

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ENVIRONMENTS OF FISHERIES RESOURCES**

Научная статья

УДК [574.587:504.5](265.54)

DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639

EDN: FZIAEB

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАКРОЗООБЕНТОСА
ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ
ПО ОТНОШЕНИЮ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ****А.В. Мощенко, Т.А. Белан, Б.М. Борисов***Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт,
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24

Аннотация. На основе результатов многолетних наблюдений (1992–2019 гг.) при помощи иерархических моделей логистической регрессии Хаусмана-Олфа-Фреско изучено распределение 211 видов и более крупных таксонов донных животных вдоль градиента химического загрязнения грунтов (индекса *TPF*) с использованием частоты встречаемости и плотности поселения представителей макрозообентоса. Это позволило получить параметры, необходимые для классификации исследованных организмов по отношению к данному фактору: координату среднего значения кривых отклика, положение оптимума, ширину внешней и центральной ниш. С применением указанных показателей и алгоритма нечетких множеств разработана классификация, подразделяющая макрозообентос на 5 групп — крайне и сильно чувствительных, а также умеренно толерантных, толерантных и экстремально толерантных к загрязнению (соответственно ES, S, MT, T и ET). Все они по отношению к контаминации могут быть стенобионтами, стено-эврибионтами и эврибионтами. В группах ES и S преобладают стенобионты, в группах T и ET — эврибионты (оппортунисты II и I порядка), в группе MT доля разных по бионтности организмов примерно одинакова. Полученная классификация облегчает интерпретацию изменений состава и структуры донного населения на акваториях, подверженных антропогенному стрессу.

Ключевые слова: градиент загрязнения, донные отложения, залив Петра Великого, макрозообентос, кривая отклика, нечеткие множества, классификация

Для цитирования: Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Распределение и классификация макрозообентоса залива Петра Великого Японского моря по отношению к загрязнению донных отложений // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 3. — С. 623–639. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639. EDN: FZIAEB.

* Мощенко Александр Владимирович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, avtoshchenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6600-5654; Белан Татьяна Алексеевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, tbelan@ferhri.ru; Борисов Борис Михайлович, научный сотрудник, boris-borisov-54@mail.ru.

© Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М., 2022

Distribution and classification of macrozoobenthos in Peter the Great Bay of Japan Sea in relation to contamination of bottom sediments

Alexander V. Moshchenko*, Tatyana A. Belan**, Boris M. Borisov***

*, **, *** Far-Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
24, Fontannaya St., Vladivostok, 690091, Russia

* D.Biol., leading researcher, avmoshchenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6600-5654

** Ph.D., leading researcher, tbelan@ferhri.ru

*** researcher, boris-borisov-54@mail.ru

Abstract. Distribution of 211 species and larger taxa of benthic animals is considered along the gradient of chemical contamination in bottom sediments (by *TPF* index) on the data of long-term observations (1992–2019), using hierarchical Hausman-Olf-Fresco logistic regression models. Frequency of occurrence and density in settlements are used as the quantitative measures of the macrozoobenthos distribution. Parameters of the species relation to contamination are determined, as mean coordinate of the response curves, position of the optimum, and width of the outer and central niches. By these parameters, using the fuzzy sets algorithm, the taxa are classified to five groups: i) extremely sensitive; ii) highly sensitive; iii) moderately tolerant; iv) tolerant; and v) extremely tolerant to pollution (ES, S, MT, T and ET, respectively). Both stenobionts, steno-eurybionts and eurybionts are presented in each group, but the stenobionts dominate in ES and S groups and the eurybionts prevail in T and ET groups, being the opportunists of the II and I order, while the taxa of different biontity are equally presented in MT group. The classification could be used for interpretation of changes in composition and structure of macrozoobenthos in the areas subjected to anthropogenic pollution.

Keywords: gradient of contamination, bottom sediments, Peter the Great Bay, macrozoobenthos, response curve, fuzzy sets, classification

For citation: Moshchenko A.V., Belan T.A., Borisov B.M. Distribution and classification of macrozoobenthos in Peter the Great Bay of Japan Sea in relation to contamination of bottom sediments, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 3, pp. 623–639. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639. EDN: FMKCOF.

Введение

Высокий уровень контаминации прибрежных акваторий зал. Петра Великого и отсутствие выраженных тенденций к ее снижению в последнее десятилетие требуют применения эффективных методов мониторинга морской среды, позволяющих оперативно получать наглядные и легко интерпретируемые данные о ее статусе [Мощенко и др., 2019, 2021a]. В этом отношении приоритетным является контроль гидробиологических показателей (параметров макрозообентоса в нашем случае), поскольку он обеспечивает возможность прямой оценки состояния водных экосистем, испытывающих вредное влияние антропогенных факторов [Израэль, 1979]. Для разработки таких методов необходимо знать индивидуальные отклики видов на воздействие загрязнения и, соответственно, иметь классификацию животных относительно этого фактора.

М. Глемарек и С. Хайли [Glémarec, Hily, 1981; Hily, 1984; Glémarec, 1986; Hily et al., 1986; Grall, Glémarec, 1997] предложили разделять макрофауну рыхлых грунтов на 5 групп, представители которых различаются между собой по распределению вдоль градиента стрессового фактора, например концентрации органического углерода ($C_{\text{орг}}$). Первая группа включает виды, которые очень чувствительны к содержанию $C_{\text{орг}}$ и встречаются только в чистых биотопах, вторая — виды, индифферентные к росту $C_{\text{орг}}$ (в небольших количествах они всегда присутствуют без заметных изменений во времени). К третьей группе относят виды, толерантные к повышению содержания органического вещества; они встречаются и при нормальных условиях, но могут давать «вспышки» плотности при умеренном увеличении $C_{\text{орг}}$. В четвертую группу входят виды-оппортунисты 2-го порядка, в пятую — виды-оппортунисты 1-го порядка.

Данная классификация лежит в основе многих методов оценки состояния морской среды с позиций деградации и восстановления [Majeed, 1987]. В частности, на ней основано определение индексов *AMBI* и *M-AMBI* — одних из основных «инструментов», с помощью которых в ЕС оценивается экологический статус донного населения [2000/60/ЕС, 2000*; 2008/56/ЕС, 2008**; Mee et al., 2008; Van Hoey et al., 2010]. Первый из этих индексов определяется по сумме удельных плотностей указанных групп видов по отношению к содержанию $C_{\text{орг}}$ в донных отложениях, второй — на основе процедуры факторного анализа с использованием *AMBI*, индексов видового богатства Маргалефа и разнообразия Шеннона-Винера [Vorja et al., 2000, 2004; Muxika et al., 2007]. В то же время авторы этих параметров считают градиенты эвтрофикации и загрязнения идентичными, хотя нигде не акцентируют на этом внимания. Кроме того, отнесение видов к той или иной группе часто основано лишь на экспертных оценках. Адаптация этих индексов к условиям зал. Петра Великого выполнена ранее [Мощенко и др., 2021б].

Наши многочисленные наблюдения показывают, что схемы распределения величин показателей, характеризующих эвтрофикацию и химическое загрязнение, похожи, но отнюдь не тождественны. Например, коэффициент детерминации у содержания $C_{\text{орг}}$ в грунтах и уровня их химического загрязнения (индекс *TPF*) составляет всего около 58 % [Отчет..., 2021***]. Более того, в настоящее время эвтрофикация и загрязнение обусловлены действием разных факторов: для первой это терригенный сток, для второго — сток индустриальный, включая золотой разнос и прочее, что статистически доказано применением конфирматорного факторного анализа [Мощенко и др., 2019, 2021а].

Для характеристики общего уровня загрязнения грунтов ранее [Belan, Moshchenko, 2005] был предложен индекс *TPF*, представляющий собой среднюю величину суммы ранжированных концентраций углеводов, фенолов, свинца, меди и ДДТ. Эти элементы и соединения относятся к приоритетным загрязняющим веществам, а их набор для зал. Петра Великого был определен методами факторного анализа. Вдоль градиента *TPF* представители макрофауны постепенно сменяют друг друга, образуя своеобразный ряд, в котором каждый из них максимально обилен при конкретном уровне загрязнения; заканчивают этот ряд виды-оппортунисты 1-го порядка (самые «грязные» акватории) [Мощенко, Белан, 2007]. Однако к настоящему времени нами накоплен гораздо более обширный материал, включающий результаты измерений концентраций приоритетных загрязняющих веществ и наблюдений над видовым составом донной фауны, что позволяет произвести более экстенсивное исследование.

Цель работы — оценить распределение видов и более крупных таксонов макрозообентоса вдоль градиента загрязнения и на этой основе классифицировать его представителей по отношению к данному фактору, причем на максимально формализованной основе, что исключало бы привлечение субъективных оценок.

Материалы и методы

Отбор и обработка проб. В работе использованы результаты съемок ДВНИГМИ и ННЦМБ ДВО РАН (1992–2019 гг.) в зал. Петра Великого (заливы Посыета, Стрелок, Амурский и Уссурийский, акватория к северу от устья р. Туманной, прол. Босфор Восточный, бухты Рифовая, Золотой Рог и Диомид), а также данные для отдельных станций, опробованных в этом районе до 1990 г., всего 271 станция (рис. 1). Пробы

* 2000/60/ЕС. Water Framework Directive. 2000. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32000L0060> (дата обращения 10.11.2020).

** 2008/56/ЕС. Marine Strategy Framework Directive. 2008. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0056> (дата обращения 10.11.2020).

*** Отчет ФГБУ «ДВНИГМИ» Систематизированные данные по факторам среды и общим характеристикам сообществ макрозообентоса. 2021. 110 с. http://ferhri.ru/images/stories/FERHRI/NIR/Otchety/otchet_4.6.2_2021_moschenko.pdf.

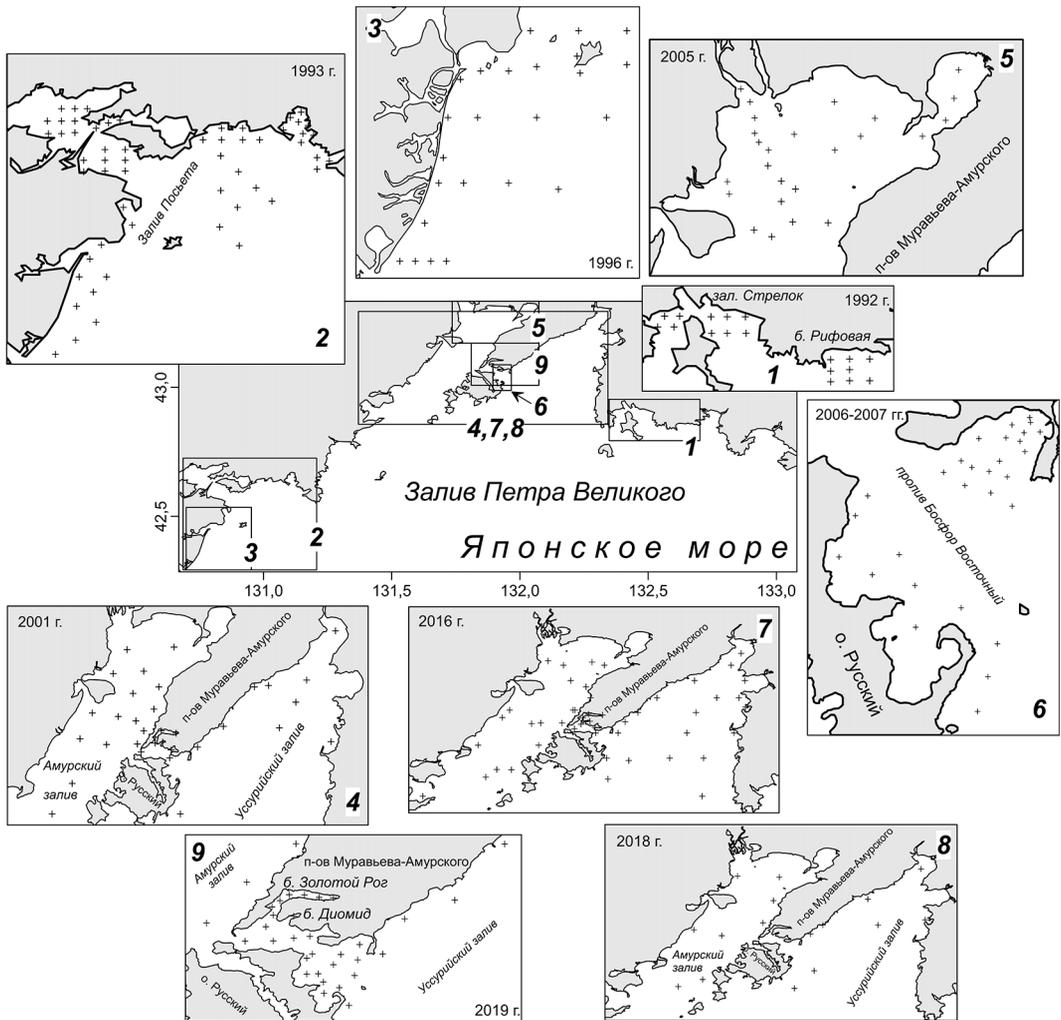


Рис. 1. Районы работ на акватории зал. Петра Великого в разные годы: *цифры* — полигоны, *крестики* — станции

Fig. 1. Areas of sampling in Peter the Great Bay in certain years: *numerals* — polygons, *crosses* — stations

грунта отбирали дночерпателем Ван-Вина (0,11 м², 1–4 пробы, всего 727 проб); на каждой станции часть верхнего слоя осадков (2–3 см) одной из проб замораживали для последующего измерения концентраций загрязняющих веществ. Для биологического анализа грунт промывали на сите с ячейей 1 мм и фиксировали остатки 4 %-ным буферным раствором формальдегида.

Концентрации Си, Рв, углеводородов, фенолов и пестицидов — суммы ДДТ и его метаболитов ДДД и ДДЭ — измеряли в лаборатории мониторинга загрязнения морских вод Приморского УГМС по стандартным методикам Росгидромета*. Таксономическая принадлежность макрозообентоса установлена сотрудниками ДВНИГМИ и ННЦМБ ДВО РАН. Животных, определенных до вида или более высокого таксономического ранга, подсчитывали и взвешивали с точностью до 0,01 г после обсушивания. Данные пересчитывали на 1 м² площади дна; в работе использованы абсолютная частота

* Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси: методические указания. РД 52.10.556-95. М.: Федер. служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. 56 с.

встречаемости и плотность поселения представителей макрозообентоса (далее — встречаемость и плотность, F_q и A).

Анализ данных. Общий уровень загрязнения характеризовали индексом $TPF = (УВ + ФЕ + Pb + Cu + \Sigma ДДТ)/5$, где УВ, ФЕ, Pb, Cu и $\Sigma ДДТ$ — 5-ранговые оценки (\ln -масштаб) содержания углеводов, фенолов, свинца, меди, суммы ДДТ и его метаболитов [Belan, Moshchenko, 2005]. Степень антропогенного нарушения бентоса оценивали методом, основанным на зависимости индекса Шеннона-Винера для двустворчатых моллюсков (H_b') от TPF [Мощенко, Белан, 2007, 2008]. Показатели этих нарушений — величины ERL_q и ERM_q ($TPF = 2,8$ и $3,2$) — ограничивают область прогрессивной деградации — почти линейного падения H_b' .

Статистический анализ. Для описания распределения макрозообентоса вдоль градиента TPF использовали иерархические модели логистической регрессии Хаусмана-Олфа-Фреско, реализованные в модуле eNOF [<https://cran.r-project.org/web/packages/eNOF/eNOF.pdf>] среды R [Huisman et al., 1993; Jansen, Oksanen, 2013; Jansen, 2022]. Считается, что эти модели позволяют наиболее гибко учитывать всю совокупность априорных ограничений и теоретических предположений, традиционно связываемых с характером кривых отклика, и, вероятно, предоставляют наилучший результат с экологической точки зрения [Шитиков, Розенберг, 2013].

Всего существует 7 типов моделей (кривых отклика — КО) возрастающей сложности. Модель I типа представляет собой «плоский ответ», означающий отсутствие тренда в обилии вида вдоль градиента фактора. КО II типа представлена монотонным сигмоидом с вершиной на одном из концов градиента, III типа — также является монотонным сигмоидом, но имеет плато ниже максимального значения обилия. Кривая IV типа обладает классической формой видового отклика — одновершинной симметричной моделью, V — унимодальной асимметричной моделью, а КО VI и VII типов характеризуются наличием двух оптимумов, причем у шестого они одинаковы. Выбор модели, описывающей распределение вида вдоль градиента фактора в наилучшей степени, производится на основе оценок стандартных отклонений и информационных критериев Акаике и Байеса. К сожалению, у этих моделей есть существенный недостаток — в выборке должно присутствовать как минимум 10 ненулевых значений. В нашем случае такое ограничение ведет к почти четырехкратному сокращению числа видов (примерно 25 %), чей отклик было бы возможно смоделировать. Поэтому для видов, найденных на 5–9 станциях, в выборку плотностей с помощью генератора случайных чисел были добавлены значения 0,1 (для $F_q = 1$) внутри диапазона встречаемости. Это увеличило число охваченных моделированием видов до 40 %.

Для классификации представителей макрозообентоса по отношению к загрязнению применяли процедуру, основанную на теории нечетких множеств (далее — НМ, метрика — евклидово расстояние)*. Этот метод использует коэффициент разделения Данна и предполагает, что каждый объект принадлежит к нескольким кластерам сразу, но «притягивается» к ним с разной силой [Шитиков, Розенберг, 2013]. Предварительно для определения приблизительного количества групп использовали различные варианты кластерного анализа [Ким и др., 1989]. Статистическую значимость разбиения на группы оценивали на основе пермутационного теста ANOSIM с вычислением общей статистики R (нулевая гипотеза H_0 — агломерация отсутствует)**.

Кроме того, в работе использованы линейный регрессионный анализ с вычислением коэффициента корреляции (r), параметров регрессии (b_i) и их статистической оценкой (ANOVA) и проверка нулевой гипотезы $H_0: r = 0$ — влияние фактора «модель» отсутствует, $b_i = 0$) [Боровиков, Боровиков, 1998]. Для проверки данных на соответствие

* Шипунов А.Б., Коробейников А.И., Балдин Е.М. Анализ данных с R (II). <https://www.inp.nsk.su/~baldin/DataAnalysis/R/R-07-datamining.pdf>.

** Statistical analysis and interpretation of marine community data: reference methods for marine pollution studies. UNEP, 1995. № 64. 75 p.

нормальному распределению и гомоскедастичности применяли тесты Шапиро-Уилка и Левене (H_0 : распределение соответствует нормальному и внутригрупповые дисперсии равны), а для трансформации результатов наблюдений — алгоритм Бокса-Кокса, реализованный в пакете 'AID' среды R [Мастицкий, Шитиков, 2014].

Результаты и их обсуждение

В период работ на изученных акваториях обнаружено 557 видов и таксонов более высокого ранга макрозообентоса. Абсолютная встречаемость в 5 раз и более наблюдалась у 211 его представителей. Для встречаемости и плотности этих животных были получены 422 кривых отклика, причем в обоих случаях преобладали модели IV типа (рис. 2). Для плотности вторыми по частоте появления были асимметричные КО V типа, третьими — двухвершинные VII типа, затем — по убывающей — модели III, II, I и VI типов. У встречаемости КО II, III и V типов наблюдались примерно с равной частотой, за ними следовали I и VII модели, КО VI типа отмечены не были. Модели I типа были обнаружены у 20 таксонов донных животных (у 5 по плотности и у 18 — по встречаемости; по обоим показателям — у полихеты *Ampharete acutifrons* и гребешка *Mizuhopecten yessoensis*). Таким образом, непригодными для дальнейшего анализа оказались 22 модели, и в результате далее рассматриваются КО 206 таксонов макрозообентоса по плотности и 193 — по встречаемости. Кривые отклика всех изученных таксонов, а также основные параметры моделей приведены в приложении (рис. 1–29, табл. 1, 2*).

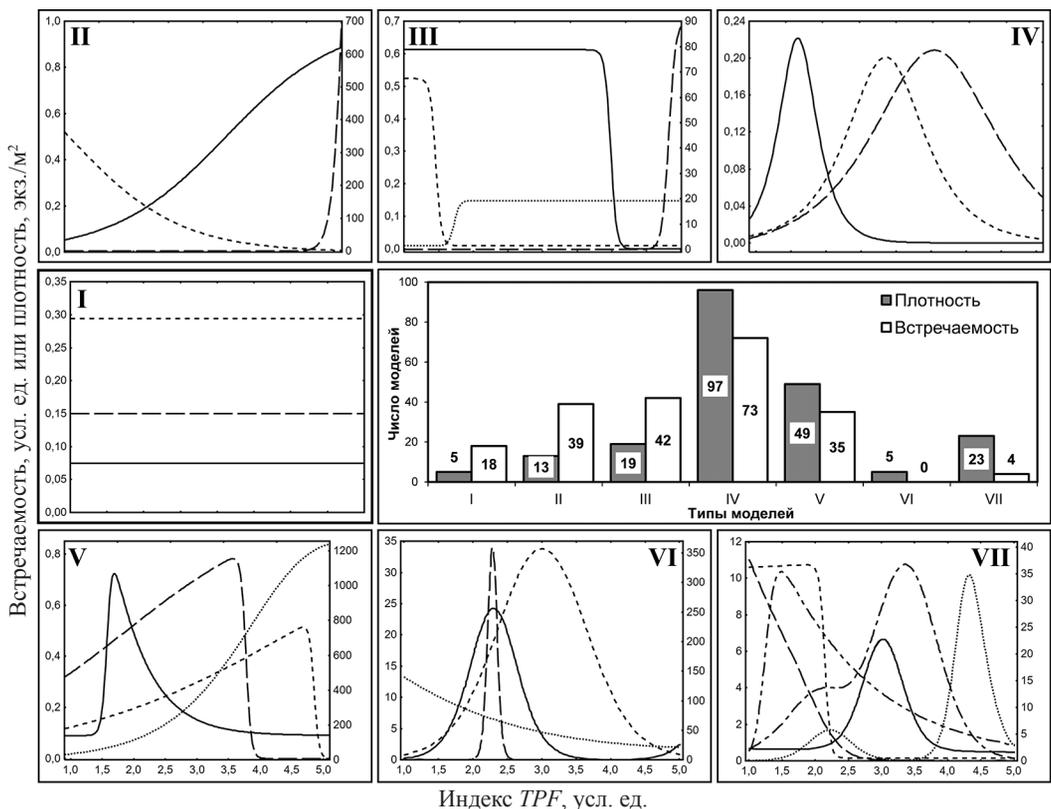


Рис. 2. Доля и количество полученных моделей — кривых отклика — для плотности поселения и встречаемости таксонов макрозообентоса: римские цифры — типы моделей

Fig. 2. Portion and number of the models (response curves) obtained for population density and occurrence of macrozoobenthic taxa: Roman numerals — types of models

* Приложение размещено на странице статьи на сайте журнала [<http://izvestiya.tinro-center.ru>] как дополнительный файл.

Кривые отклика II–VII типов весьма разнообразны. Даже КО IV типа могут быть сильно лево- или правоасимметричными, причем до такой степени, что точка, отделяющая области оптимума и субоптимума (левая или правая), отсутствует (рис. 2). У моделей III и V типов смещение точки оптимума вдоль градиента *TPF* иногда приводит к такой КО, которая могла бы быть описана моделью II типа. Самыми разнообразными являются модели VI и особенно VII типа; среди них можно выделить следующие варианты:

- 1 — выражен только один пик, как у моделей IV и V типов;
- 2 — дополнительный пик имеется, но, скорее всего, он возникает из-за специфики данных;
- 3 — модель имеет форму КО II типа и, соответственно, одну вершину;
- 4 — модель близка по форме к КО III типа;
- 5 — слабый дополнительный пик или он «слит» с основным;
- 6 — отчетливый дополнительный пик, хотя и существенно менее выраженный, чем основной.

Распределение морской звезды *Asterias amurensis* и амфиподы *Protomedeia* sp. (по F_q) вдоль градиента загрязнения представлено вторым вариантом КО, полихет *Phyllodoce groenlandica* и *Dipolydora cardalia* — четвертым и пятым. Среди КО по плотности наиболее часто встречается второй вариант, причем чаще всего дополнительный пик приходится либо на начало, либо на конец диапазона *TPF*, что делает эти модели почти идентичными таковым первого варианта. Это КО все того же *A. amurensis*, представителей семейств многощетинковых червей Capitellidae и Phyllodocidae и других полихет — *D. cardalia*, *Eteone bistriata*, *Eulalia bilineata*, *Harmothoe* sp., *Magelona pacifica*, *Nephtys caeca*, *Pherusa plumosa*, — двустворчатых моллюсков *Ennucula tenuis* и *Theora lubrica*, приапиды *Priapulius caudatus*.

К чисто первому варианту (по *A*) относятся КО двустворчатых моллюсков *Acila insignis* (VII тип модели) и *Arcuatula senhousia* (VI), кумовых раков *Diastylis alaskensis* (VII), полихет *Lumbrineris japonica* (VI), *Magelona longicornis*, *Melinna elisabethae* (VII тип), форониды *Phoronopsis harmeri* (VI). К третьему — КО двустворки *Axinopsida subquadrata* (VI), многощетинковых червей *Glycera* sp. и *Nephtys* sp., к четвертому — бивальвии *Mya arenaria*, змеехвостки *Ophiura sarsii* и полихет *Pectinaria* sp., к пятому — гастроподы *Philinopsis giglioli*, к шестому — полихет *Nereis* sp. (у всех VII тип модели). Лишь у последнего вида КО имеет отчетливый дополнительный экстремум, причем его появлению имеется четкое объяснение.

Крупная, более 10 см в длину и около сантиметра в диаметре полихета *Nereis* sp. — постоянный обитатель (несколько десятков лет) бухты Золотой Рог, наиболее загрязненной и эвтрофированной среди изученных акваторий. Однако наши материалы включают сборы и из других, гораздо более чистых районов зал. Петра Великого, причем разных лет и обработанных специалистами разных учреждений. Нереисы весьма представительны в районе исследований и не исключено, что под видом *Nereis* sp. были идентифицированы другие представители этого рода, по-иному откликающиеся на загрязнение. Например, это может быть *Nereis zonata*, оптимум КО которого явно близок таковому дополнительного пика модели *Nereis* sp. (прил. рис. 9).

Основные параметры кривых отклика, которые характеризуют распределение таксона вдоль градиента фактора среды, — это ширина внешней и центральной ниш, положение оптимума и субоптимумов (рис. 3).

Для классификации наиболее важными являются:

- среднее значение — среднее от измеренных величин *TPF* в пределах диапазона встречаемости таксона по этому параметру;
- координата оптимума, т.е. наивысшего отклика вида (максимума модели) в диапазоне *TPF*;
- координаты точек перегиба — границ между оптимумом и субоптимумом (точки, в которой выпуклая часть функции отделяется от вогнутой).

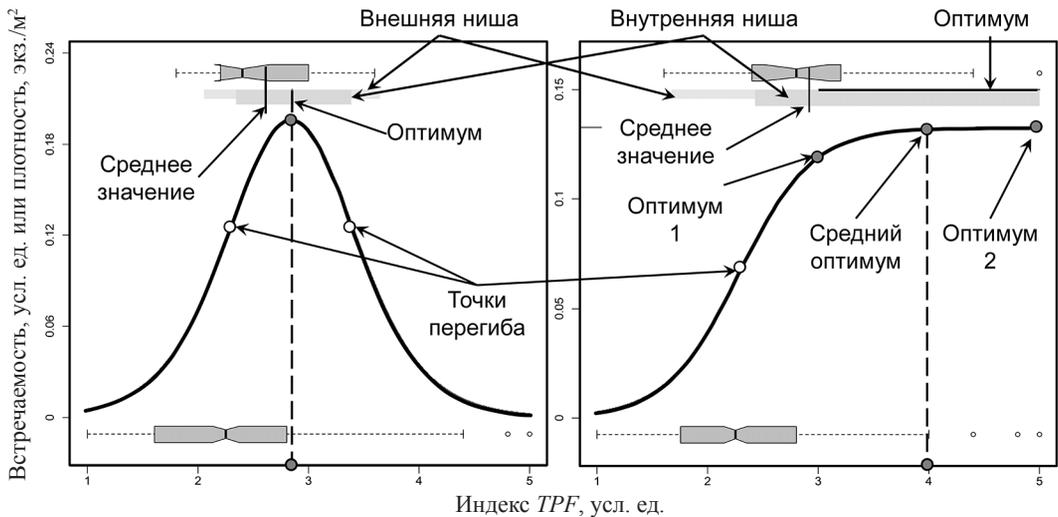


Рис. 3. Схема анализа кривых отклика и наиболее перспективные показатели
 Fig. 3. Scheme of the response curve analysis and the most perspective parameters

К сожалению, обе точки перегиба нельзя определить у сильно асимметричных моделей, причем даже IV и V типов — когда одна из них выпадает из области определения *TPF*. У моделей II и III типов такая точка вообще одна, а у VI и VII их должно быть по четыре (теоретически). Поэтому сформулировать правило выбора этого параметра для дальнейшего анализа не представляется возможным. Диапазон изменений положения точки среднего значения существенно уже, чем у оптимума, что также снижает ценность первого показателя по сравнению со вторым.

Для классификационных построений используем координаты положения средних значений и оптимумов для КО встречаемости и плотности (для моделей III типа — средний оптимум) (рис. 3). Результаты предварительного кластерного анализа указывают на наличие примерно 5 групп гидробионтов (не показано). Применение алгоритма НМ позволяет объединить животных именно в 5 кластеров, причем такое разбиение подтверждается общими и частными результатами процедуры ANOSIM (рис. 4, прил. табл. 3). В группы ES, S, MT, T и ET вошли соответственно 41, 39, 53, 41 и 16 таксонов и, таким образом, всего было расклассифицировано 190 представителей макрозообентоса; из процедуры классификации были исключены таксоны, у которых КО описываются моделью I типа. Естественно, в группах ES и ET преобладают соответственно сильно лево- и правоасимметричные модели; в кластерах S, MT и T степень смещения точки оптимума в ту или другую сторону снижается, доминируют модели IV и V типов (для F_q весьма часты и КО III типа).

На рис. 4 показаны так называемые дискриминантные линии, проведенные от руки. К сожалению, трансформация данных не позволила достигнуть соответствия нормальному распределению и гомоскедастичности, что исключило возможность применения дискриминантного анализа (результаты тестов Шапиро-Уилка и Левене после трансформации: вероятность справедливости $H_0 p = 0,000$ во всех случаях). Кроме еще одного подтверждения полученной ординации, последняя процедура дала бы возможность получить математическое выражение для классификации других таксонов при поступлении новых данных и выполнить статистическую оценку вероятности их вхождения в тот или иной кластер.

Кривые отклика, полученные на основе объединенных внутри групп данных по встречаемости и плотности (в последнем случае данные были предварительно нормализованы по наибольшим значениям), представлены II–VI типами моделей (рис. 5). Модель II типа описывает оба параметра в кластере ET, сильно асимметричные КО VI

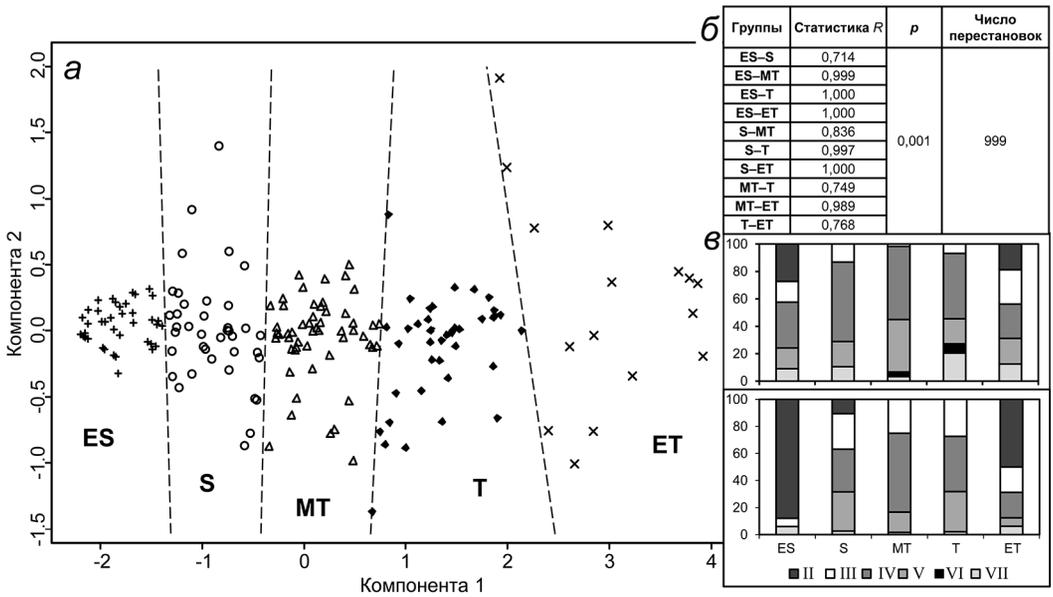


Рис. 4. Нечеткая классификация представителей макрозообентоса (а), частные результаты процедуры ANOSIM (б) и состав групп по типам моделей (в). Типы моделей обозначены римскими цифрами; компоненты объясняют 96,3 % дисперсии точек; ANOSIM: глобальная статистика $R = 0,881$, $p = 0,001$; диаграмма в: сверху — по плотности, внизу — по встречаемости

Fig. 4. Fuzzy classification of macrozoobenthic taxa (a), partial results of ANOSIM (b), and composition of the groups, by types of models (v; roman numerals — types of models, upper panel — for population density, bottom panel — for occurrence). The components explain 96.3 % of variability. ANOSIM: global statistics $R = 0.881$, $p = 0.001$

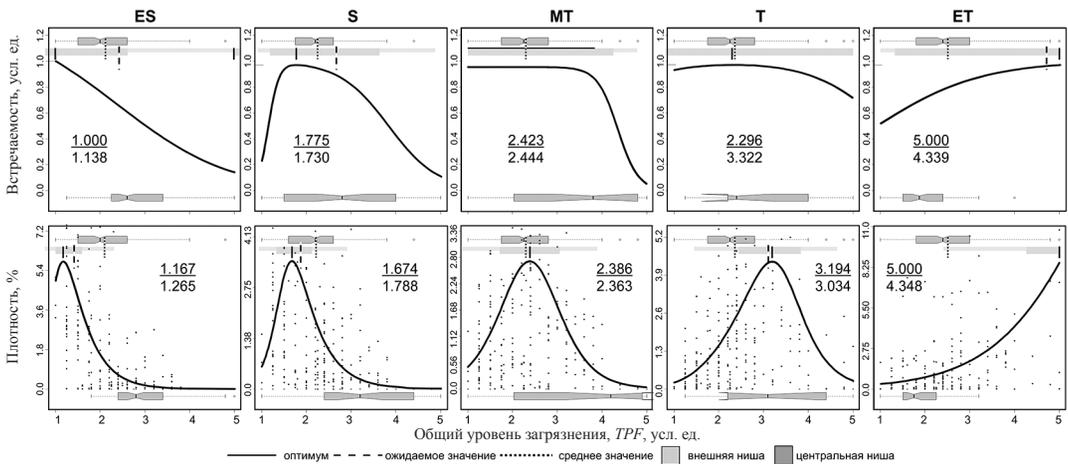


Рис. 5. Результаты классификации таксонов макрозообентоса (группы ES–ET): верхний и нижний ряды — кривые отклика, полученные на основе объединенных внутри групп данных соответственно по встречаемости и плотности. Цифры внутри диаграмм — координаты точек оптимума вдоль градиента TPF, усл. ед.: над чертой — для модели, под чертой — среднее для таксонов, включенных в группу

Fig. 5. Results of macrozoobenthic taxa classification (groups ES–ET): the top and bottom rows — response curves obtained for the data on occurrence and population density combined within groups, respectively. Numbers within diagrams — coordinates of optimum points along TPF gradient (conv. units): numerator — for model, denominator — mean value in group

и V типов наблюдаются в группе ES соответственно у встречаемости и плотности. КО кластеров S, MT и T представлены моделями IV и V типов, кроме F_q группы MT (III

тип). КО у групп ES, S и ET для F_q и A имеют близкие координаты точек оптимума. Однако у групп MT и T кривые отклика существенно различаются по форме, а у T — еще и по положению оптимумов: у F_q оно почти на единицу меньше, чем у A (даже ниже, чем его координата в группе MT). Следует отметить, что положение оптимума плотности группы T почти точно совпадает с границей окончания прогрессивной деградации донного населения — ERM_q ($TPF \approx 3,2$).

Размер ниш характеризует степень бионтности таксона: чем они уже, тем он более стенобионтен и наоборот. Ширина внешней и ширина центральной ниш, как для плотности, так и для встречаемости, заметно коррелируют друг с другом (коэффициент детерминации $r^2 = 0,762$ и $0,657$, $p = 0,000$), но форма зависимостей и наклон линий регрессии явно определяются типом модели (рис. 6). Так, соотношение ширины ниш у модели III типа в большинстве случаев близко к единице, а линия регрессии — к таковой для равенства их размеров; зависимости для КО III, IV, V и VII типов явно линейные, а для II и VI — полиномиальные или экспоненциальные. Коррелированность размеров ниш отдельно взятых типов моделей обычно больше общей: для моделей II типа r^2 составляет 0,740 и 0,761 соответственно для плотности и встречаемости, у III типа — 0,935 и 0,977, у IV — 0,974 и 0,855, у V — 0,795 и 0,760, у VI — 0,931 (только плотность), у VII — 0,644 и 0,976 ($p < 0,000$). Следует подчеркнуть, что ширина ниш слабо, хотя и статистически значимо, коррелирует с абсолютной встречаемостью ($r^2 = 0,108-0,197$, $p < 0,000$), что свидетельствует о принципиальной корректности интерполяции значений перед построением КО редких таксонов.

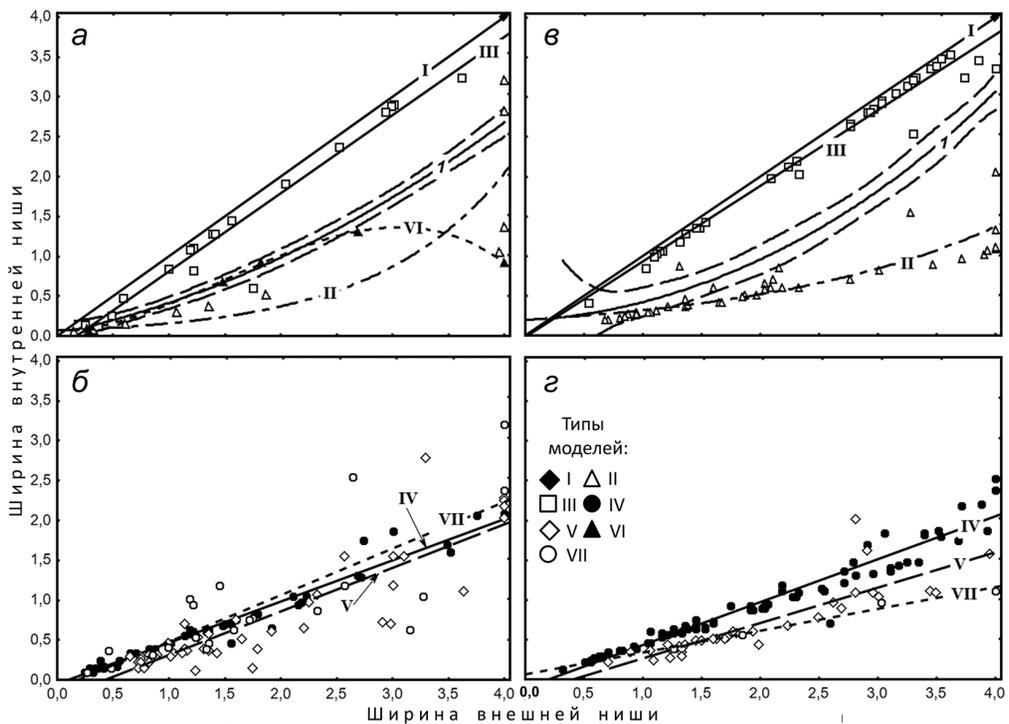


Рис. 6. Связь ширины центральной и внешней ниши, ед. TPF : а, б — плотность; в, г — встречаемость; I — все данные

Fig. 6. Relationship between widths of the central and outer niches (TPF units): а, б — population density; в, г — frequency of occurrence; I — all data pooled

Поскольку связь размеров внешней и центральной ниш велика, достаточно оставить один показатель, при этом первый из них выглядит предпочтительнее, поскольку полнее отражает встречаемость того или иного таксона вдоль градиента TPF . По размеру внешней ниши для плотности всех 211 таксонов макрозообентоса (включая КО,

описываемые моделью I типа), проранжировав ее значения на три класса, получаем 137 явных стенобионтов и по 37 — эври- и стено-эврибионтов (рис. 7). Распределение встречаемости по этим классам более равномерное — соответственно 77, 53 и 81 таксон. Такие различия связаны в основном со способностью исследованных гидробионтов давать так называемые «вспышки численности», и очень часто кривые отклика по A характеризуются наличием узкого пика, тогда как у КО по F_q он слабее выражен или отсутствует (прил. рис. 1–29). Поэтому лучше использовать градацию, основанную на ширине внешней ниши КО встречаемости.

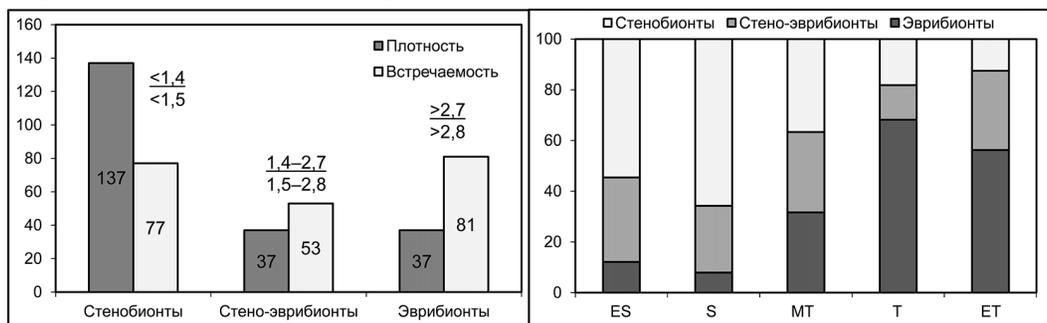


Рис. 7. Градации таксонов макрозообентоса по ширине внешней ниши (а) и состав групп по бионтичности (б): над чертой — для плотности, под чертой — для встречаемости, ед. TPF

Fig. 7. Gradation of macrozoobenthic taxa by width of outer niche (a) and composition of groups by biontity (b): numerator — for population density, denominator — for frequency of occurrence (TPF units)

Стенобионтные по отношению к загрязнению животные преобладают в группах ES и S, стено-эврибионты занимают второе место, а доля эврибионтов здесь невелика (рис. 7). В кластере MT количество разных по бионтичности представителей макрозообентоса примерно одинаково; эврибионты доминируют в группах T и ET. Таким образом, кластеры ES и S объединяют чистлюбивых (чувствительных к загрязнению), в основном стенобионтных и стено-эврибионтных животных, группа MT — умеренно толерантных к загрязнению гидробионтов, T и ET — толерантных и экстремально толерантных к загрязнению, большей частью эврибионтных, представителей донной фауны (соответственно оппортунистов II и I порядков). Большинство последних встречаются почти во всем диапазоне TPF , но получают преимущество на умеренно и сильно загрязненных участках акваторий, т.е. на фоне вырождения бентосного населения, причем оппортунисты II порядка заменяют «нормальную» фауну главным образом в пределах области прогрессивной деградации (между ERL_q и ERM_q в диапазоне TPF 2,8–3,2).

Итак, с экологической точки зрения выполненный анализ позволяет описать выделенные группы гидробионтов следующим образом (приведены наиболее часто встречающиеся таксоны).

ES. Экстремально чувствительные (абсолютно не толерантные) к загрязнению, обычно стенобионтные, реже стено-эврибионтные, изредка эврибионтные животные. Среди первых чаще всех встречаются кумовый рак *Diastylis* sp., морской еж *Echinocardium cordatum* и полихета *Ampharete sibirica*, среди вторых — офиура *Amphiodia fissa*, полихеты *Glycera* sp. и *Praxillella* sp., среди третьих — многощетинковые черви *Spiophanes bombyx*, *Praxillella gracilis* и не определенные до вида полихеты семейства мальданид.

S. Чувствительные (слабо толерантные), обычно стенобионтные, реже стено-эврибионтные, изредка эврибионтные представители макрозообентоса. К первым относятся двустворчатый моллюск *Yoldia johanni*, полихеты *Paranaitis polynoides* и амфиподы *Protomedeia* sp., ко вторым — *A. insignis*, не определенные до вида разноногие и десятиногие раки, к третьим — двустворчатый моллюск *Raeta pulchella* и гастропода *Philine* sp.

МТ. Умеренно толерантные (умеренно чувствительные), стенобионтные, стено-эврибионтные и эврибионтные организмы. Первые представлены амфиподой *Crassicorophium crassicorne* и кумовым раком *Diastylopsis dawsoni*, вторые — немертиной *Cerebratulus marginatus*, полихетой *Pholoe minuta* и капителлидами, третьи — змеехвосткой *O. sarsii*, полихетами *Scoloplos armiger* и *Goniada maculata*.

Т. Толерантные, обычно эврибионтные, реже стенобионтные и стено-эврибионтные животные (оппортунисты II порядка). Первые включают многощетинковых червей *Lumbrineris longifolia*, *Sigambra bassi*, *Scalibregma inflatum*, *Glycera capitata*, *D. cardalia*, а также *Maldane sarsi* и *E. tenuis*, вторые — *D. alaskensis*, полихету *Asabellides sibirica* и двустворчатого моллюска *Mya uzenensis*, третьи — полихет *Eumida sanguinea* и *Heteromastus giganteus*.

ЕТ. Экстремально толерантные, обычно эврибионтные, реже — стено-эврибионтные, изредка — стенобионтные организмы (оппортунисты I порядка). Среди первых чаще всего встречаются полихеты *Aphelocheata pacifica*, *Schistomeringos japonica*, *Chaetozone setosa*, *Notomastus latericeus*, *Capitella capitata*, среди вторых — *A. amurensis*, многощетинковый червь *Cheilonereis cyclurus*, двустворчатый моллюск *Macoma scarlatoi*, среди третьих — полихеты *Chone cincta* и *Pseudopotamilla* sp.

Следует подчеркнуть, что наличие стенобионтов в группах Т и ЕТ является, скорее всего, результатом недостатка данных: очень трудно представить себе таких «любителей» загрязненной среды обитания. Вся имеющаяся информация о встречаемости и бионтности отдельных таксонов макрозообентоса суммирована в приложении (табл. 3). Полученная классификация может быть полезна для экспресс-анализа уровня загрязнения среды, причем для опытного специалиста по макрозообентосу — даже в полевых условиях. Кроме того, она отражает закономерную, последовательную и постепенную смену донной фауны вдоль градиента загрязнения: начинают его чистолюбивые стенобионты, а заканчивают — оппортунистические эврибионтные виды. Последнее, несомненно, является важным для интерпретации пространственно-временной изменчивости сообществ донных животных. Необходимо подчеркнуть, что такая реакция, причем довольно тонкая, не может быть объяснена только с позиции чувствительности и толерантности животных к загрязнению (например, наличие эврибионтов в группах ES и S), большую роль здесь должны играть внутривидовые взаимодействия, например эдафические. Понять или хотя бы слегка прояснить эту систему координаций можно только на основе выявления сообществ бентоса и анализа структуры взаимосвязей внутри такого рода агломераций*.

Проиллюстрируем использование полученной классификации примером изменений сообществ макрозообентоса в прибрежной зоне Владивостока (прил. рис. 30).

В сильно поврежденных местообитаниях — бухтах Золотой Рог и Диомид — сообщество донных животных весьма стабильно, но представлено только экстремально толерантными по отношению к загрязнению эврибионтными видами-оппортунистами I порядка. Данная ассоциация находится в экологически плохом или обедненном состоянии и является «физически контролируемой»* на фоне крайне высокой концентрации $C_{\text{орг}}$ и «закритических» значениях $TPF (>> ERM_q)$; прил. рис. 30). Это группировка полихет *A. pacifica* + *C. capitata*, к которым в разные годы добавляются другие многощетинковые черви — *Sch. japonica*, *Nereis* sp., *C. cincta*, *C. cyclurus*.

По соседству, в прол. Босфор Восточный, обитает сообщество, практически не имеющее постоянного состава доминантных (титульных) видов, среди которых облигат-

* Отчет ФГБУ «ДВНИГМИ» Предложения по установлению граничных критериев для оценки классов состояния морской среды на базе одного или комплекса биологических параметров с учетом передового международного опыта. 2020. 167 с. http://ferhri.ru/images/stories/ FERHRI/NIR/Otchet/otchet_462_moschenko.pdf.; Отчет ФГБУ «ДВНИГМИ» Систематизированные данные по факторам среды и общим характеристикам сообществ макрозообентоса. 2021. 110 с. http://ferhri.ru/images/stories/ FERHRI/NIR/Otchet/otchet_4.6.2_2021_moschenko.pdf.

ным является только толерантный по отношению к загрязнению оппортунистический (II порядка) многощетинковый червь *L. longifolia*. В разные годы пролив населяли группировки гастропод и двустворчатых моллюсков *Philine argentata* + *M. scarlatoi* (2001 г.), *O. sarsii* + *A. pacifica* (2016 г.), *L. longifolia* + *O. sarsii* + *M. sarsi* и *L. longifolia* + *M. scarlatoi* (2019 г.). Большинство из них являются эврибионтными животными, а их отношение к уровню загрязнения обычно не ниже толерантного (кроме *O. sarsii*). Показатель экологического стресса этих сообществ заметно меняется из года в год, отражая их «разбалансированное», или переходное, состояние. Развитие той или иной группировки, судя по изменению комплекса факторов, «провоцируется» изменениями в эвтрофикации (содержании $C_{\text{орг}}$), а увеличение уровня загрязнения ответственно за добавление к доминантам видов-оппортунистов I порядка — *A. pacifica*, *Sch. japonica*, — других многощетинковых червей — *N. latericeus* — и иных животных сходной экологической валентности.

В этом отношении интересно массовое развитие *S. armiger*, отмеченное на этой акватории в 2016 и 2019 гг., в период наибольшей эвтрофикации, который был малозаметен в начале тысячелетия. Этот вид дает вспышки плотности при умеренном повышении содержания $C_{\text{орг}}$, но по отношению к загрязнению относится к умеренно-толерантным эврибионтным организмам. Вспышка численности другого массового вида — *O. sarsii*, такого же, как и *S. armiger*, по отношению к загрязнению, но индифферентного в отношении $C_{\text{орг}}$ — наблюдалась в 2016 г., но к 2019 г. его обилие снизилось в разы, и он исчез из группы видов, доминантных по плотности. Судя по всему, изменения обилия перечисленных и многих других видов демонстрируют так называемые волны жизни, причиной которых являются главным образом изменения факторов среды, в данном случае — загрязнения и эвтрофикации.

Относительно стабильные «биологически сбалансированные» сообщества с хорошим экологическим статусом формируются при докритических TPF ($< ERL_d$), невысоких концентрациях $C_{\text{орг}}$ в слегка нарушенных биотопах Амурского и Уссурийского заливов. Обязательные доминанты здесь представлены все теми же *L. longifolia* и *O. sarsii*, дважды в число таких видов входили *S. armiger* и *M. sarsi*. При этом на фоне последовательного снижения содержания $C_{\text{орг}}$ появлялись все более чистлюбивые таксоны — *A. insignis* и немертины (последние — по кривой отклика для плотности, по встречаемости отклик отсутствует — прил. рис. 9, 23).

В период 2001–2019 гг. в бухтах Золотой Рог и Диомид, судя по снижению индекса $AMBI$ и увеличению $M-AMBI$, было отмечено некоторое улучшение экологического состояния среды обитания и статуса самого донного населения [Мощенко и др., 2021б]. Однако о реальном начале очищения этой акватории можно будет говорить лишь при появлении и массовом развитии оппортунистов II порядка, и прежде всего, *L. longifolia*, встречаемость которого в настоящее время ограничена акваторией прол. Босфор Восточный.

Таким образом, изменение содержания $C_{\text{орг}}$, скорее всего, является своего рода «сигналом» к изменению состава доминантов, а химическое загрязнение ограничивает пределы этих вариаций в соответствии с толерантностью животных к этому фактору. Естественно, первыми на изменения среды обитания откликаются наиболее эврибионтные животные, способные в короткий период времени «освоить» пригодные для них новые экологические ниши.

Заключение

Исследование распределений встречаемости и плотности поселения 211 видов и таксонов более высокого ранга макрозообентоса вдоль градиента TPF при помощи моделей eNOF позволило получить параметры, необходимые для классификации донных животных по отношению к фактору общего загрязнения. Данными параметрами являются координаты среднего значения кривых отклика и положение оптимума,

ширина внешней и центральной ниш. На основе перечисленных показателей и с использованием алгоритма нечетких множеств была разработана классификация, которая подразделяет макрозообентос на 5 групп — крайне и сильно чувствительных, а также умеренно толерантных, толерантных и экстремально толерантных к загрязнению (соответственно ES, S, MT, T и ET). Все они по отношению к контаминации могут быть стенобионтами, стено-эврибионтами и эврибионтами. В группах ES и S преобладают стенобионты, в группах T и ET — эврибионты (оппортунисты II и I порядка), в группе MT доля разных по бионтности организмов примерно одинакова. Полученная классификация облегчает интерпретацию изменений состава и структуры донного населения на акваториях, подверженных антропогенному стрессу. Методика, использованная при ее получении, может быть применена для ординации любых организмов по отношению к любым факторам среды — глубине, содержанию алевропелитов, концентрациям растворенного кислорода и другими.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы благодарны рецензентам за ценные замечания, которые были учтены при подготовке настоящей рукописи к печати.

The authors are grateful to the reviewers for valuable comments, which were taken into account when preparing this manuscript for publication.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study had no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных соблюдены.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed.

The authors state that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Все авторы принимали участие в получении и первичной обработке данных, обсуждении полученных результатов и редактировании текста рукописи; статистическая обработка и написание текста — А.В. Мощенко.

All authors took part in data collection and primary processing and discussed results of the study; statistical processing of the data and writing of the text were done by A.V. Moshchenko.

Список литературы

Боровиков В.П., Боровиков И.П. STATISTICA® — Статистический анализ и обработка данных в среде Windows® : моногр. — М. : Инф.-издат. дом «Филинь», 1998. — 608 с.

Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды : моногр. — Л. : Гидрометеоиздат. 1979. — 375 с.

Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ : пер. с англ. : моногр. — М. : Финансы и статистика, 1989. — 215 с.

Мастицкий С.Э., Шитиков В.К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R : моногр. — Хайдельберг ; Лондон ; Тольятти : 2014. — 401 с. <http://r-analytics.blogspot.com>.

Мощенко А.В., Белан Т.А. Метод оценки антропогенного нарушения сообществ макрозообентоса рыхлых грунтов // Биол. моря. — 2008. — Т. 34, № 4. — С. 279–292.

Мощенко А.В., Белан Т.А. Новые методы оценки экологического состояния природной среды Дальневосточных морей России // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. — Владивосток : Дальнаука, 2007. — С. 276–313.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Основные тенденции временного хода концентраций приоритетных поллютантов в осадках прибрежных акваторий Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2021а. — Т. 201, вып. 2. — С. 440–457. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-440-457.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Адаптация метода оценки качества морской среды по данным биологического анализа на основе индексов АМБИ и М-АМБИ для залива Петра Великого Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. — 2021б. — Вып. 156. — С. 142–181.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Современное загрязнение донных отложений и экологическое состояние макрозообентоса в прибрежной зоне Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 196. — С. 155–181. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196-155-181.

Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R : моногр. — Тольятти : Кассандра, 2013. — 314 с.

Belan T.A., Moshchenko A.V. Polychaete taxocenosis variability associated with sediment pollution loading in the Peter the Great Bay (the East Sea/Japan Sea) // Ocean Science J. — 2005. — Vol. 40, № 1. — P. 1–10.

Borja Á., Franco J., Muxika I. The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools // Mar. Pollut. Bull. — 2004. — Vol. 48, № 3–4. — P. 405–408.

Borja Á., Franco J., Perez V. A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments // Mar. Pollut. Bull. — 2000. — Vol. 40, № 12. — P. 1100–1114.

Glémarec M. Ecological impact of an oil-spill: utilization of biological indicators // Water Sci. Technol. — 1986. — Vol. 18, Iss. 4–5. — P. 203–211.

Glémarec M., Hily C. Perturbations apportées à la macrofaune benthique de la baie de Concarneau par les effluents urbains et portuaires // Acta Oecologica Oecologia Applicata. — 1981. — Vol. 2. — P. 139–150.

Grall J., Glémarec M. Using Biotic Indices to Estimate Macrobenthic Community Perturbations in the Bay of Brest // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 1997. — Vol. 44 (Supplement A). — P. 43–53. DOI: 10.1016/S0272-7714(97)80006-6.

Hily C. Variabilité de la macrofaune benthique dans les milieux hypertrophiques de la Rade de Brest. These de Doctorat d'Etat, Univ. Bretagne Occidentale. — 1984. — Vol. 1–2.

Hily C., Le Bris H., Glemarec M. Impacts biologiques des emissaires urbains sur les ecosistemas benthiques // Oceanis. — 1986. — Vol. 12. — P. 419–426.

Huisman J., Olf H., Fresco L.F.M. A hierarchical set of models for species response analysis // J. Vegetation Science. — 1993. — Vol. 4, Iss. 1. — P. 37–46. DOI: 10.2307/3235732.

Jansen F. Hierarchical species response curves in package eHOF. — 2022. — 7 p. <https://cran.r-project.org/web/packages/eHOF/vignettes/eHOF.pdf>.

Jansen F., Oksanen J. How to model species responses along ecological gradients — Huisman–Olf–Fresco models revisited // J. Vegetation Science. — 2013. — Vol. 24, Iss. 6. — P. 1108–1117. DOI: 10.1111/jvs.12050.

Majeed S.A. Organic matter and biotic indices on the beaches of north Brittany // Mar. Pollut. Bull. — 1987. — Vol. 18, № 9. — P. 490–495. DOI: 10.1016/0025-326X(87)90360-2.

Mee L.D., Jefferson R.L., Laffoley D.d'A., Elliott M. How good is good? Human values and Europe's proposed Marine Strategy Directive // Mar. Pollut. Bull. — 2008. — Vol. 56, № 2. — P. 187–204. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2007.09.038.

Muxika I., Borja Á., Bald J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive // Mar. Pollut. Bull. — 2007. — Vol. 55, № 1–6. — P. 16–29.

Van Hoey G., Borja A., Birchenough S. et al. The use of benthic indicators in Europe: From the Water Framework Directive to the Marine Strategy Framework Directive // Mar. Pollut. Bull. — 2010. — Vol. 60, Iss. 12. — P. 2187–2196. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.09.015.

References

- Borovikov, V.P. and Borovikov, I.P.**, *STATISTICA. Statisticheskii analiz i obrabotka dannykh v srede Windows* (STATISTICA. Statistical Analysis and Data Processing in the Windows Environment), Moscow: Filin, 1998.
- Israel, Yu.A.**, *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoy sredy* (Ecology and control of the state of the natural environment), Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979.
- Kim, J.-O., Mueller, C.W., Klekka, W.R., Oldenderfer, M.S., and Blashfield, R.K.**, *Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz* (Factor, discriminant and cluster analysis: trans. from English), Moscow: Finansy i statistika, 1989.
- Mastitsky, S.E. and Shitikov, V.K.**, *Statisticheskii analiz i vizualizatsiya dannykh s pomoshch'yu R* (Statistical Analysis and Data Visualization with R), Khaidelberg; London; Tolyatti: 2014. <http://r-analytics.blogspot.com>. Cited January, 25, 2022.
- Moshchenko, A.V. and Belan, T.A.**, Method for the appraisal of anthropogenic disturbance of macrozoobenthic communities of soft substrata, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 235–248.
- Moshchenko, A.V. and Belan, T.A.**, New methods of assessment of ecological condition of the natural environment in the Far Eastern seas of Russia, in *Dinamika morskikh ekosistem i sovremennye problemy sokhraneniya biologicheskogo potentsiala morei Rossii* (Dynamics of Marine Ecosystems and the Current Problems of Conservation of the Biological Potential of the Russian Seas), Vladivostok: Dal'nauka, 2007, pp. 276–313.
- Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Lishavskaya, T.S., Sevastianov, A.V., and Borisov, B.M.**, Main tendencies of temporal changes for concentration of priority pollutants in sediments of the coastal areas at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 201, no. 2, pp. 440–457. doi 10.26428/1606-9919-2021-201-440-457
- Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., Lishavskaya, T.S., and Sevastyanov, A.V.**, Adaptation of the method of appraisal of marine environment quality using biological data analysis at the base of *AMBI* and *M-AMBI* indices for Peter the Great Bay (Sea of Japan), *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2021, vol. 156, pp. 142–181.
- Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., Lishavskaya, T.S. and Sevastianov, A.V.**, Modern contamination of bottom sediments and ecological state of macrozoobenthos in the coastal zone at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 196, pp. 155–181. doi 10.26428/1606-9919-2019-196-155-181
- Shitikov, V.K. and Rozenberg, G.S.**, *Randomizatsiya i butstrep: statisticheskii analiz v biologii i ekologii s ispol'zovaniem R* (Randomization and Bootstrap: Statistical Analysis in Biology and Ecology Using R), Tolyatti: Cassandra, 2013.
- Belan, T.A. and Moshchenko, A.V.**, Polychaete taxocenes variability associated with sediment pollution loading in the Peter the Great Bay (the East Sea/Japan Sea), *Ocean Sci. J.*, 2005, vol. 40, no. 1, pp. 1–10.
- Borja, Á., Franco, J., and Muxika, I.**, The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools, *Mar. Pollut. Bull.*, 2004, vol. 48, no. 3–4, pp. 405–408.
- Borja, Á., Franco, J., and Perez, V.**, A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments, *Mar. Pollut. Bull.*, 2000, vol. 40, no. 12, pp. 1100–1114.
- Glémarec, M.**, Ecological impact of an oil-spill: utilization of biological indicators, *Water Sci. Technol.*, 1986, vol. 18, no. 4–5, pp. 203–211.
- Glémarec, M. and Hily, C.**, Perturbations apportées à la macrofaune benthique de la baie de Concarneau par les effluents urbains et portuaires, *Acta Oecologica Oecologia Applicata*, 1981, vol. 2, pp. 139–150.
- Grall, J. and Glémarec, M.**, Using Biotic Indices to Estimate Macrobenthic Community Perturbations in the Bay of Brest, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, vol. 44, Supplement A, pp. 43–53. doi 10.1016/S0272-7714(97)80006-6
- Hily, C.**, *Variabilité de la macrofaune benthique dans les milieux hypertrophiques de la Rade de Brest*, *These de Doctorat d'Etat*, Univ. Bretagne Occidentale, 1984, vol. 1-2.
- Hily, C., Le Bris, H., and Glemarec, M.**, Impacts biologiques des emissaires urbains sur les ecosistemas benthiques, *Oceanis*, 1986, vol. 12, pp. 419–426.
- Huisman, J., Olf, H., and Fresco, L.F.M.**, A hierarchical set of models for species response analysis, *J. Vegetation Science*, 1993, vol. 4, no. 1, pp. 37–46. doi 10.2307/3235732
- Jansen, F.**, *Hierarchical species response curves in package eHOF*, 2022. <https://cran.r-project.org/web/packages/eHOF/vignettes/eHOF.pdf>. Cited January, 25, 2022.

Jansen, F. and Oksanen, J., How to model species responses along ecological gradients — Huisman–Olf–Fresco models revisited, *J. Vegetation Science*, 2013, vol. 24, no. 6, pp. 1108–1117. doi 10.1111/jvs.12050

Majeed, S.A., Organic matter and biotic indices on the beaches of north Brittany, *Mar. Pollut. Bull.*, 1987, vol. 18, no. 9, pp. 490–495. doi 10.1016/0025-326X(87)90360-2

Mee, L.D., Jefferson, R.L., Laffoley, D.d’A., and Elliott, M., How good is good? Human values and Europe’s proposed Marine Strategy Directive, *Mar. Pollut. Bull.*, 2008, vol. 56, no. 2, pp. 187–204. doi 10.1016/j.marpolbul.2007.09.038

Muxika, I., Borja, A., and Bald, J., Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive, *Mar. Pollut. Bull.*, 2007, vol. 55, nos. 1–6, pp. 16–29.

Van Hoey, G., Borja, A., Birchenough, S., Buhl-Mortensen, L., Degraer, S., Fleischer, D., Kerckhof, F., Magni, P., Muxika, I., Reiss, H., Schröder, A. and Zettler, M.L., The use of benthic indicators in Europe: From the Water Framework Directive to the Marine Strategy Framework Directive, *Mar. Pollut. Bull.*, 2010, vol. 60, no. 12, pp. 2187–2196. doi 10.1016/j.marpolbul.2010.09.015

2000/60/EC. Water Framework Directive, 2000, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32000L0060>. Cited January, 25, 2022.

2008/56/EC. Marine Strategy Framework Directive, 2008, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0056>. Cited January, 25, 2022.

Otchet FGBU “DVNIGMI” Sistematizirovannye dannye po faktoram sredy i obshchim kharakteristikam soobshchestv makrozoobentosa” (Report of FGBU “FERING MIR” Systematized data on environmental factors and general characteristics of macrozoobenthos communities), 2021, http://ferhri.ru/images/stories/FERHRI/NIR/Otchety/otchet_4.6.2_2021_moschenko.pdf. Cited January, 25, 2022.

Opredeleniye zagryaznyayushchikh veshchestv v probakh morskikh donnykh otlozheniy i vzvesi : metodicheskiye ukazaniya. RD 52.10.556-95 (Determination of pollutants in samples of marine bottom sediments and suspended matter: guidelines. RD 52.10.556-95), Moscow: Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 1996.

Shipunov, A.B., Korobeinikov, A.I., and Baldin, E.M., *Analiz dannykh s R (II)* (Data analysis with R(II)), <https://www.inp.nsk.su/~baldin/DataAnalysis/R/R-07-datamining.pdf>. Cited January, 25, 2022.

Statistical analysis and interpretation of marine community data: reference methods for marine pollution studies, Nairobi: UNEP, 1995, no. 64.

Otchet FGBU «DVNIGMI» Predlozheniya po ustanovleniyu granichnykh kriteriyev dlya otsenki klassov sostoyaniya morskoy sredy na baze odnogo ili kompleksa biologicheskikh parametrov s uchetom peredovogo mezhdunarodnogo opyta (Report of FGBU “FERNIGMI” Proposals for establishing boundary criteria for assessing the state of the marine environment on the basis of one or a set of biological parameters, taking into account international best practices), 2020, http://ferhri.ru/images/stories/FERHRI/NIR/Otchety/otchet_462_moschenko.pdf. Cited January, 25, 2022.

Поступила в редакцию 7.06.2022 г.

После доработки 27.07.2022 г.

Принята к публикации 1.09.2022 г.

The article was submitted 7.06.2022; approved after reviewing 27.07.2022;

accepted for publication 1.09.2022