

УДК 574.587:556.541.47(265.54)

Ю.А. Галышева¹, А.А. Сомов^{2*}

¹ Дальневосточный федеральный университет,
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8;

² Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

ЗАВИСИМОСТЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКРОБЕНТОСА ОТ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МОРСКОЙ СРЕДЕ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Предложен комплексный индекс содержания органики в среде (КИСОС). Проведена оценка зависимости индекса разнообразия Шеннона и трофической структуры от КИСОС. Установлен диапазон значений данного индекса, которому соответствуют максимальные показатели разнообразия и благополучия трофической структуры. Предложена градация экологического благополучия акваторий в отношении содержания органического вещества на три уровня.

Ключевые слова: Японское море, прибрежная морская зона, органическое вещество, макробентос, биологическое разнообразие, трофическая структура, моделирование.

Galysheva Yu.A., Somov A.A. Dependence of ecological characteristics of macrobenthos on content of organic matter in the coastal zone of the Japan Sea // *Izv. TINRO*. — 2014. — Vol. 176. — P. 233–239.

Inflow and accumulation of organic matter in the bays at Russian coast of the Japan Sea are evaluated using the data on chemical parameters of seawater and total content of carbon in the bottom sediments. Complex index of organic content in the environment (CIOCE) is proposed. Shannon diversity index (I) and the index of trophic structure disturbance (ITSD) are assessed for macrobenthos of these areas and compared with CIOCE; non-linear parabolic dependence is revealed with the 90 % confidence level. The value of CIOCE ecological optimum (when macrobenthos has the highest species diversity and healthy trophic structure) is determined as 1.5–2.5; both higher and lower CIOCE values cause reduction of species diversity and disturbance of trophic structure that means that the organic matter supply is favorable for macrobenthos until a certain threshold.

Key words: organic matter, coastal zone, Japan Sea, macrobenthos, biological diversity, trophic structure, modeling.

Введение

Известно, что антропогенное воздействие нарушает физические и химические параметры морской среды, вносит чужеродные для природных систем соединения и

* Галышева Юлия Александровна, кандидат биологических наук, заведующая кафедрой, доцент, e-mail: marinec09@rambler.ru; Сомов Алексей Александрович, инженер, e-mail: alekseysomoff@gmail.com.

Galysheva Yulia A., Ph.D., head of department, senior lecturer, e-mail: marinec09@rambler.ru; Somov Alexey A., engineer, graduate student, e-mail: alekseysomoff@gmail.com.

образует высокие, не свойственные природе концентрации многих веществ в локальных участках прибрежных морских районов. В результате антропогенного загрязнения в морские воды поступают токсичные вещества (хлорированные углеводороды, соединения тяжелых металлов и др.), фенолы и детергенты, радионуклиды. Однако в настоящее время наиболее масштабное поступление и наиболее интенсивное накопление в прибрежных морских экосистемах в зонах с развитой инфраструктурой наблюдаются для органического вещества хозяйственно-бытового происхождения, поступающего с коммунальными стоками, и нефтяного органического загрязнения крупных портовых городов.

Следует отметить, что органическое вещество (ОВ) присутствует в водной среде в растворенном и взвешенном виде, а также накапливается в донных отложениях в составе детрита. В районах с развитой инфраструктурой бытовые сточные воды оказывают существенное влияние на обогащение морской среды ОВ: речной сток с хозяйственно-урбанизированных территорий, сток с суши, сброс фановых и льяльных вод судов, интенсивная рекреационная нагрузка на побережье. Кроме сточных вод, значительным источником поступления антропогенной органики является морской гражданский и военный флот, а также транспортировка и (в меньшей степени) добыча нефтеуглеводородов.

За последнее десятилетие особенно ярко проявились признаки отягощения природной среды производственными и другими отходами, в составе которых в океан поступает много самых разнообразных органических веществ. Сосредоточение людей в прибрежной зоне вызывает увеличение концентраций органических соединений в воде. Так, в территориальных морских водах России повышенные концентрации соединений фосфора и азота начиная с 80-х гг. XX в. регулярно отмечают в Балтийском, Черном морях, а также в зал. Петра Великого Японского моря (Миронов и др., 1999; Максимов, 2006). Накопление ОВ медленно и незаметно запускает механизм трансформации природных сообществ. Принято считать, что поступление любых веществ в природные объекты непременно негативно отразится на их обитателях. Но, как известно, природные системы имеют механизм, обеспечивающий их устойчивость. ОВ является лимитирующим фактором для функционирования водоемов, определяющим разнообразие и структуру сообществ, и во многих природных системах (в силу естественных условий) это разнообразие далеко от максимально возможного по причине недостаточности питания. Однако перенасыщение среды акваторий органическими соединениями является причиной сокращения разнообразия видов и изменения выравненности их видов по обилию.

В работе поставлена цель оценить общий уровень содержания органического вещества в морской среде прибрежной зоны российской части Японского моря и сделать попытку моделирования изменений структурных характеристик макробентоса в связи с изменением содержания органики в среде.

Материалы и методы

В основу разрабатываемой модели положен расчет *Комплексного индекса содержания органики в среде — КИСОС*. При расчете данного индекса использовали известные значения параметров водной среды и донных отложений бухт и заливов Приморского края (рис. 1), отражающие содержание органического вещества (табл. 1):

— максимальное значение органического вещества в донных осадках ($C_{\text{общ}}$), % 100 г пробы;

— минимальное содержание растворенного в воде кислорода (O_2), мг O_2 /л;

— максимальное для поверхностных вод значение биохимического потребления кислорода микроорганизмами в течение пяти суток (БПК₅), мг O_2 /л;

— максимальное значение перманганатной окисляемости поверхностных вод (ПО), мг О/л.

Для унификации данные, положенные в расчет индекса КИСОС, подвергали математической обработке путем извлечения из конкретных значений двойного квадратного корня, при котором параметры среды приводятся к значениям, позволяющим



Рис. 1. Карта-схема расположения районов побережья Приморского края, использованных в расчетах индекса КИСОС

Fig. 1. Scheme of the areas for CIOCE calculation

анализировать зависимости в едином универсальном диапазоне. Значение индекса КИСОС получали путем перемножения (произведения) всех четырех параметров:

$$КИСОС = (\sqrt[3]{C_{общ}}) \cdot (1 - \sqrt[3]{O_2}) \cdot (\sqrt[3]{БПК_5}) \cdot (\sqrt[3]{ПО}).$$

В качестве отклика биоты на условия существования рассчитывали среднее для акваторий значение индекса биологического разнообразия Шеннона для макробентоса:

$$H = -\sum b_i \ln b_i$$

где H — индекс Шеннона; b_i — доля биомассы i -го вида в общей биомассе макробентоса.

Кроме этого, рассчитывали индекс, отражающий трофическую структуру макробентоса в морских прибрежных акваториях Приморского края, — индекс нарушения трофической структуры (ИНТС). Основной трофической группой, наиболее тесно связанной с условиями содержания органического вещества в среде морских акваторий, являются детритофаги (несортирующие и сортирующие). Изменение их вклада в общую биомассу бентоса является отражением изменения условий среды, а именно — содержания в ее компонентах органического вещества. Увеличение вклада детритофагов в общую биомассу рассматривается как сигнал изменения трофической структуры, характерной для условий повышения содержания ОВ в среде. ИНТС рассчитывали по следующей формуле:

$$ИНТС = \frac{\text{Биомасса детритофагов}}{\text{Биомасса остальных трофических групп}}$$

Оценивали нелинейную зависимость биологических индексов от КИСОС. Уровень значимости (достоверности) $P = 90\%$.

Параметры, отражающие уровень содержания органического вещества
в различных акваториях побережья Приморского края

Table 1

Parameters of organic matter content in certain areas at Primorye coast

Район	Максимальное значение $C_{\text{общ}}$ в донных осадках, %	Летние гидрохимические показатели		
		Минимальное содержание O_2 , мг O_2 /л	Максимальное значение БПК ₅ , мг O_2 /л	Максимальное значение ПО, мг О/л
Приустьевая зона р. Туманной	1,57 (Белан, 2000)	5,10 (Мощенко и др., 2000)	3,42 (Григорьева, Журавель, 2007)	5,23 (Григорьева, Журавель, 2007)
Зал. Посыета	2,60 (Гальшева и др., 2008a)	6,70 (Григорьева и др., 2001)	0,85 (Мощенко и др., 2000)	5,70 (данные каф. экологии ДВФУ)
Амурский залив	5,40 (Pavlyuk, Trebukhova, 2005)	5,0 (Рачков, 2006)	2,0 (Рачков, 2006)	10,10 (данные каф. экологии ДВФУ)
Внутренние бухты г. Владивостока	9,66 (Ходоренко и др., 2008)	4,30 (Buzoleva et al., 2008)	6,60 (Buzoleva et al., 2008)	10,40 (Buzoleva et al., 2008)
Уссурийский залив	2,0 (данные каф. экологии ДВФУ)	7,36 (данные каф. экологии ДВФУ)	3,83 (данные каф. экологии ДВФУ)	3,30 (данные каф. экологии ДВФУ)
Зал. Восток	2,87 (Дульцева, Одинцов, 1991)	6,20 (Гальшева, Христофорова, 2007)	5,86 (Христофорова и др., 2001)	8,20 (Гальшева, Христофорова, 2007)
Зал. Находка	3,20 (данные каф. экологии ДВФУ)	5,80 (Христофорова и др., 2007)	8,0 (Христофорова и др., 2007)	10,0 (Христофорова и др., 2007)
Бухта Киевка	1,16 (Гальшева и др., 2008б)	6,10 (Гальшева и др., 2008б)	1,60 (Гальшева и др., 2008б)	3,80 (Гальшева и др., 2008б)
Бухта Рудная	1,97 (Гальшева и др., 2008a)	6,50 (данные каф. экологии ДВФУ)	2,20 (данные каф. экологии ДВФУ)	3,10 (данные каф. экологии ДВФУ)
Побережье Тернейского района	1,11 (данные каф. экологии ДВФУ)	7,70 (данные каф. экологии ДВФУ)	1,48 (данные каф. экологии ДВФУ)	1,37 (данные каф. экологии ДВФУ)

Результаты и их обсуждение

Большинство урбанизированных прибрежных территорий и зон с развитой инфраструктурой оказывают на морскую среду комплексное воздействие и способствуют поступлению в прибрежные районы смешанного органического загрязнения. Разные районы российского побережья Японского моря испытывают неодинаковый уровень и характер антропогенного влияния, приводящие к разной степени загрязнения и набору загрязняющих веществ.

Российское побережье моря составляет около 2100 км и относится к нескольким субъектам федерации (Приморский край, Хабаровский край и Сахалинская область). Большую часть территории материкового побережья (80 %) образуют выходящие к морю хребты горной системы Сихотэ-Алинь. Столько же прибрежной площади покрыто лесами. Крупнейшие реки, впадающие в Японское море со стороны России, — Туманная (Тумэндзянь), Раздольная (Суйфун), Партизанская (Сучан), Самарга. Изрезанность материкового побережья Японского моря очень низкая. Самый крупный залив — зал. Петра Великого — расположен на юге Приморского края в центральной части западного побережья моря. Побережье залива является наиболее густонаселенным районом.

В целом население российского побережья Японского моря составляет 1,44 млн чел.* с плотностью 14 чел./км², что во много раз ниже плотности населения в части Японского моря, принадлежащей п-ову Корея (478 чел./км²) и Японии (303 чел./км²). На российском побережье моря со стороны Приморского края имеется два крупных портовых города — Владивосток и Находка (рис. 1) — с общей численностью населения около 1 млн чел. Население прибрежных городов и поселков Хабаровского края и Сахалинской области значительно меньше и составляет в сумме около 140 тыс. чел. Характер и интенсивность антропогенного воздействия на прибрежные экосистемы Японского моря вдоль российской экономической зоны неодинаковы (Гальшева, 2009).

Сравнительные данные о содержании ОБ в среде заливов и бухт с разными природными особенностями и разной степенью антропогенной нагрузки, а также сопоставление их с биологическими характеристиками позволило оценить, как связаны процесс накопления органики в среде и изменение природных сообществ.

Диапазон КИСОС для морской прибрежной зоны Приморского края варьирует от 0,60 (побережье Тернейского района, северное Приморье) до 3,52 (внутренние бухты г. Владивостока: Золотой Рог, Улисс, Диомид) (табл. 2). Значения индекса биологического разнообразия Шеннона, рассчитанные для макробентоса прибрежной зоны (глубина обитания до 20 м), минимальны для внутренних бухт г. Владивостока, что связано с антропогенной трансформацией их среды и перестройкой донных сообществ, заключающейся в сокращении числа видов и увеличении степени доминирования малого числа таксонов. Для этих же акваторий характерен максимальный ИНТС, формирующийся за счет преобладания в биомассе видов — потребителей растворенного ОБ и ОБ в составе детрита, а также существенного снижения (вплоть до исчезновения) организмов, питающихся растительной и животной пищей.

Таблица 2

Результаты расчета КИСОС, индекса Шеннона и ИНТС для акваторий побережья Приморского края

Table 2

CIOCE, Shannon diversity index, and ITSD for certain areas at Primorye coast

Район	КИСОС	Уровень*	Индекс Шеннона	ИНТС
Приустьевая зона р. Туманной	1,53	II	2,63	2,87
Зал. Посьета	1,17	I	2,06	8,06
Амурский залив	1,68	II	2,43	3,20
Внутренние бухты г. Владивостока	3,52	III	1,10	16,21
Уссурийский залив	1,15	I	2,75	2,90
Зал. Восток	2,17	II	2,36	0,80
Зал. Находка	2,58	III	2,51	10,40
Бухта Киевка	1,04	I	1,91	10,57
Бухта Рудная	1,20	I	1,30	2,89
Побережье Тернейского района	0,60	I	1,25	8,49

* Уровень КИСОС см. в тексте.

Зависимости индексов биологических параметров (Шеннона и ИНТС) от КИСОС противоположны (рис. 2).

Область значений КИСОС от 1,5 до 2,5, соответствующая повышению содержания органического вещества в акваториях, характеризуется «улучшением» структуры донных биоценозов — увеличением биологического разнообразия по Шеннону и снижением нарушенности трофической структуры за счет уменьшения вклада детритофагов в общую биомассу. Ограничением модели является область значений КИСОС от 0,5 до 3,5, что не позволяет использовать ее при значениях данного индекса, выходящих за пределы указанного диапазона.

На основании предложенных зависимостей предлагается ранжировать КИСОС на три уровня:

* State of the Marine Environment in the NOWPAP Region. Vladivostok: Dalnauka, 2007. 84 p.

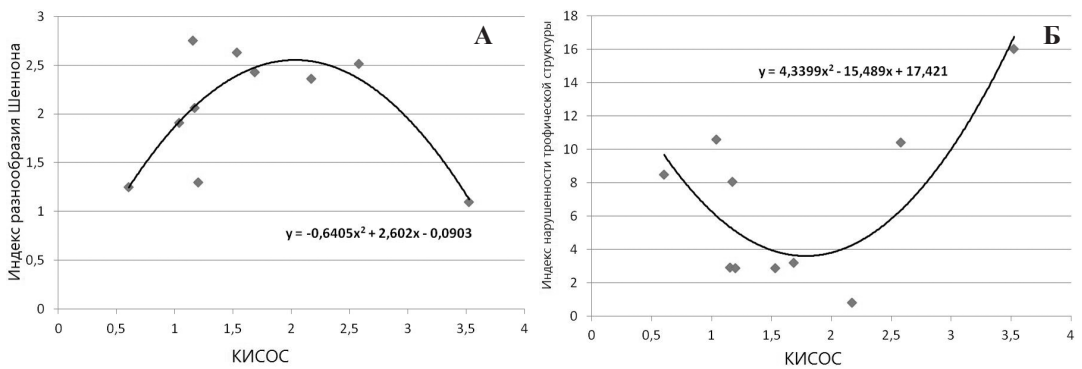


Рис. 2. Зависимость индексов Шеннона (А) и нарушенности трофической структуры (ИНТС) (Б) от КИСОС для морского макробентоса прибрежной зоны Приморского края

Fig. 2. Dependence of Shannon diversity index (А) and ITSD (Б) on CIOCE for marine macrobenthos in the coastal zone of Primorye

Менее 1,5 — низкий уровень содержания органики в среде, не поддерживающий максимального биологического разнообразия и «благополучия» трофической структуры макробентоса.

От 1,5 до 2,5 — уровень обогащения среды органическим веществом, способствующий поддержанию максимального биологического разнообразия и «благополучия» трофической структуры макробентоса.

Более 2,5 — уровень перенасыщения среды органическим веществом, приводящий к снижению биологического разнообразия, перестройке и нарушению трофической структуры морского макробентоса.

По данной классификации наиболее неблагоприятному уровню (III) соответствуют акватории г. Владивостока и зал. Находка, к уровню благополучного состояния (II) относятся зал. Восток, Амурский залив и приустьевая зона р. Туманной, к уровню снижения биоразнообразия и благополучия трофической структуры на фоне пониженного содержания ОВ в среде (I) — акватории восточного и северного побережья и Уссурийский залив.

Таким образом, благополучие экологической структуры макробентоса связано с содержанием органики в среде и подчиняется «закону экологического оптимума». Используя значения параметров, отражающих содержание ОВ в среде, на основании предложенной модели можно прогнозировать уровень биологического разнообразия макробентоса и благополучие его трофической структуры с вероятностью 90 %.

Закключение

Таким образом, баланс поступления и расхода ОВ в морской среде играет важнейшую роль в формировании условий существования морской биоты. Накопление ОВ в воде и грунтах меняет состав и структуру биоценозов. Однако негативные изменения проявляются только при приближении содержания ОВ к критическим — максимальным или минимальным значениям. Для «средней зоны» диапазона значений индекса, отражающего накопление органики в среде, характерны значения структурных показателей макробентоса, свидетельствующие об увеличении биологического разнообразия и стабилизации благополучия трофической структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-6064.2012.4 и гранта правительства РФ № 11G34.31.0010.

Список литературы

Белан Т.А. Макрозообентос мягких грунтов на акватории от приустьевых участка реки Туманной до острова Фуругельма // Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. — Владивосток : ИБМ ДВО РАН, 2000. — С. 147–167.

Галышева Ю.А. Биологические последствия органического загрязнения прибрежных морских экосистем российской части Японского моря // Изв. ТИНРО. — 2009. — Т. 158. — С. 209–227.

Галышева Ю.А., Нестерова О.В., Гришан Р.П. Гранулометрический состав и органическое вещество мягких осадков некоторых прибрежных морских экосистем северо-западной части Японского моря // Изв. ТИНРО. — 2008а. — Т. 154. — С. 103–113.

Галышева Ю.А., Христофорова Н.К., Чернова Е.Н. и др. Некоторые экологические параметры водной среды и донных отложений бухты Киевка Японское море // Изв. ТИНРО. — 2008б. — Т. 154. — С. 114–124.

Галышева Ю.А., Христофорова Н.К. Среда и макробентос залива Восток Японского моря в условиях рекреационного воздействия // Изв. ТИНРО. — 2007. — Т. 149. — С. 270–309.

Григорьева Н.И., Журавель Е.В. Экологическое состояние северной части акватории возле устья реки Туманная (по данным последних лет) // Мат-лы Междунар. конф. «Проблемы устойчивого природопользования в нижнем течении р. Туманная». — Владивосток : ДВО РАН ; WWF, 2007. — С. 107–108.

Григорьева Н.И., Федосеев В.Я., Кучерявенко А.В. Абиотические условия среды в местах размещения плантаций марикультуры залива Посьета (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2001. — Т. 128. — С. 501–514.

Дульцева О.А., Одинцов В.С. Численность и активность денитрифицирующих бактерий в мягких грунтах залива Восток Японского моря // Биол. моря. — 1991. — № 5. — С. 56–62.

Максимов А.А. Причины возникновения придонной гипоксии в восточной части Финского залива Балтийского моря // Океанол. — 2006. — Т. 46, № 2. — С. 204–210.

Миронов О.Г., Кириухина Л.Н., Алёмов С.В. Комплексные экологические исследования Балаклавской бухты // Экол. — Севастополь : Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского НАН Украины, 1999. — Вып. 49. — С. 16–21.

Мощенко А.В., Ванин Н.С., Ламыкина Е.А. Рельеф дна, донные отложения и гидрологические условия российской части приустьевой зоны реки Туманной // Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. — Владивосток : ИБМ ДВО РАН, 2000. — С. 43–75.

Рачков В.И. Гидрохимические условия в северной части Амурского залива в теплый период года // Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. «Экологические проблемы использования морских прибрежных акваторий». — Владивосток : ДВГУ, 2006. — С. 163–165.

Ходоренко Н.Д., Волкова Т.И., Тищенко П.Я. Гумусовые вещества и макросостав донных отложений в нижнем течении реки Раздольной и северной части Амурского залива (Японское море) // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008. — С. 229–243.

Христофорова Н.К., Журавель Е.В., Григорьева Н.И. и др. Оценка качества вод залива Восток Японского моря // Проблемы региональной экологии. — 2001. — № 2. — С. 59–69.

Христофорова Н.К., Коженкова С.И., Галышева Ю.А. Оценка тенденций изменения макрофитобентоса, гидрохимических и микробиологических характеристик заливов Восток и Находка в связи с вариациями антропогенной нагрузки // Реакция морской биоты на изменения природной среды и климата : мат-лы Комплексного регионального проекта ДВО РАН по программе Президиума РАН. — Владивосток : Дальнаука, 2007. — С. 37–78.

Buzoleva L.S., Kalitina E.G., Bezverbnaya I.P., Krivosheeva A.M. Microbial Communities in the Coastal Surface Waters of Zolotoi Rog Bay under the Conditions of Strong Anthropogenic Pollution // Oceanol. — 2008. — Vol. 48, № 6. — P. 882–888.

Pavlyuk O.N., Trebukhova Ju.A. Composition and distribution of meiobenthos in Amursky Bay (Peter the Great Bay, East Sea) // Ocean Science J. — 2005. — Vol. 40, № 3. — P. 119–125.

Поступила в редакцию 18.12.13 г.