм; 8 – 50 мкм; 9 – 6 мкм; 10, 11 – 40 мкм; 12 – 20 мкм; 13 – 5 мкм.

Табл. 2. Показатели видового (S, d, H') и таксономического (AvTD, VarTD) разнообразия таксоценов диатомовых бентоса исследованных акваторий Крыма.

| Местообитание | Число видов (S) | Индекс Маргалефа (d) | Индекс Шеннона (H', ln) | AvTD (Δ^+) | VarTD (Λ^+) |
|--------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| Б. Карантинная | 135 | 27.32 | 4.91 | 73.08 | 172.20 |
| Б. Севастопольская | 186 | 35.40 | 5.23 | 73.42 | 147.09 |
| М. Сарыч | 82 | 18.20 | 4.39 | 70.11 | 202.84 |
| Новый Свет | 93 | 20.30 | 4.53 | 70.37 | 175.57 |
| Б. Инкерман | 116 | 24.19 | 4.75 | 74.17 | 157.18 |
| М. Фиолент | 290 | 50.97 | 5.67 | 68.45 | 195.71 |
| Б. Двужорная | 304 | 53.00 | 5.72 | 70.31 | 188.57 |
| Б. Балаклавская | 191 | 36.17 | 5.25 | 73.72 | 186.01 |

распределения точек значений Δ^+ и Λ^+ , рассчитанных при 1000-кратных случайных комбинациях для ряда подмножеств из разного числа видов (S) сравниваемых акваторий (Рис. 8). Расположение точки отражает среднюю вертикальную выравненность распределения таксонов по иерархическому дереву (Δ^+) и их горизонтальную вариабельность (Λ^+). Совместное представление этих двух характеристик необходимо для оценки разнообразия таксоценов и выявления возможного влияния гетерогенных условий биотопов на его формирование. Значения индексов Δ^+ и Λ^+ для таксоценов диатомовых условно чистых акваторий (м. Фиолент, м. Сарыч, б.с.Двужорная, пос. Новый Свет) размещены в левом верхнем углу графика (Рис. 8). Значения AvTD для данных локаций ниже, а значения VarTD выше, чем среднеождаемые значения таковых индексов, рассчитанные для всего Черного моря ($\Delta^+ = 82.09$ и $\Lambda^+ = 316.83$). Этот факт свидетельствует о том, что в изученных районах структура таксоценов сформирована ветвями различного видового насыщения и разной иерархии и существенно отличается от архитектоники флоры Bacillariophyta всего Черного моря. Невысокие значения Δ^+ (минимальные – для м. Фиолент и м. Сарыч) обусловлены преобладанием поливидовых таксонов, замыкающихся на общий родовой уровень. Максимальные значения Λ^+ для районов м. Сарыч и м. Фиолент указывают на широкую вариабельность и неравномерность иерархической структуры таксоценов диатомовых данных акваторий вдоль таксономического дерева (Неврова, 2014, 2016, Nevrova and Petrov, 2019b).

В то же время точки значений Δ^+ и Λ^+ для таксоценов диатомовых сильно загрязненных акваторий (б. Балаклавская, б. Карантинная, б. Инкерман, б. Севастопольская) расположены в правом нижнем углу графика, а величины AvTD и VarTD соответственно выше и ниже, чем среднеождаемые для Черного моря в целом (Рис. 8). Наблюдаемые отличия обусловлены относительно высокой долей моновидовых ветвей в иерархической структуре таксоценов диатомовых по сравнению со структурой дерева флоры Bacillariophyta всего Черного моря.

Доминирование в архитектонике таксоценов диатомовых моновидовых ветвей, которые замыкаются на высоких уровнях семейства или порядка, приводит к повышению значения Δ^+ и понижению Λ^+ . Снижение таксономического разнообразия в сильно загрязненных районах и редуцирование структуры таксономического дерева может быть следствием постоянного воздействия поллютантов (солей тяжелых металлов, нефтяных углеводородов, пестицидов и пр.), ведущего к исчезновению из поливидовых ветвей отдельных видов с невысокой устойчивостью к внешним негативным факторам и преобладанию олиговидовых ветвей в структуре дерева (Leira et al., 2009, Leonard et al., 2006; Warwick et al., 2002).

Таким образом, применение индекса TaxDI обеспечивает статистически надежные выводы об особенностях таксономического разнообразия и структуры таксоценов диатомовых водорослей, формирующихся под воздействием различных антропогенных факторов, и может быть рекомендовано для сравнительной оценки разнообразия биоты ООПТ и иных акваторий.

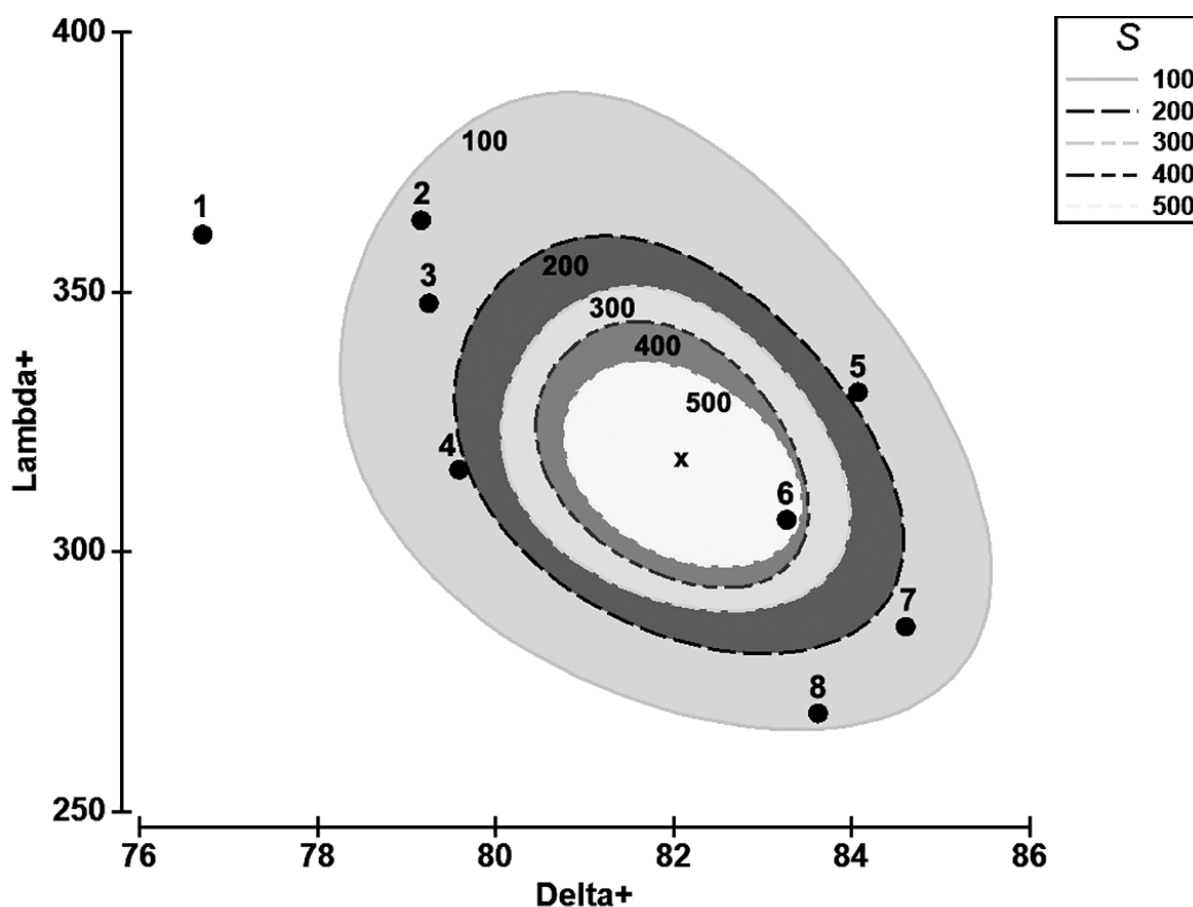


Рис. 8. Расположение на эллипсе (95% вероятности) значений индекса TaxDI (Δ^+ и Λ^+) для таксонов бентосных диатомовых в акваториях побережья Крыма: 1 – м. Фиолент, 2 – м. Сарыч, 3 – б. Двужакорная, 4 – пос. Новый Свет, 5 – б. Балаклавская, 6 – б. Карантинная, 7 – Инкерман, 8 – б. Севастопольская, x – среднеождаемое значение, рассчитанное на основе мастер-листа флоры Bacillariophyta Черного моря ($\Delta^+ = 82.09$, $\Lambda^+ = 316.83$).

Заключение

Выявлено высокое видовое богатство бентосных диатомовых водорослей и значительное количество новых флористических находок в ранее неисследованном аквальном комплексе ООПТ м. Сарыч. Отмечено 82 вида и ввт донных диатомовых, принадлежащих к 35 родам, 25 семействам, 15 порядкам, 3 классам отдела Bacillariophyta, среди которых 18 новых флористических находок для Черного моря и 1 вид, недавно описанный как новый для науки.

Проведено сравнение иерархического разнообразия таксонов диатомовых в биотопах побережья Крыма, различающихся по уровню антропогенного воздействия: малонарушенных акваториях у м. Сарыч, м. Фиолент, б. Двужакорная, п. Новый Свет и в сильно загрязненных бухтах Балаклавская, Карантинная, Инкерман, Севастопольская. Установлено, что минимальные значения Δ^+ в условно чистых районах обусловлены преобладанием в иерархии таксонов диатомовых поливидовых таксонов, замыкающихся на общий родовой уровень. Максимальные значения Λ^+ характеризуют широкую вариабельность и невыравненность иерархической структуры таксонов диатомовых данных акваторий. Для сильно загрязненных акваторий характерны максимальные величины Δ^+ , превышающие среднеождаемое значение для флоры Bacillariophyta всего Черного моря, что обусловлено высокой долей моновидовых ветвей в иерархической структуре таксонов диатомовых и снижением таксономического разнообразия. Воздействие техногенных загрязнителей вызывает трансформацию первичного звена экосистемы морской сублиторали, выраженную в редуцировании структуры таксоцена диатомовых и исчезновении низкорезистентных видов.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой природоохранной значимости ООПТ у м. Сарыч и должны инициировать проведение дальнейших исследований донных диатомовых аквального комплекса с ненарушенными условиями. Применение индекса TaxDI рекомендуется для анализа структуры таксоценов бентосных Bacillariophyta ООПТ и иных акваторий для получения достоверных выводов о таксономическом разнообразии диатомовых.

Список литературы

- Выработка приоритетов: новый подход к сохранению биоразнообразия в Крыму: результаты программы «Оценка необходимости сохранения биоразнообразия в Крыму», осуществленной при содействии Программы поддержки биоразнообразия BSP, 1999. BSP, Вашингтон, США, 257 с.
- Гусяков, Н.Е., Закордонец, О.А., Герасимюк, В.П., 1992. Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов. Наукова думка, Киев, Украина, 115 с.
- Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные. Т. 1, 1974. Прошкина-Лавренко, А.И. (ред.). Наука, Ленинград, СССР, 403 с.
- Мильчакова, Н.А., Александров, В.В., Бондарева, Л.В., Панкеева, Т.В., Чернышева, Е.Б., 2015. Морские охраняемые акватории Крыма: научный справочник. Н. Оріанда, Симферополь, Россия, 312 с.
- Неврова, Е.Л., 2013а. Структура и таксономическое разнообразие донных диатомовых в приустьевых зонах рек Бельбек и Черная (Юго-Западный Крым, Украина). *Альгология* 23 (4), 471–492.
- Неврова, Е.Л., 2013б. Таксономическое разнообразие и структура таксоценов бентосных диатомовых в Севастопольской бухте (Черное море). *Морской экологический журнал* 3 (12), 55–67.
- Неврова, Е.Л., 2014. Эколого-таксономическая оценка донных диатомовых в Балаклавской бухте (Юго-Западный Крым, Черное море). *Альгология* 24 (1), 47–66.
- Неврова, Е.Л., 2015. Донные диатомовые водоросли (Bacillariophyta) Черного моря: разнообразие и структура таксоценов различных биотопов. *Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук*. Москва, Россия, 445 с.
- Неврова, Е.Л., 2016. Состав и структура таксоценов бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) у мыса Фиолент (Крым, Черное море). *Биология моря* 42 (5), 334–342.
- Неврова, Е.Л., 2022. Разнообразие и структура таксоценов бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) Черного моря. ФИЦ ИнБЮМ, Севастополь, Россия, 329 с. <https://doi.org/10.21072/978-5-6048081-0-8>
- Неврова, Е.Л., Снигирева, А.А., Петров, А.Н., Ковалева, Г.В., 2015. Руководство по изучению морского микрофитобентоса и его применению для контроля качества среды. Н. Оріанда, Симферополь, Россия, 175 с.
- Петров, А.Н., Неврова, Е.Л., 2004. Сравнительный анализ структуры таксоценов донных диатомовых (Bacillariophyta) в районах с различным уровнем техногенного загрязнения (Черное море, Крым). *Морской экологический журнал* 3 (2), 72–83.
- Петров, А.Н., Неврова, Е.Л., Малахова, Л.В., 2005. Многомерный анализ распределения бентосных диатомовых (Bacillariophyta) в поле градиентов абиотических факторов в Севастопольской бухте (Черное море, Крым). *Морской экологический журнал* 4 (3), 65–77.

- Arvanitidis, C., Atzigeorgiu, G., Koutsoubas, D., Kevrekidis, T., Dounas, A. et al., 2005. Estimating lagoonal biodiversity comparison of rapid assessment techniques. *Helgoland Marine Research* **59**, 177–186. <https://doi.org/10.1007/s10152-005-0216-8>
- Blanco, S., Cejudo-Figueiras, C., Tudesque, L., Bécares, E., Hoffmann, L., Ector, L., 2012. Are diatom diversity indices reliable monitoring metrics? *Hydrobiologia* **695**, 199–206. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1113-1>
- Borja, A., Elliott, M., Andersen, J.H., Cardoso, A.C., Carstensen, J. et al., 2013. Good Environmental Status of marine ecosystems: What is it and how do we know when we have attained it? *Marine Pollution Bulletin* **76** (1–2), 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.042>
- Campbell, W.B., Novelo-Gutierrez, R., 2007. Reduction in odonate phylogenetic diversity associated with dam impoundment is revealed using taxonomic distinctness. *Fundamental and Applied Limnology* **168** (1), 83–92. <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2007/0168-0083>
- Ceschia, C., Falace, A., Warwick, R., 2007. Biodiversity evaluation of the macroalgal flora of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) using taxonomic distinctness indices. *Hydrobiologia* **580** (1), 43–56. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-006-0466-8>
- Clarke, K.R., Gorley, R.N., 2006. PRIMER v6: User Manual. Tutorial. PRIMER-E, Plymouth, UK, 126 p.
- Ellingsen, K.E., Clarke, K.R., Somerfield, P.J., Warwick, R.M., 2005. Taxonomic distinctness as a measure of diversity applied over a large scale: the benthos of the Norwegian continental shelf. *Journal of Animal Ecology* **74** (6), 1069–1079. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2005.01004.x>
- Facca, C., Sfriso, A., 2007. Epipellic diatom spatial and temporal distribution and relationship with the main environmental parameters in coastal waters. *Estuarine, Coast and Shelf Science* **75**, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.033>
- Guiry, M.D., Guiry, G.M., 2023. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <https://www.algaebase.org> (accessed: 17.06.2023).
- Heino, J., Mykra, H., Hamalainen, H., Aroviita, J., Muotka, T., 2007. Responses of taxonomic distinctness and species diversity indices to anthropogenic impacts and natural environmental gradients in stream macroinvertebrates. *Freshwater Biology* **52** (9), 1846–1861. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01801.x>
- Izsak, C., Price, A.R.G., Hardy, J.T., Basson, P.W., 2002. Biodiversity of periphyton (diatoms) and echinoderms around a refinery effluent, and possible associations with stability. *Aquatic Ecosystem Health* **5** (1), 61–70.
- Keck, F., Rimet, F., Franc, A., 2016. Phylogenetic signal in diatom ecology: perspectives for aquatic ecosystems biomonitoring. *Ecological Application* **26** (3), 861–872. <https://doi.org/10.1890/14-1966>
- Leira, M., Chen, G., Dalton, C., Irvine, K., Taylor, D., 2009. Patterns in freshwater diatom taxonomic distinctness along an eutrophication gradient. *Freshwater Biology* **54** (1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02086.x>
- Leonard, D., Clarke, K., Somerfield, P., Warwick, R., 2006. The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessment. *Journal of Environmental Management* **78** (1), 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.008>
- Levkov, Z., 2009. *Amphora sensu lato*. Diatoms of Europe. A.R.G. Gantner Verlag K.G, Ruggell, Liechtenstein, 916 p.

- Mouliott, D., Gaillard, S., Aliaume, C., Veriaque, M., Belsher, T., Troussellier, M., Chi, T., 2005. Ability of taxonomic diversity indices to discriminate coastal lagoon environmental based on macrophyte communities. *Ecological Indicator* **5** (1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2004.04.004>
- Munari, C., Warwick, R.M., Mistri, M., 2009. Monitoring with benthic fauna in Italian coastal lagoons: new tools for new prospects. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **19**, 575–587. <https://doi.org/10.1002/aqc.1005>
- Nevrova, E., Petrov, A., 2019a. Benthic diatoms species richness at Dvuyakornaya Bay and other coastal sites of Crimea (the Black Sea) under various environments. *Mediterranean Marine Science* **20** (3), 506–520. <http://dx.doi.org/10.12681/mms.20319>
- Nevrova, E., Petrov, A., 2019b. Assessment of benthic diatoms taxonomic diversity at coastal biotopes with different anthropogenic impact (Crimea, the Black Sea). *Turkish Journal of Botany* **43** (5), 608–618. <https://doi.org/10.3906/bot-1903-43>
- Petrov, A., Nevrova, E., 2007. Database on Black Sea benthic diatoms (Bacillariophyta): its use for a comparative study of diversity peculiarities under technogenic pollution impacts. *Proceedings of an International Conference of Marine Biodiversity Data Management*. Hamburg, Germany, 153–165.
- Petrov, A., Nevrova, E., Terletskaia, A., Milyukin, M., Demchenko, V., 2010. Structure and taxonomic diversity of benthic diatoms assemblage in a polluted marine environment (Balaklava Bay, Black Sea). *Polish Botanical Journal* **55** (1), 183–197.
- Petrov, A.N., Nevrova, E.L., 2013. Prognostic estimation of species richness of benthic Bacillariophyta. *International Journal on Algae* **15** (1) 5–25. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v15.i1.10>
- Petrov, A.N., Nevrova, E.L., 2014. Numerical analysis of the structure of benthic diatom assemblages in replicate samples (Crimea, the Black Sea). *Nova Hedwigia. Beiheft* **143**, 245–253.
- Round, F.E., Crawford, R.M., Mann, D.G., 1990. The diatoms. Biology and morphology of the genera. Cambridge University press, Cambridge, UK, 747 p.
- Stenger-Kovács, C., Tóth, L., Tóth, F., Hajnal, E., Padišák, J., 2014. Stream order-dependent diversity metrics of epilithic diatom assemblages. *Hydrobiologia* **721**, 67–75. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1649-8>
- Stenger-Kovács, C., Hajnal, É., Lengyel, E., Buczkó, K., Padišák, J., 2016. A test of traditional diversity measures and taxonomic distinctness indices on benthic diatoms of soda pans in the Carpathian basin. *Ecological Indicators* **64**, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.018>
- Tokatli, C., Solak, C.N., Yilmaz, E., 2020. Water quality assessment by means of bio-indication: A case study of Ergene river using biological diatom index. *Aquatic Sciences and Engineering* **35** (2), 43–51. <https://doi.org/10.26650/ASE2020646725>
- Warwick, R.M., Clarke, K.R., 1998. Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied Ecology* **35**, 532–543.
- Warwick, R.M., Ashman, C.M., Brown, A.R., Clarke, K.R., Dowell, B. et al., 2002. 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. *Marine Ecology Progress Series* **234**, 1–13. <https://doi.org/10.3354/meps234001>
- Warwick, R.M., Clarke, K.R., 2001. Practical measures of marine biodiversity based on relatedness of species. *Oceanography and Marine Biology: an annual review* **39**, 207–231.

Witkowski, A., Lange-Bertalot, H., Metzeltin, D., 2000. Diatom flora of Marine coast 1. *Iconographia Diatomologica*. Vol. 7. A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, Liechtenstein, 926 p.

Witkowski, A., Kulikovskiy, M., Nevrova, E., Lange-Bertalot, H., Gogorev, R., 2010. The genus *Navicula* in ancient basins. I. Two novelties from the Black Sea. *Plant Ecology and Evolution* 143 (3), 307–317.

Yang, Zh., Xu, Yu., Xu, G., Xu, H. 2016. Temporal variation in taxonomic distinctness of biofilm-associated diatoms within the colonization process in coastal ecosystems. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 96 (5), 1119–1125. <https://doi.org/10.1017/S002531541600028X>

References

Arvanitidis, C., Atzigeorgiu, G., Koutsoubas, D., Kevrekidis, T., Dounas, A. et al., 2005. Estimating lagoonal biodiversity comparison of rapid assessment techniques. *Helgoland Marine Research* 59, 177–186. <https://doi.org/10.1007/s10152-005-0216-8>

Blanco, S., Cejudo-Figueiras, C., Tudesque, L., Bécares, E., Hoffmann, L., Ector, L., 2012. Are diatom diversity indices reliable monitoring metrics? *Hydrobiologia* 695, 199–206. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1113-1>

Borja, A., Elliott, M., Andersen, J.H., Cardoso, A.C., Carstensen, J. et al., 2013. Good Environmental Status of marine ecosystems: What is it and how do we know when we have attained it? *Marine Pollution Bulletin* 76 (1–2), 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.042>

Campbell, W.B., Novelo-Gutierrez, R., 2007. Reduction in odonate phylogenetic diversity associated with dam impoundment is revealed using taxonomic distinctness. *Fundamental and Applied Limnology* 168 (1), 83–92. <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2007/0168-0083>

Ceschia, C., Falace, A., Warwick, R., 2007. Biodiversity evaluation of the macroalgal flora of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) using taxonomic distinctness indices. *Hydrobiologia* 580 (1), 43–56. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-006-0466-8>

Clarke, K.R., Gorley, R.N., 2006. PRIMER v6: User Manual. Tutorial. PRIMER-E, Plymouth, UK, 126 p.

Diatomovyye vodorosli SSSR. Iskopyemyye i sovremennyye [Diatoms of the USSR. Fossil and modern]. Vol. 1, 1974. Proshkina-Lavrenko, A.I. (ed.). Nauka, Leningrad, USSR, 403 p. (In Russian).

Ellingsen, K.E., Clarke, K.R., Somerfield, P.J., Warwick, R.M., 2005. Taxonomic distinctness as a measure of diversity applied over a large scale: the benthos of the Norwegian continental shelf. *Journal of Animal Ecology* 74 (6), 1069–1079. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2005.01004.x>

Facca, C., Sfriso, A., 2007. Epipellic diatom spatial and temporal distribution and relationship with the main environmental parameters in coastal waters. *Estuarine, Coast and Shelf Science* 75, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.033>

Guiry, M.D., Guiry, G.M., 2023. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <https://www.algaebase.org> (accessed: 17.06.2023).

Guslyakov, N.E., Zakordonets, O.A., Gerasimiyuk, V.P., 1992. Atlas diatomovykh vodorosley bentosa severo-zapadnoy chasti Chornogo morya i prilegayushchikh vodoyemov [Atlas of diatom algae of the benthos of the northwestern part of the Black Sea and adjacent reservoirs]. Naukova Dumka, Kiev, Ukraine, 115 p. (In Russian).

Heino, J., Mykra, H., Hamalainen, H., Aroviita, J., Muotka, T., 2007. Responses of taxonomic distinctness and species diversity indices to anthropogenic impacts and natural environmental gradients in

- stream macroinvertebrates. *Freshwater Biology* **52** (9), 1846–1861. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01801.x>
- Izsak, C., Price, A.R.G., Hardy, J.T., Basson, P.W., 2002. Biodiversity of periphyton (diatoms) and echinoderms around a refinery effluent, and possible associations with stability. *Aquatic Ecosystem Health* **5** (1), 61–70.
- Keck, F., Rimet, F., Franc, A., 2016. Phylogenetic signal in diatom ecology: perspectives for aquatic ecosystems biomonitoring. *Ecological Application* **26** (3), 861–872. <https://doi.org/10.1890/14-1966>
- Leira, M., Chen, G., Dalton, C., Irvine, K., Taylor, D., 2009. Patterns in freshwater diatom taxonomic distinctness along an eutrophication gradient. *Freshwater Biology* **54** (1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02086.x>
- Leonard, D., Clarke, K., Somerfield, P., Warwick, R., 2006. The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessment. *Journal of Environmental Management* **78** (1), 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.008>
- Levkov, Z., 2009. *Amphora sensu lato*. Diatoms of Europe. A.R.G. Gantner Verlag K.G, Ruggell, Liechtenstein, 916 p.
- Milchakova, N.A., Aleksandrov, V.V., Bondareva, L.V., Pankeeva, T.V., Chernysheva, E.B., 2015. Morskiye okhranyayemyye akvatorii Kryma: nauchnyy spravochnik [Marine protected areas of Crimea. Scientific Handbook]. N. Orianda, Simferopol, Russia, 312 p. (In Russian).
- Mouliott, D., Gaillard, S., Aliaume, C., Veriaque, M., Belsher, T., Troussellier, M., Chi, T., 2005. Ability of taxonomic diversity indices to discriminate coastal lagoon environmental based on macrophyte communities. *Ecological Indicator* **5** (1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2004.04.004>
- Munari, C., Warwick, R.M., Mistri, M., 2009. Monitoring with benthic fauna in Italian coastal lagoons: new tools for new prospects. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **19**, 575–587. <https://doi.org/10.1002/aqc.1005>
- Nevrova, E.L., 2013a. Struktura i taksonomicheskoye raznoobraziye donnykh diatomovykh v priust'yevykh zonakh rek Bel'bek i Chernaya (Yugo-Zapadnyy Krym, Ukraina) [Structure and taxonomic diversity of benthic diatom at estuarines of rivers Belbek and Chernaya (Southwestern Crimea, Ukraine)]. *Algologia [Algology]* **23** (4), 471–492. (In Russian).
- Nevrova, E.L., 2013b. Taksonomicheskoye raznoobraziye i struktura taksotsena bentosnykh diatomovykh v Sevastopol'skoy bukhte (Chernoye more) [Taxonomic diversity and structure of benthic diatom taxocene (Bacillariophyta) at Sevastopol Bay (the Black Sea)]. *Morskoy ekologicheskiy zhurnal [Marine Ecological journal]* **3** (12), 55–67. (In Russian).
- Nevrova, E.L., 2014. Ekologo-taksonomicheskaya otsenka donnykh diatomovykh v Balaklavskoy bukhte (Yugo-Zapadnyy Krym, Chernoye more) [Taxonomic diversity and environmental assessment of benthic diatoms at Balaklava Bay (Southwestern Southwestern Crimea, the Black Sea, Ukraine)]. *Algologia [Algology]* **24** (1), 47–66. (In Russian).
- Nevrova, E.L., 2015. Donnyye diatomovyye vodorosli (Bacillariophyta) Chornogo morya: raznoobraziye i struktura taksotsenov razlichnykh biotopov [Benthic diatoms (Bacillariophyta) in the Black Sea: diversity and structure of taxocenes of various biotopes]. *Doctor of Biological Sciences thesis*. Moscow, Russia. 442 p. (In Russian).
- Nevrova, E.L., 2016. The composition and structure of the benthic diatom taxocene (Bacillariophyta) near Cape Fiolent (the Black Sea, the Crimea). *Russian Journal of Marine Biology* **42** (5), 392–401. <https://doi.org/10.1134/S1063074016050072>

- Nevrova, E.L., 2022. Raznoobraziye i struktura taksotsenov bentosnykh diatomovykh vodorosley (Bacillariophyta) Chernogo morya [Diversity and structure of benthic diatom taxocenes (Bacillariophyta) of the Black Sea]. Institute of Biology of the Southern Seas, Sevastopol, Russia, 329 p. (In Russian). <https://doi.org/10.21072/978-5-6048081-0-8>
- Nevrova, E., Petrov, A., 2019a. Benthic diatoms species richness at Dvuyakornaya Bay and other coastal sites of Crimea (the Black Sea) under various environments. *Mediterranean Marine Science* **20** (3), 506–520. <http://dx.doi.org/10.12681/mms.20319>
- Nevrova, E., Petrov, A., 2019b. Assessment of benthic diatoms taxonomic diversity at coastal biotopes with different anthropogenic impact (Crimea, the Black Sea). *Turkish Journal of Botany* **43** (5), 608–618. <https://doi.org/10.3906/bot-1903-43>
- Nevrova, E.L., Snigireva, A.A., Petrov, A.N., Kovaleva, G.V., 2015. Rukovodstvo po izucheniyu morskogo mikrofitobentosa i yego primeneniyu dlya kontrolya kachestva sredy [Guidelines for quality control of the Black Sea. Microphytobenthos]. N. Orianda, Simferopol, Russia, 175 p. (In Russian).
- Petrov, A., Nevrova, E., 2007. Database on Black Sea benthic diatoms (Bacillariophyta): its use for a comparative study of diversity peculiarities under technogenic pollution impacts. *Proceedings of an International Conference of Marine Biodiversity Data Management*. Hamburg, Germany, 153–165.
- Petrov, A., Nevrova, E., Terletskaya, A., Milyukin, M., Demchenko, V., 2010. Structure and taxonomic diversity of benthic diatoms assemblage in a polluted marine environment (Balaklava Bay, Black Sea). *Polish Botanical Journal* **55** (1), 183–197.
- Petrov, A.N., Nevrova, E.L., 2004. Sravnitel'nyy analiz struktury taksotsena donnykh diatomovykh (Bacillariophyta) v rayonakh s razlichnym urovnem tekhnogennogo zagryazneniya (Chernoye more, Krym) [Comparative analysis of taxocene structure of benthic diatoms (Bacillariophyta) in regions with different level of technogenic pollution (the Black Sea, the Crimea)]. *Morskoy ekologicheskiy zhurnal [Marine Ecological journal]* **3** (2), 72–83. (In Russian).
- Petrov, A.N., Nevrova, E.L., 2013. Prognostic estimation of species richness of benthic Bacillariophyta. *International Journal on Algae* **15** (1) 5–25. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v15.i1.10>
- Petrov, A.N., Nevrova, E.L., 2014. Numerical analysis of the structure of benthic diatom assemblages in replicate samples (Crimea, the Black Sea). *Nova Hedwigia. Beiheft* **143**, 245–253.
- Petrov, A.N., Nevrova, E.L., Malakhova, L.V., 2005. Mnogomernyy analiz raspredeleniya bentosnykh diatomovykh (Bacillariophyta) v pole gradiyentov abioticheskikh faktorov v Sevastopol'skoy bukhte (Chernoye more, Krym) [Multivariate analysis of benthic diatoms distribution across the multidimensional space of the environmental factors gradient in Sevastopol Bay (the Black Sea, the Crimea)]. *Morskoy ekologicheskiy zhurnal [Marine Ecological journal]* **4** (3), 65–78. (In Russian).
- Round, F.E., Crawford, R.M., Mann, D.G., 1990. The diatoms. Biology and morphology of the genera. Cambridge University press, Cambridge, UK, 747 p.
- Stenger-Kovács, C., Tóth, L., Tóth, F., Hajnal, E., Padišák, J., 2014. Stream order-dependent diversity metrics of epilithic diatom assemblages. *Hydrobiologia* **721**, 67–75. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1649-8>
- Stenger-Kovács, C., Hajnal, É., Lengyel, E., Buczkó, K., Padišák, J., 2016. A test of traditional diversity measures and taxonomic distinctness indices on benthic diatoms of soda pans in the Carpathian basin. *Ecological Indicators* **64**, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.018>

- Tokatli, C., Solak, C.N., Yilmaz, E., 2020. Water quality assessment by means of bio-indication: A case study of Ergene river using biological diatom index. *Aquatic Sciences and Engineering* **35** (2), 43–51. <https://doi.org/10.26650/ASE2020646725>
- Vyrabotka prioritetov: novyy podkhod k sokhraneniyu bioraznoobraziya v Krymu: rezul'taty programmy "Otsenka neobkhodimosti sokhraneniya bioraznoobraziya v Krymu", osushchestvlennoy pri sodeystvii Programmy podderzhki bioraznoobraziya BSP [Developing Priorities: A New Approach to Biodiversity Conservation in the Crimea: results of the program "Biodiversity Conservation Needs Assessment in the Crimea" implemented with the assistance of the Biodiversity Support Program BSP], 1999. BSP, Washington, USA, 257 p. (In Russian).
- Warwick, R.M., Clarke, K.R., 1998. Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied Ecology* **35**, 532–543.
- Warwick, R.M., Ashman, C.M., Brown, A.R., Clarke, K.R., Dowell, B. et al., 2002. 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. *Marine Ecology Progress Series* **234**, 1–13. <https://doi.org/10.3354/meps234001>
- Warwick, R.M., Clarke, K.R., 2001. Practical measures of marine biodiversity based on relatedness of species. *Oceanography and Marine Biology: an annual review* **39**, 207–231.
- Witkowski, A., Lange-Bertalot, H., Metzeltin, D., 2000. Diatom flora of Marine coast 1. Iconographia Diatomologica. Vol. 7. A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, Liechtenstein, 926 p.
- Witkowski, A., Kulikovskiy, M., Nevrova, E., Lange-Bertalot, H., Gogorev, R., 2010. The genus *Navicula* in ancient basins. I. Two novelties from the Black Sea. *Plant Ecology and Evolution* **143** (3), 307–317.
- Yang, Zh., Xu, Yu., Xu, G., Xu, H. 2016. Temporal variation in taxonomic distinctness of biofilm-associated diatoms within the colonization process in coastal ecosystems. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **96** (5), 1119–1125. <https://doi.org/10.1017/S002531541600028X>