



УДК 582.261.1:574.64 (262.5)

А. Н. Петров, канд. биол. наук, с. н. с., **Е. Л. Неврова**, канд. биол. наук, с. н. с., **Л. В. Малахова**, м. н. с.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук Украины,
Севастополь, Украина

МНОГОМЕРНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЕНТОСНЫХ ДИАТОМОВЫХ (BACILLARIOPHYTA) В ПОЛЕ ГРАДИЕНТОВ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ (ЧЕРНОЕ МОРЕ, КРЫМ)

Проведен сравнительный анализ видовой структуры и количественного распределения бентосных диатомовых водорослей в многомерном пространстве градиентов абиотических переменных, определяющих экологическую ситуацию в Севастопольской бухте. С использованием метода главных компонент и на основе расчета коэффициентов ранговой корреляции Спирмана (ρ) из исходных данных, включающих 26 физико-химических параметров, выделена комбинация из 7 абиотических факторов (глубина + фракция грунта $0,25 \div 0,1 \text{ мм} + \text{Cd} + \text{Eh} + \text{Mn} + \text{ПХБ} + \text{Zn}$), в наибольшей степени определяющих количественное распределение диатомовых в биотопе. По результатам кластерного анализа на основе сходства станций по 7 абиотическим факторам, все множество станций (32) было подразделено на три пространственно-компактные группы, соответствующие внутренней (группа 1), внешней (группа 2) и центральной части (группа 3) акватории Севастопольской бухты. Данные участки акватории также различаются по среднему уровню ключевых абиотических параметров и по особенностям структуры таксоценологических комплексов диатомовых. Значения видового богатства и численности водорослей максимальны в средней части бухты с наиболее неблагоприятными кислородными условиями ($\text{Eh} \ll 0$) и повышенным уровнем токсических соединений (ПХБ, ХЭБ, тяжелые металлы) в донных отложениях. Для каждого участка акватории бухты выделены таксоценологические комплексы и охарактеризованы наиболее значимые виды (индикационные и дискриминаторные), определяющие особенности структуры каждого из комплексов и структурные отличия между комплексами. Высказано предположение о том, что межкомплексные отличия в структурной организации таксоценоза могут быть обусловлены различной толерантностью дискриминаторных видов к влиянию выделенных абиотических факторов (в том числе техногенных токсикантов) в Севастопольской бухте.

Ключевые слова: бентосные диатомовые, Bacillariophyta, структура таксоценоза, многомерный статистический анализ, антропогенное воздействие, тяжелые металлы, Черное море

Изучение реакции эколого-таксономических групп бентоса на комплексное воздействие факторов внешней среды приобретает особое значение в связи с проблемой антропогенного загрязнения прибрежных акваторий и необходимостью мониторинга состояния экосистемы шельфовой зоны Черного моря. Важная индикаторная роль в подобных исследованиях отводится донным сообществам, и в частности, бентосным диатомовым водорослям (Bacillariophyta), которые являются

первичным звеном трофической цепи и массово заселяют все биотопы сублиторали до глубины 50 – 70 м. Сравнительные экологические исследования донных диатомовых представляют отдельный интерес, поскольку, по сравнению с макро- и мейобентосом, размеры микроводорослей на 2 – 3 порядка меньше, они являются фототрофными организмами и характеризуются иной масштабностью распределения в биотопе, в том числе и под влиянием загрязнений, накапливающихся в

донных отложениях. Такие особенности диатомовых могут обуславливать специфические изменения структуры таксоцены в условиях воздействия внешних факторов естественной и антропогенной природы, что определяет необходимость исследований данной группы бентосных организмов для оценки их возможной роли как экологических индикаторов [9, 14].

Некоторые исследования последних лет, в которых был проведен анализ комбинаций абиотических факторов (включая токсические соединения), определяющих особенности структуры выделенных таксоценологических комплексов диатомовых, выполнены для различных акваторий побережья юго-западного Крыма [10, 11, 13].

Цель настоящей работы, логически продолжающей эти исследования, состоит в сравнительном анализе особенностей пространственного распределения и структуры таксоцены бентосных диатомовых водорослей в многомерном пространстве градиентов различных абиотических факторов (включая техногенные загрязнители), определяющих современную экологическую ситуацию в акватории

главной Севастопольской бухты. Севастопольская бухта относится к акваториям активного использования, в которую постоянно поступают промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды (до 15 тыс. м³·сут⁻¹). Гидродинамической особенностью данной акватории является наличие антициклонической динамической структуры с конвергенцией в центре бухты, что приводит к формированию квазистационарной области [8]. Эти особенности оказывают влияние на динамику современного осадконакопления, и, как следствие, — на процессы аккумуляции в донных отложениях различных соединений и характер количественного распределения донных сообществ и, в частности, микрофитобентоса.

Материал и методы. Данные для анализа получены в результате комплексной бентосной съемки Севастопольской бухты в июле 2001 г. Пробы отобраны одновременно на 32 станциях в диапазоне глубин 4 – 17 м. Сетка станций на рыхлых субстратах относительно равномерно покрывает всю акваторию главной Севастопольской бухты, включая Южную бухту (рис. 1).

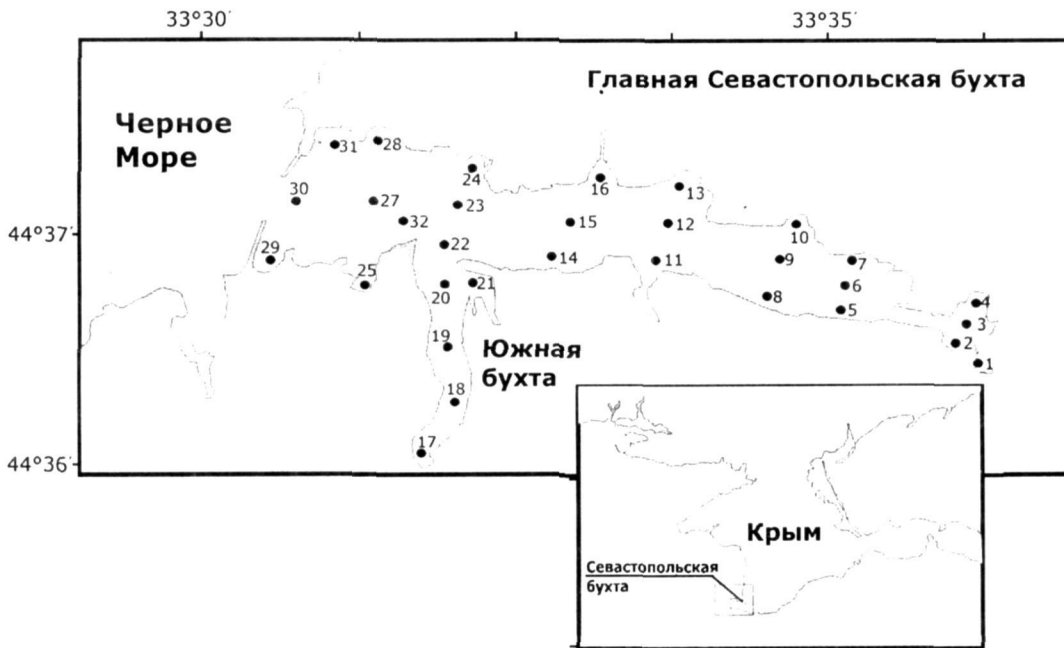


Рис. 1 Схема станций, выполненных в акватории Севастопольской бухты

Fig. 1 Sampling stations scheme in Sevastopol Bay

Пробы донных отложений отобраны дночерпателем Петерсена площадью захвата 0.025 м². В дальнейшем, из одного блока грунта брали пробы для гранулометрического и химического анализов, а также для количественного изучения биоты. Данные по абиотическим переменным, которые потенциально могут оказывать влияние на количественное развитие микрофитобентоса, взяты из опубликованных работ [3, 5, 6, 8, 19], либо любезно предоставлены коллегами. Исходная абиотическая

матрица была составлена только из тех 26 переменных (табл. 1), которые не показали высокую взаимную корреляцию ($R < 0,9$). Исключение из анализа таких взаимокоррелирующих факторов не ведет к потере значимой информации в результирующих матрицах сходства/отличия, но позволяет понизить «размерность» многомерного пространства переменных и повысить результативность анализа по оценке влияния абиотических факторов на особенности структуры таксоцены диатомовых.

Табл. 1 Абиотические факторы, использованные для характеристики станций Севастопольской бухты (данные получены для верхнего слоя грунта 0 – 3 см; концентрации металлов и ПХБ представлены на сырую массу грунта)

Table 1 Abiotic factors used for characteristics of the Sevastopol Bay stations (data were obtained from upper 0 – 3 cm layer of sediments; metals and PCBs concentrations are given per wet weight of sediment)

Параметры	Диапазон изменения	Источник
<u>Физические:</u>		
Глубина, м	4 – 17	Наши данные
Фракция грунта, %		[8]
	> 5 мм	0 – 33
	5 ÷ 2 мм	0 – 17
	2 ÷ 1 мм	0 – 4
	1 ÷ 0,5 мм	0 – 25
	0,5 ÷ 0,25 мм	0 – 37
	0,25 ÷ 0,1 мм	0 – 40
	0,1 ÷ 0,05 мм	0 – 34
	< 0,05 мм	0 – 83
Ен, мВ	(–129) – (+160)	– « –
РН поровых вод	7,67 – 8,55	– « –
<u>Химические:</u>		
Фосфаты в грунтовых водах, мкМ	3 – 343	[5]
Фосфаты в придонных водах, мкМ	0,01 – 0,80	– « –
Нитриты в грунтовых водах, мкгМ	0,27 – 1,55	– « –
Нитриты в придонных водах, мкгМ	0,01 – 0,53	– « –
Органический углерод, (мг·г ⁻¹ сухой массы осадка)	0,3 – 6,2	Бобкова, Нестерова, неопубл. данные
Белок донных осадков, (мг·г ⁻¹ сухой массы осадка)	6,13 – 34,78	Бобкова, Нестерова, неопубл. данные
<u>Тяжелые металлы и токсиканты:</u>		
Нг, мкг·г ⁻¹	0,09 – 1,88	[3], Костова, неопубл. данные
Сu, мкг·г ⁻¹	0,34 – 19,20	[8]
Сd, мкг·г ⁻¹	0,44 – 17,00	– « –
Zn, мкг·г ⁻¹	8,76 – 49,49	– « –
Сг, мкг·г ⁻¹	0,53 – 31,79	– « –
Мn, мкг·г ⁻¹	1,96 – 21,94	– « –
Рb, Бк·кг ⁻¹	6 – 39	[6]
Хлороформэкстрагируемые битумоиды (ХЭБ), (мг·г ⁻¹ сухой массы осадка)	0,1 – 3,2	[19]
Полихлорбифенилы (ПХБ), нг·г ⁻¹	42 – 3770	[3], Малахова, неопубл. данные

Количественное распределение донных диатомовых в пределах полигона оценено на основе расчета численности и числа видов на каждой станции. Минимальная расчетная численность в пробах (при прямом количественном учете) составила 250 экз.·см⁻², полное таксономическое определение видовой структуры выполнено на постоянных препаратах, где условная численность видов, не вошедших в количественный учет, но отмеченных в пробах, принята 10 экз.·см⁻².

Для изучения структуры таксоцены диатомовых в Севастопольской бухте применены алгоритмы многомерного статистического анализа. Обработка данных выполнена с использованием программ пакетов PRIMER v5 [16] и STATISTICA [20].

Сходство структуры таксоцены диатомовых оценено по коэффициенту Брэй-Куртиса с расчетом дальне-групповой связи между станциями. Исходные данные по численности диатомовых предварительно $\sqrt[4]{}$ -трансформированы для снижения нежелательного эффекта влияния высокой численности наиболее массовых видов на результаты расчетов матриц сходства. Такой высокий уровень трансформации избран, исходя из того, что диапазон значений численности диатомовых в пробах составлял 3 порядка. Из общего числа обнаруженных в пробах 186 видов и внутривидовых таксонов донных диатомовых в исходную матрицу численности включены 113, частота встречаемости которых составила более 7 %, т.е. не учтены единичные виды, отмеченные лишь на 1–2 станциях.

Включенные в абиотическую матрицу переменные стандартизованы с предварительной выборочной $\sqrt[4]{}$ -трансформацией исходных значений. По результатам сопоставления биотической (фиксированной) и абиотической (вторичной) матриц сходства проведен расчет наиболее высоких значений коэффициента ранговой корреляции Спирмана (ρ_{\max}) (программа BIOENV) [16]. По итогам расчетов была

определена комбинация из 6–7 абиотических переменных (из исходно учтенных 26), изменение которых в наибольшей степени соответствует изменению распределения плотности и видового состава диатомовых. Во всех видах последующего анализа использованы именно эти 7 наиболее значимых переменных. Для оценки вклада выделенных переменных в формирование объединенного градиента абиотических факторов в пределах акватории бухты использован ординационный анализ по методу главных компонент (МГК) [20].

По результатам кластерного и ординационного анализов сходства станций на основе абиотических переменных (мерой сходства приняты значения Эвклидова расстояния), в разных частях акватории Севастопольской бухты выделены пространственно-компактные группы станций. В пределах каждой из групп исследована структура таксоценологических комплексов, которые мы определяем как группировки диатомовых с характерной структурой, формирующиеся в разных частях исследуемой акватории. Оценка достоверности различий между выделенными *a priori* группами станций в пределах акватории проведена на основе алгоритма сравнения степени варибельности средних значений ранговых сходств (R-статистика) для комбинаций всех возможных пар станций из разных групп по сравнению с варибельностью сходств между любой парой станций одной группы (программа ANOSIM) [16].

Анализ среднего сходства внутри таксоценологических комплексов, усредненных различий между комплексами, а также вклад отдельных видов во внутрикомплексное сходство и межкомплексное различие выполнены на основе значений функций сходства (S) или отличия (D), рассчитанных как отношение абсолютных значений вклада i -го вида к стандартному отклонению (Std), (т.е. $S=S_i/Std(S_i)$ и $D=D_i/Std(D_i)$) (программа SIMPER) [16]. Наиболее значимые виды, вносящие максимальный вклад (S_i) в среднее внутрикомплексное сходство станций, названы индикационными, а ви-

ды с наибольшим вкладом в межкомплексное различие (D_i) – дискриминаторными [11].

Результаты и обсуждение. Выявление комбинаций факторов, в наибольшей степени определяющих количественное распределение диатомовых. Результаты расчета коэффициента ранговой корреляции Спирмана (ρ_{\max}) показали, что степень наибольшего соответствия биотической и абиотической матриц последо-

вательно возрастает при рассмотрении комбинаций от 1 до 6 – 7 переменных из 26, исходно введенных в анализ. Наиболее высокие значения ($\rho_{\max} = 0.574 - 0.575$) выявлены для комбинации из следующих 7 переменных: **глубина + фракция грунта 0.25 ÷ 0.1мм + Eh + Cd + Mn + ПХБ + Zn**. При рассмотрении комбинаций из большего числа переменных (8, 9 и т. д), значения ρ_{\max} постепенно снижаются (табл. 2).

Табл. 2 Наиболее высокие значения коэффициента ранговой корреляции Спирмана (ρ_{\max}) для комбинаций из разного числа переменных

Table 2 Highest values of the Spearman rank correlation index (ρ_{\max}) for different combination of environmental variables

ρ_{\max}	Переменные	Кол-во переменных
0.387	0,25 ÷ 0,1 мм	1
0.480	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм	2
0,535	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм+Cd	3
0,563	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм+Cd+Eh	4
0,569	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм+Cd+Eh+Mn	5
0,574	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм+Cd+Eh+Mn+ПХБ	6
0,575	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм+Cd+Eh+Mn+ПХБ+Zn	7
0,566	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм+Cd+Eh+Mn+ПХБ+Zn+фосфаты ПВ	8
0,558	Глубина+0,25 ÷ 0,1 мм+Cd+Eh+Mn+ПХБ+Zn+фосфаты ПВ+ХЭБ	9

С учетом полученных результатов, в дальнейший анализ по оценке влияния внешних факторов на распределение диатомовых введены только 7 вышеперечисленных ключевых абиотических переменных.

Группирование станций в зависимости от уровня выбранных абиотических факторов. Результаты иерархической кластеризации станций на основе их сходства по 7 выделенным переменным показали, что на уровне около 5 единиц Эвклидова расстояния (73 % не-сходства) всё множество станций, за исключением ст. № 24, подразделяется на 3 выраженных группы (кластера) (рис. 2).

Станции, объединенные в каждую группу, расположены пространственно компактно: группа 1 соответствует внутренней части акватории бухты, группа 2 – внешней части, а в группу 3 вошли станции централь-

ной части главной Севастопольской и Южной бухт (рис. 3).

Станция № 24 при данном уровне сходства не была отнесена ни к одной из групп, по-видимому, из-за очень высоких значений Cd ($17 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$) и Zn ($49,5 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$), а также низких значений ПХБ ($42 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$), по сравнению со средними значениями этих переменных, рассчитанными для каждой из трех групп. Усредненные значения основных абиотических и биотических переменных для трех групп станций представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что для станций, вошедших в группу 1, характерны выраженные окислительные условия в верхнем слое грунта (Eh = +102 мВ), низкое содержание Cd, Mn, а также ПХБ и ХЭБ, по сравнению с соответствующими параметрами для остальных групп станций.

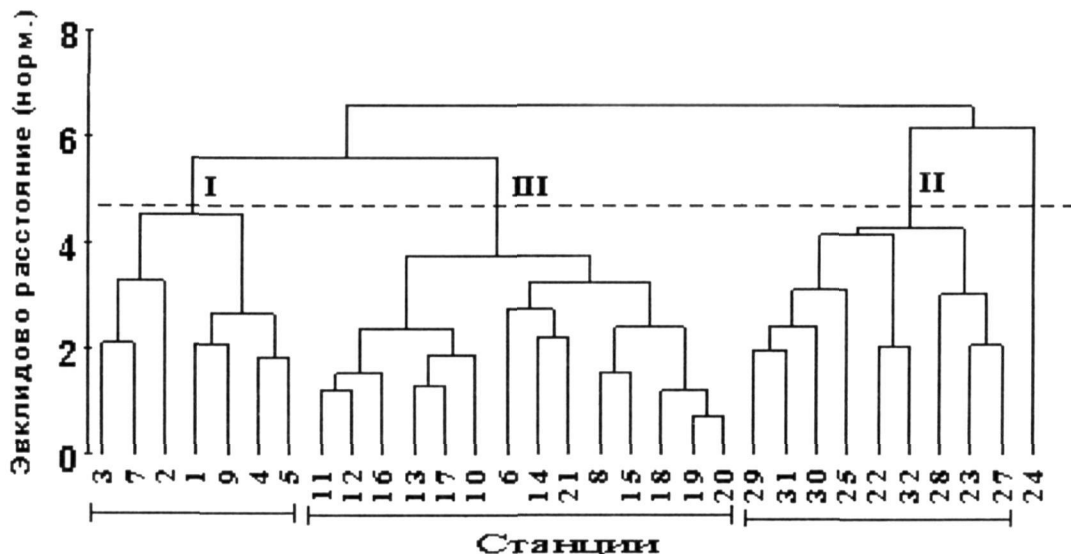


Рис. 2 Дендрограмма группирования станций, выполненных в Севастопольской бухте, на основе относительного сходства по 7 ведущим абиотическим переменным (Глубина+ фракция грунта 0,25÷0,1мм +Cd+Eh+Mn+ПХБ+Zn), наилучшим образом описывающим количественное распределение бентосных диатомовых ($\rho_{\max} = 0.575$). Группа I соответствует внутренней части акватории бухты, II – внешней части, III – центральной части главной Севастопольской и Южной бухт

Fig. 2 Dendrogram of stations grouping in Sevastopol Bay based on relative similarity from 7 key abiotic variables (Depth+ 0.25÷0.1mm size fraction of sediment +Cd+Eh+Mn+PCBs+Zn), mostly influencing ($\rho_{\max} = 0.575$) upon quantitative distribution patterns of benthic diatoms. Group I corresponds to inner part of bay, group II – outer part, and group III – central part of the Main Sevastopol Bay including the Southern Bay



Рис. 3 Пространственное расположение групп станций в Севастопольской бухте, объединенных по результатам кластерного и ординационного анализа сходства по 7 ведущим абиотическим переменным (см. рис. 2)

Fig. 3 Spatial distribution pattern the group of stations in Sevastopol Bay by results of clustering and nMDS ordination analysis based on similarity of 7 key environmental variables (see fig. 2)

Табл. 3 Средние значения ключевых абиотических переменных, показателей видового богатства и численности донных диатомовых для трех выделенных групп станций в Севастопольской бухте

Table 3 Average values of key abiotic variables, species richness and abundance indices of benthic diatoms from three distinguished group of stations in Sevastopol Bay

Параметры	Группа станций	1	2	3
Глубина, м		7,4±1,3	10,9±2,4	13,3±1,9
Фракция грунта 0,25÷0,1 мм. %		9,9±4,2	22,8±6,3	17,4±3,4
Cd, мкг·г ⁻¹		0,63±0,13	5,92±1,97	2,67±0,93
Eh, мВ		+102±22	+25±34	-78±18
Mn, мкг·г ⁻¹		6,34±1,72	14,30±2,39	6,03±1,32
ПХБ, нг·г ⁻¹		770,6±348,8	652,3±242,7	1779,4±425,5
Zn, мкг·г ⁻¹		32,16±5,26	16,30±3,00	33,74±4,13
ХЭБ, мг·г ⁻¹		0,40±0,10	0,73±0,26	1,86±0,37
Средняя численность, экз.·см ⁻²		26946±9399	38843±12424	68590±17903
Среднее число видов		43,7±5,3	57,1±4,5	61,5±5,9

Для средней части бухты, включая Южную бухту (группа 3), получены максимальные средние значения содержания ПХБ, ХЭБ, наряду с отрицательными значениями редокс-потенциала (Eh = -0.78 мВ).

Для выявления основных составляющих градиента абиотических переменных выполнен ординационный анализ станций по методу главных компонент (ГК). Результаты показали, что объединенный вклад двух первых ГК в суммарную объясненную дисперсию 7 основных абиотических переменных составляет около 65 %, а с учетом третьей ГК – объединенный вклад возрастает до 77 %. Ось ГК1 (42 %) отражает градиент изменения ПХБ и Mn с глубиной. Ось ГК2 (23 %) может быть интерпретирована как градиент окислительно-восстановительных условий, направленный противоположно изменению относительной доли алевритовой фракции в донных отложениях. Для этих переменных отмечены достаточно высокие (0,49 – 0,53) значения коэффициентов в линейной комбинации переменных, формирующих две первые ГК.

Особенности структуры таксоцены диатомовых при разном уровне выделенных абиотических факторов. Показано, что различия уровней ключевых абиотических переменных, обусловивших подразделение полигона на 3 части, определяют структурные отличия таксоцены на соответствующих участках акватории бухты.

Так, видовое богатство и средние количественные показатели развития диатомовых достигают наибольших значений на станциях группы 3 (62 вида, 68590 экз.·см⁻² соответственно), тогда как плотность поселения и число видов на станциях группы 1 (внутренняя часть акватории бухты) в среднем наиболее низки по сравнению со станциями, относящимися к средней и внешней частям акватории (см. табл. 3). У выхода из бухты (станции группы 2) средние показатели развития таксоцены занимают промежуточное положение между группами 1 и 3, составляя 38843 экз.·см⁻² и 57 видов.

Полученные в ходе данного исследования результаты показывают, что высокие значения ряда наиболее значимых токсических переменных (ПХБ, цинк, ХЭБ), а также резко восстановительные условия в мелкозернистых донных отложениях не оказывают выраженного негативного воздействия на состояние клеток диатомовых, но приводят к структурным изменениям таксоцены, а именно – к увеличению количественного развития и числа видов. Вероятно, рассмотренные токсиканты до определенных пороговых концентраций во внешней среде не оказывают подавляющего действия на состояние водорослей, а напротив, могут проявлять некоторый стимулирующий эффект.

фект вследствие аккумуляции различных химических соединений, присутствующих в абиотической компоненте водной экосистемы, и последующего их использования в метаболических процессах [4]. Уровень содержания этих соединений в донных отложениях бухты, по-видимому, не превышает критический порог, за которым происходит ингибирование ферментной системы клеточных мембран, разрушение структуры хлоропластов водорослей и угнетение фотосинтеза за счет блокирования хлорофилла [9, 14, 17].

Проведена оценка статистической достоверности выявленных отличий на основе сравнения степени вариабельности значений ранговых сходств всех пар станций по параметру численности диатомовых. Результаты показали, что достоверные различия (для уровня значимости $<0,1\%$) отмечены при попарном сравнении значений для станций групп 1 и 2 ($R_n = 0.62$), и для групп 1 и 3 ($R_n = 0.63$). Это позволяет говорить о статистически надежных различиях в структуре таксоценотического комплекса внутреннего участка бухты (группа 1) по сравнению с остальными частями полигона (группы 2 и 3). Результаты сравнения всех возможных комбинаций пар станций из групп 2 и 3 не выявили статистически достоверных различий по численности диатомовых ($R_n = 0.37$, уровень значимости 0.2%).

При сравнении особенностей структуры таксоценоза внутри каждой из трех выделенных групп станций, наиболее высокие значения среднего сходства, оцененного по коэффициенту Брэй-Куртиса, отмечены для группы 3 (61%). Во внешней части бухты (группа 2) значение среднего сходства в таксоценотическом комплексе было ниже (58%). Самый низкий коэффициент отмечен для внутренней части бухты (42%).

Степень вариабельности развития ведущих видов для каждой из выделенных групп станций оценена по показателю сходства S . Во внутренней части бухты (группа 1) наиболее значимыми видами, вносящими около 40 %

суммарного вклада во внутрикомплексное сходство станций, являются 7 видов (из общего числа 87, встреченных в этой части бухты (табл. 4).

Во внутренней части бухты доминируют *Nitzschia sigma*, *Tryblionella punctata* и *Melosira moniliformis*; их относительный вклад во внутрикомплексное сходство соответственно составляет 8.5, 8.2 и 7.9 %. Для этих же видов отмечены и наибольшие значения S (5.5, 4.0, 4.4), что указывает на их наиболее стабильные параметры развития в условиях данной части акватории. Доля вклада остальных четырех наиболее значимых видов снижается от 4.3 % у *Cocconeis scutellum* до 3.8 % у *Tabularia gaillonii*.

На станциях средней части бухты (группа 3) около 40 % кумулятивного вклада формируют 11 видов (из общего числа 106), среди которых доминируют *T. punctata*, *Diploneis smithii*, *N. sigma* и *Caloneis liber*, как по наибольшим значениям относительного вклада в среднее сходство (5.1, 4.8, 4.5, 4.4 %), так и по показателям сходства S (2.6, 5.9, 5.9, 5.4 соответственно).

Во внешней части Севастопольской бухты (группа 2) наиболее значимыми являются 9 видов (из общего числа 95), вносящих 41 % кумулятивного вклада в среднее сходство. По значениям относительного вклада и показателям S лидируют *D. smithii* (5.8 %, 6.0), *Grammatophora marina* (5.4 %, 4.6), *Rhabdonema adriaticum* (5.0 %, 2.6) *Lyrella abrupta* (4.5 %, 2.6) и *C. scutellum* (4.5%, 2.4 соответственно). Доля вклада остальных пяти видов снижается от 4.4 % у *T. punctata* до 3.6 % у *Amphora proteus*.

При сопоставлении результатов анализа, проведенного для уровня 40 % кумулятивного вклада, из 15 ведущих индикационных видов выявлено только два, общих для трех сравниваемых участков Севастопольской бухты: *T. punctata* и *C. scutellum*. В экологическом отношении они характеризуются как полигалобы, алкалифилы, α - и β -мезосапробы, эпипелики, космополиты и бореальные формы.

Табл. 4 Вклад ведущих индикационных видов в среднее сходство внутри трех выделенных групп станций в Севастопольской бухте

Table 4 Contribution of the most significant species (indicator species) into average similarity within three distinguished groups of stations in Sevastopol Bay

Вид	N , экз.·см ⁻²	S_i	S	S_i (%)
Группа 1 – среднее сходство 42 %				
<i>Nitzschia sigma</i> (Kutzing) W. Smith	3171.4	3.6	5.5	8.5
<i>Tryblionella punctata</i> W. Smith	3178.6	3.5	4.0	8.2
<i>Melosira moniliformis</i> (O. Muller) Agardh	2546.4	3.4	4.4	7.9
<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenberg	588.6	1.8	2.2	4.3
<i>Gyrosigma attenuatum</i> (Kutzing) Cleve	792.1	1.8	2.6	4.2
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow	2151.4	1.7	1.2	3.9
<i>Tabularia gaillonii</i> (Bory) Bukhtiyarova	997.1	1.6	2.1	3.8
Прочие виды				59 %
Группа 2 – среднее сходство 58 %				
<i>Diploneis smithii</i> (Brebisson) Cleve	3294.4	3.4	6.0	5.8
<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kutzing	2050.0	3.1	4.6	5.4
<i>Rhabdonema adriaticum</i> Kutzing	2587.2	2.9	2.6	5.0
<i>Lyrella abrupta</i> (Donkin) Guslyakov et Karaeva	3190.0	2.6	2.6	4.5
<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenberg	1812.2	2.6	2.4	4.5
<i>Tryblionella punctata</i> W. Smith	3667.2	2.5	1.8	4.3
<i>Diploneis vacillans</i> (A. Schmidt) Cleve	1580.0	2.3	2.1	3.9
<i>Caloneis liber</i> (W. Smith) Cleve	1950.0	2.3	1.7	3.9
<i>Amphora proteus</i> Gregory	680.0	2.1	2.1	3.6
Прочие виды				59 %
Группа 3 – среднее сходство 61 %				
<i>Tryblionella punctata</i> W. Smith	8582.9	3.1	2.6	5.1
<i>Diploneis smithii</i> (Brebisson) Cleve	6908.9	2.9	5.9	4.8
<i>Nitzschia sigma</i> (Kutzing) W. Smith	3248.2	2.7	5.9	4.5
<i>Caloneis liber</i> (W. Smith) Cleve	3719.3	2.7	5.4	4.4
<i>Melosira moniliformis</i> (O. Muller) Agardh	2970.4	2.4	3.0	4.0
<i>Tabularia gaillonii</i> (Bory) Bukhtiyarova	1166.1	2.1	4.3	3.5
<i>Navicula cancellata</i> Donkin	2870.4	2.0	1.9	3.3
<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kutzing	2235.4	1.9	2.6	3.1
<i>Lyrella abrupta</i> (Donkin) Guslyakov et Karaeva	1931.8	1.8	2.6	3.0
<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenberg	801.4	1.7	2.7	2.9
<i>Amphora proteus</i> Gregory	1753.9	1.7	2.3	2.7
Прочие виды				59 %

Примечание: N , экз.·см⁻² – средняя численность вида в комплексе; S – функция сходства; S_i – абсолютный и S_i (%) – относительный вклад i -го вида в среднее сходство Брэй-Куртиса внутри комплекса

которые обильно развиваются во всех зонах сублиторали и в массе встречаются в биотопах с повышенным уровнем антропогенного воздействия [1, 12, 15]. В то же время в каждом из рассматриваемых участков Севастопольской бухты из числа ведущих видов комплекса выявлено по одному-два «уникальных», не отмеченных в списках остальных групп. В группе 1 это *Gyrosigma attenuatum* ($S=2.6$, относительный вклад 4.2 %) и *Stephanodiscus hantzschii*

(1.2, 3.9 % соответственно). Первый из этих видов – пресноводно-солонатоводный, второй – индифферент. Для группы 2 (внешняя часть бухты) два «уникальных» вида – *Rhabdonema adriaticum* и *Diploneis vacillans* – по своим экологическим характеристикам относятся к полигалобам. Об отмеченном для группы 3 «уникальном» виде *Navicula cancellata* можно сказать, что, несмотря на упоминание о его распространении в Черном, Северном и

Средиземном морях [2, 12], в Севастопольской бухте ранее он не был отмечен как массовый [7].

Вклад отдельных видов в несходство между таксоценоотическими комплексами оценен по значениям показателя различия D . При сопоставлении выделенных комплексов наибольшие значения уровня различия станций выявлены при сравнении групп 1 и 2 ($D = 59\%$), несколько меньшие – между группами 1 и 3 ($D = 54\%$) и наиболее низкие – между группами 3 и 2 ($D = 45\%$). Довольно высокий уровень несходства между внутренней и внешней частями бухты свидетельствует о существующих отличиях в видовой структуре и количественном развитии таксоценоа диатомовых в анализируемых участках.

Наиболее значимые 12 видов-дискриминаторов дают суммарный вклад в различие между группами 1 и 2 на уровне 25 %. Доля относительного вклада этих видов снижается от 2.5 до 1.7 %, значение показателя различия D – от 2.0 до 1.1. Следующие виды можно определить как дискриминаторы сравниваемых групп станций, исходя из наибольших значений их относительного вклада и показателя D : *Rhabdonema adriaticum* (2.5 %, 2.0), *Lyrella abrupta* (2.5 %, 2.0), *Caloneis liber* (2.3 %, 1.8), *Stephanodiscus hantzschii* (2.3 %, 1.6), *Gyrosigma attenuatum* (1.6 %, 1.7), *Ctenophora pulchella* (1.5 %, 0.8 соответственно). Отметим также, что средняя численность *Stephanodiscus hantzschii*, *Gyrosigma attenuatum* (отмеченных выше как «уникальные» индикационные виды для группы 1) и *Ctenophora pulchella* достигает наибольших значений во внутренней части бухты, а в средней части – на 2 – 4-порядка ниже.

При сравнении между группами 1 и 3 выявляется сходная картина: 24 % совокупного вклада в межкомплексное различие тоже вносят 12 видов, среди которых определяются следующие виды-дискриминаторы: *Caloneis liber* (2.9 %, 2.6), *Navicula cancellata* (2.4 %, 1.8), *Diploneis smithii* (2.2 %, 2.2), *Lyrella abrupta* (2.1 %, 2.1), *Rhabdonema adriaticum* (2.1 %, 1.7 соответственно). Выше отмеченные «уникаль-

ные» индикационные виды (*Stephanodiscus hantzschii* и *Ctenophora pulchella*) так же характеризуются наивысшими значениями средней численности в группе 1 (на 2 – 4 порядка), по сравнению с группой 3.

Наименьшие структурные различия выявлены при сравнении таксоценоотических комплексов, соответствующих группам 3 и 2, что косвенно свидетельствует об относительном сходстве экологических условий между центральной и внешней частями бухты. Напомним, что сходные выводы об отсутствии статистически достоверных различий между этими биотопами были также получены в ходе оценки степени вариабельности значений ранговых сходств всех пар станций по параметру численности диатомовых (ANOSIM-тест). В данном случае ведущими видами, которые можно рассматривать в качестве дискриминаторных, выступают *Petrodictyon gemma* (2.2 %, 1.5) и *Gyrosigma attenuatum* (1.6 %, 1.5); для них различия по средней численности между сравниваемыми биотопами составляют 90 – 720 раз. Эти результаты подтверждают ранее установленный факт [13] о том, что наиболее значимые по величине относительного вклада в среднее внутрикомплексное сходство (S) ведущие индикационные виды, могут зачастую выступать и видами-дискриминаторами (по значению функции различия D). Такие виды, наряду с остальными вышеприведенными (см. табл. 4), в основном, определяют как общие особенности структурной организации каждого из выделенных таксоценоотических комплексов, так и те структурные различия между комплексами, которые могут возникать под влиянием градиента факторов внешней среды в акватории Севастопольской бухты.

Полученные данные могут свидетельствовать о заметном эколого-флористическом различии между тремя выделенными биотопами, что обусловлено, вероятно, локальными экологическими условиями в разных частях акватории бухты и разной степенью толерантности боль-

шинства индикационных видов к воздействию факторов среды, включая различные загрязнения. Ранее полученные результаты мониторинга состояния диатомовых сообщества перифитона свидетельствуют, что при длительном воздействии ПХБ изменения проявляются, в первую очередь, в структуре таксоцены. При этом наблюдается выраженное доминирование одного или немногих таксонов, тогда как в условно чистых биотопах структура таксоцены относительно выровнена, т.е. представлена многими, равновеликими по численности и встречаемости таксонами. Это предполагает, что структурные изменения в сообществе диатомовых могут выступать в качестве приемлемого индикатора загрязнений, тогда как биомасса, численность клеток или присутствие/отсутствие определенных видов не могут считаться достаточно надежными показателями для оценки воздействия токсикантов на состояние таксоцены [18].

Заключение. Результаты статистического анализа воздействия широкого набора абиотических факторов на состояние таксоцены донных диатомовых Севастопольской бухты показали следующее. **1.** Наиболее выраженное влияние на микрофитобентос оказывает сочетание следующих 7 переменных (из общего числа 26, рассмотренных в анализе): «Глубина + фракция грунта $0,25 \div 0,1$ мм + Cd + Eh + Mn + ПХБ + Zn», при учете которых отмечена наиболее высокая степень соответствия ($\rho_{\max} = 0.575$) биотической и абиотической матриц сходства. Анализ сходства станций на основе этих ключевых абиотических факторов позволил выделить в пределах бухты три участка, которые пространственно соответствуют внутренней, средней и внешней частям акватории. Данные участки различаются как по сред-

нему уровню ведущих абиотических параметров, так и по особенностям структуры выделенных таксоценологических комплексов диатомовых. Показано, что видовое богатство и количественное развитие микроводорослей в целом оказывается выше в пределах средней части акватории бухты, где в донных отложениях были отмечены наиболее неблагоприятные кислородные условия ($Eh \ll 0$) и повышенный уровень токсических соединений (ПХБ, ХЭБ, металлы). **2.** Для каждого из выделенных таксоценологических комплексов выявлены наиболее значимые виды (индикационные и дискриминаторные), определяющие как особенности структуры каждого из комплексов, так и структурные отличия между комплексами сравниваемых участков акватории. Возможно, что межкомплексные отличия в структуре таксоцены связаны с различной толерантностью дискриминаторных видов к разному уровню воздействия абиотических факторов. **3.** В заключение отметим, что оценка влияния доступного набора абиотических переменных (включая токсиканты) на бентосные микроводоросли не всегда позволяет однозначно интерпретировать полученные результаты в силу недостаточной изученности прямого и опосредованного влияния этих факторов на показатели состояния биоты.

Благодарности. Выражаем благодарность нашим коллегам Бобковой А. Н., [Нестеровой Р. А.] и Костовой С. К. (ИнБЮМ НАН Украины), а также Овсяному Е. И. и Игнатъевой О. Г. (МГИ НАН Украины) за любезно предоставленные первичные данные по ряду абиотических параметров, использованных для анализа их влияния на состояние таксоцены диатомовых. Авторы также признательны Ревкову Н. К. за ценные критические замечания при подготовке рукописи.

1. Гусяков Н. Е., Загордонец О. А., Герасимюк В. П. Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов. - Киев: Наук. думка, 1992. - 115 с.
2. Диатомовый анализ. - М.: Госгеолитиздат, 1950. - Т. 3. - 398 с.
3. Игнатъева О. Г., Овсяный Е. И., Романов А. С. и др. Комплексная оценка загрязнения донных отложений Севастопольской бухты / Системы контроля окружающей среды. 2002. Часть 2. Мониторинг и модели: Мат. докл. Междунар. науч.-техн. сем. - Севастополь, 2003. - С. 93 - 95.

4. *Капков В. И., Тришина О. А.* Содержание поливалентных металлов в промысловых макрофитах Белого моря // Гидробиол. журн. – 1990. – 26, №1. – С.71 – 75.
5. *Кондратьев С. И., Ляшенко С. В.* Особенности распределения биогенных элементов в водной толще и грунтовых водах Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2003. – 9. – С. 82 – 94.
6. *Лазоренко Г. Е.* Природный радионуклид ^{210}Pb в донных отложениях Севастопольской бухты (Черное море) // Морск. экол. журн. – 2003. – 2, № 2. – С. 81 – 84.
7. *Неврова Е. Л., Гусляков Н. Е.* Сезонная динамика бентосных диатомовых водорослей на твердых субстратах Севастопольской бухты // Экология моря. – 1988. – Вып. 30. – С. 25 – 28.
8. *Овсяный Е. И., Романов А. С., Игнатьева О. Г.* Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Морск. экол. журн. – 2003. – 2, № 2. – С. 85 – 101.
9. *Патин С. А.* Влияние металлов на морские организмы и сообщества: эколого-токсикологические аспекты глобального мониторинга // Человек и биосфера. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – Вып.3. – С. 160 – 165.
10. *Петров А. Н., Неврова Е. Л.* Влияние антропогенного пресса на структуру таксоценоза диатомовых водорослей (на примере Севастопольской бухты) / Ред. В. Н. Еремеев, А. В. Гаевская. Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (Черноморский сектор). – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – С. 288 – 302.
11. *Петров А. Н., Неврова Е. Л.* Сравнительный анализ структуры таксоценоза донных диатомовых (Bacillariophyta) в районах с различным уровнем техногенного загрязнения (Черное море, Крым) // Морск. экол. журн. – 2004. – 3, № 2. – С. 72 – 83.
12. *Прошкина-Лавренко А. И.* Диатомовые водоросли бентоса Черного моря. – М.–Л.: Изд. АН СССР. – 1963. – 243 с.
13. *Ревков Н. К., Неврова Е. Л.* Изучение особенностей структуры таксоценоза бентосных диатомовых (Bacillariophyta) с помощью методов многомерной статистики (бухта Ласпи, Черное море) // Альгология. – 2004. – 14, № 2. – С. 161 – 170.
14. Эколого-токсикологические аспекты загрязнения морской среды / Ред. С. А. Патин. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – Вып. 5. – 118 с.
15. *Bukhtiyarova L. N.* Diatoms of Ukraine. Inland waters. – Kyev, 1999. – 132 p.
16. *Clarke K. R., Warwick R. M.* Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation, 2nd edition. – PRIMER-E: Plymouth, 2001. – 154 p.
17. *Fisher N. S., Carpenter E. J., Remsen C. C., Wurster C. F.* Effects of PCB on interspecific competition in natural and gnotobiotic phytoplankton communities in continuous and batch cultures // Microb. Ecol. – 1974. – 1, № 1. – P. 39 – 50.
18. *Kostel J. A., Wang H., St. Amand A. L., Gray K. A.* Use of a novel laboratory stream system to study the ecological impact of PCB exposure in a periphytic biolayer // Water-Research. – 1999. – 33, № 18. – P. 3735 – 3748.
19. *Osadchaya T. S., Ovsyaniy E. I., Kemp R., Romanov A. S., Ignatieva O. G.* Organic carbon and oil hydrocarbons in bottom sediments of the Sevastopol Bay (the Black Sea) // Морск. экол. журн. – 2003. – 2, № 2. – С. 85 – 93.
20. Statistica for Windows (Computer Program Manual). – Tulsa, OK: StatSoft Inc., 2300 East 14th Str., Tulsa, OK 74104, 1999. – 184 p. - Web: [Http://www.statsoft.com](http://www.statsoft.com)

Поступила 23 февраля 2005 г.

Багатомірний аналіз розподілу бентосних діатомових (Bacillariophyta) у поле градієнтів абіотичних факторів у Севастопольській бухті (Чорне море, Крим). А. М. Петров, О. Л. Неврова, Л. В. Малахова. Проведено порівняльний аналіз змін видової структури і кількісного розподілу бентосних діатомових водоростей у багатомірному просторі градієнтів абіотичних перемінних, що визначають екологічну ситуацію в Севастопольській бухті. З використанням методу головних компонентів (МГК) і розрахунку коефіцієнтів рангової кореляції Спірмана (ρ) з вихідних даних, що включали 26 фізико-хімічних параметрів, була виявлена комбінація із 7 найважливіших абіотичних факторів (глибина + фракція ґрунта $0,25 \div 0,1$ мм +Cd+En+Mn+ПХБ+Zn), які найбільшою мірою визначають кількісний розподіл діатомових у біотопі. По результатам кластерного аналізу на основі подібності станцій по 7 провідним факторам, уся безліч станцій (32) була розподілена на три просторово-компактні групи, що відповідають внутрішньої (група 1), зовнішньої (група 2) та центральної частинам (група 3) акваторії Севастопольської бухти. Дані ділянки акваторії також від-

різняються по середньому рівню провідних абіотичних параметрів і по особливостям структури таксоцено-тичних комплексів діатомових. Значення видового багатства і чисельності водоростей максимальні в серед-ній частині бухти з найбільш несприятливими кисневими умовами ($Eh \ll 0$) і підвищеним рівнем токсичних сполук (поліхлорбіфеніли, нафтові вуглеводні, важкі метали) у донних відкладах. Для кожної ділянки аква-торії бухти виділені таксоценотичні комплекси і охарактеризовані найбільш значимі види (індикаційні та й дискримінаційні), що визначають особливості структури кожного з комплексів і структурні відмінності між комплексами. Висловлено припущення про те, що міжкомплексні відмінності в структурній організації так-соцена можуть бути обумовлені різною толерантністю відповідних дискримінаційних видів до впливу прові-дних абіотичних факторів (у тому числі техногенних токсикантів) у Севастопольській бухті.

Ключові слова: бентосні діатомові, Bacillariophyta, структура таксоценоу, багатомірний статистичний аналіз, антропогенний вплив, важкі метали, Чорне море

Multivariate analysis of benthic diatoms distribution across the multidimensional space of the environmental factors gradient in Sevastopol Bay (the Black Sea, Crimea). A. N. Petrov, E. L. Nevrova, L. V. Malakhova. The comparative analysis of changes in quantitative distribution pattern and species structure of benthic diatoms taxocene across multidimensional gradient of abiotic variables determinating ecological situation in Sevastopol Bay is carried out. Initial data on 26 physico-chemical parameters of silty sediments and near bottom water layer were used for analysis. Applying algorithms of PCA ordination and evaluation of Spearman rank correlation coefficient (ρ) the combination of 7 key abiotic factors (depth + 0,25÷0,1 mm size fraction of sediment + Cd + Eh + Mn + PCBs + Zn) that are mostly influencing upon quantitative distribution and diversity features of diatoms, have been revealed. On results of hierarchical clustering based on samples similarity calculated on 7 key environmental variables, all stations (32) were subdivided into 3 "space-compacted" groups, corresponding to inner (group 1), outer (group 2) and central (group 3) parts of Sevastopol Bay water area. These part of the bay are pronouncedly differed both by average level of leading environmental factors and features of diatoms taxocene structure. Species richness and density are maximal in central part of the bay, where are most adverse oxygen conditions ($Eh \ll 0$) and increased content of toxic compounds (PCBs, oil hydrocarbons and heavy metals) in silty sediments. In each of the three differently impacted locations of the bay' water area the specific taxocenotic complexes were statistically distinguished by results of clus-terization and MDS ordination techniques. Most significant species (indicating and discriminating ones), which are determining most contribution to structural similarity within each of complexes and structural dissimilarity between complexes, were revealed. The assumption was expressed that inter-complex differences in taxocene's structure can be caused by various tolerance of discriminating species to impact of leading environmental factors (including tech-nogenic toxicants) in Sevastopol Bay.

Key words: benthic diatoms, Bacillariophyta, taxocene structure, multivariate analysis, technogenic pollution, heavy metals, Black Sea