

## ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ЭКОСИСТЕМ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ: О-Р-Е-R-МОДЕЛЬ

*О.Е. Архипова*

Федеральный исследовательский центр  
Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону  
arkhipova@ssc-ras.ru

**Аннотация.** Прибрежные зоны обладают определенной способностью справляться с неблагоприятными последствиями экологического давления и восстанавливаться после них, однако постоянное антропогенное воздействие, связанное в основном с морской экономикой и урбанизацией, особенно с чрезмерной эксплуатацией морских и других природных ресурсов, приводит к тому, что экосистемы прибрежной зоны превышают свою экологическую емкость, из-за чего происходит их частичный коллапс.

В статье дан обзор существующих систем показателей оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны и предложен подход к управлению экосистемами, предусматривающий участие нескольких сторон в процессе эксплуатации прибрежных ресурсов с целью достижения устойчивого развития. Согласно приведенному обзору, к традиционной модели *объект – выносливость – устойчивость* добавлено измерение давления для разработки модели *объект – давление – выносливость – устойчивость* для оценки уязвимости экосистемы прибрежной зоны. Предложена методика расчета каждой группы показателей. Выбранные показатели и методы определения их значений в целом применимы ко всем экосистемам прибрежной зоны.

**Ключевые слова:** прибрежные зоны, объект, давление, выносливость, устойчивость, модель.

**Введение.** Являясь зоной взаимодействия суши и моря, прибрежные зоны являются важными носителями морской экономики. Поскольку прибрежные зоны наиболее тесно связаны между собой сушей и морем, они становятся стратегическим районом для достижения устойчивого расширения голубого экономического пространства. Прибрежные зоны подвержены различным экологическим нагрузкам, как естественным, так и антропогенным [1]. Природные нагрузки в основном включают береговую эрозию, вызванную различными опасными природными явлениями, нетрадиционные реакции на климатические аномалии и повышение уровня моря в результате изменения климата [2]. Антропогенное давление в основном связано с морской экономикой и урбанизацией, особенно с чрезмерной эксплуатацией человеком морских и других природных ресурсов, что приводит к тому, что экосистемы прибрежной зоны превышают свою экологическую емкость, что приводит к частичному коллапсу экосистемы. Р. Пинто и Ф. Мартинс [3] отметили, что ресурсы и окружающая среда прибрежной зоны оказывают важное влияние как на человеческое общество, так и на природную среду.

Основываясь на постулате целостности системы, необходимо разработать подход к управлению экосистемами, предусматривающий участие нескольких сторон в процессе эксплуатации прибрежных ресурсов с целью достижения устойчивого развития.

Во многих исследованиях изучались подходы к оценке состояния экосистем прибрежной зоны. Взяв в качестве примера Средиземное море, М. Монтефалько [4] предложила метод оценки экосистемы, который оценивает индексы сохранения, замещения и фазового сдвига в регионе. Б. Халперн и соавторами [5] построили оценочный индекс и использовали его для изучения здоровья морских и прибрежных зон. В работе Хун Цзе и др. [6] представлена объединенная модель TOPSIS и VOR, а также технология дистанционного зондирования для оценки состояния экосистем конкретных регионов.

Понятие уязвимости впервые было применено к анализу разрушительного воздействия стихийных бедствий на человека [7], а затем было введено в социальные науки. В настоящее время термин широко используется в исследованиях изменения климата, экономических систем, эко-

логии и управления проектами [8]. Что касается прибрежных зон, то их способность справляться с неблагоприятными последствиями внешних экологических нагрузок и восстанавливаться после них известна как уязвимость экосистем прибрежных зон.

В работе Ф. Сантоса и соавторов [9] построен индекс оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны, включающий экологическую и социально-экономическую уязвимость на примере оценки аварийных разливов нефти. Данная методика позволит эффективно проводить пространственное планирование и управлять рисками прибрежной зоны. Ву с соавторами [10] проанализировали модели пространственно-временной эволюции уязвимости к выбросам углерода в прибрежных районах Китая, подчеркнув связь с урбанизацией.

Праманик с соавторами [11] исследовали уязвимость побережья, связанную с повышением уровня моря в прибрежной зоне бассейна Кришны Годавари в Индии. На примере прибрежной зоны Гиппсленд в Австралии в работе [12] проанализирована проблема уязвимости зоны к наводнениям и ее адаптационные меры в контексте изменения климата. Хаотьянь и соавторы [13] использовали модель *давление – состояние – реакция* для построения индекса оценки экологической несущей способности прибрежных зон, взяв в качестве примера для анализа район Ляньюньган, Китай. Используя интеллектуальный анализ больших данных, статистические ежегодники и др., авторы исследования [14] разработали систему оценки уязвимости городской и социально-экологической прибрежной зоны с показателями по четырем параметрам: воздействие, чувствительность, реагирование и устойчивость.

В существующей литературе методы формирования и оценки уязвимости в основном изучаются в области природных опасностей и экологической среды [15]. В то же время гораздо меньше исследований сосредоточено на уязвимости экосистем прибрежной зоны. Более того, по-прежнему отсутствует систематический анализ механизмов формирования. Поскольку прибрежные зоны испытывают значительные экологические нагрузки, возникает необходимость построения модели оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны на основе анализа существующей системы индексов. На этой основе может быть предложено

на стратегия управления уязвимостью экосистем прибрежной зоны.

### **Система индексов уязвимости экосистем прибрежной зоны**

*Существующие системы показателей оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны.* Для оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны [16] в первую очередь необходимо решить вопрос построения системы индикаторов. Современные системы показателей оценки уязвимости экосистем имеют следующие структурные особенности:

1. *Модель экологической чувствительности – устойчивости – давления (SRP).* Экологическая чувствительность – это способность экосистемы реагировать на внешние возмущения [17].

2. *Система индикаторов причинно-следственных связей.* Эта система фиксирует уязвимость экосистемы в районе исследования путем выбора индикаторов, связанных с причинами изменений в региональной экосистеме, и соответствующих результатов [18].

3. *Индикаторная система «давление – состояние – реакция» (PSR).* Эта широко используемая модель отражает внешнее давление на систему, ее пропускную способность и ее реакцию на внешнее давление в зависимости от пропускной способности.

4. *Индикаторная система диаграммы обзора уязвимости (VSD).* Уязвимость экосистемы определяется и оценивается на основе трех измерений диаграммы охвата уязвимости.

5. *Мультисистемная индексная система оценки.* Основанный на теории систем, этот подход учитывает водные, земельные, климатические, социальные и экономические подсистемы, чтобы сформировать более полную систему индексов оценки. Данный метод может быть скорректирован в соответствии с различиями в экосистемах в разных регионах, чтобы соответствовать фактическим ситуациям и гарантировать, что система имеет определенную степень специфичности.

6. *Традиционная модель объект – выносливость – устойчивость (O-E-R).* Основанная на концепции несущей способности почвы, O-E-R представляет собой концептуальную систему для оценки несущей способности окружающей среды. Факторами, связанными с несущей способностью почвенной среды, являются объект (O), его

устойчивость (также называемая фоновой устойчивостью) (E) и его способность к восстановлению (R) после повреждения.

В О-Е-R-система почвенной среды обладает определенной способностью к самовосстановлению, которая зависит от определенных условий и может работать только в том случае, если социальное и экономическое давление находится в определенном диапазоне. Если давление превысит возможности системы, то ее способность к самовосстановлению будет неэффективной, и потребуются внешнее вмешательство. Модель О-Е-R сочетает в себе «самоорганизующую способность» почвы с «другой организующей способностью» органов охраны почвы с точки зрения внешнего воздействия их управления на несущую способность. Это позволяет получить всестороннее и систематическое представление о несущей способности почвенной среды. По сути, это то же самое, что и оценка уязвимости экосистемы прибрежной зоны, которая также требует сопоставления экологической несущей способности прибрежной зоны и внешних экологических нагрузок для определения вероятности изменений экосистемы. И хотя О-Е-R и отражает сопоставление емкости системы и внешних воздействий с несущим объектом, но не отражает внешних давлений в ней, рассматривая только саму систему. Это делает «фоновую емкость + устойчивость» сравнимой только с «несущим объектом». В частности, на уязвимость экосистемы прибрежной зоны влияют не только ее собственные объекты-носители, но и внешние воздействия, которые также необходимо оценивать.

#### **Построение системы индикаторов оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны на основе системы О-Р-Е-R**

Согласно приведенному выше анализу, к традиционной модели О-Е-R было добавлено измерение давления для разработки модели объект – давление – выносимость – устойчивость (О-Р-Е-R) для оценки уязвимости экосистемы прибрежной зоны [19]. Система индексов оценки основывается на О-Р-Е-R следующим образом:

**1. Объект.** Экосистема прибрежной зоны выполняет задачи морского экономического развития, защиты биологических ресурсов, защиты окружающей среды и социальной стабильности (Z1 – Z7).

Его несущий объект охватывает различные аспекты, такие как экономика, общество и экология. В системе индексов оценки уязвимости объектная размерность отражается следующими показателями: доля морского ВВП в прибрежной зоне, плотность морского хозяйства в прибрежной зоне, индекс разнообразия морских биологических ресурсов, плотность населения в прибрежной зоне, площадь водно-болотных угодий, связанных с морем, и количество занятых в море.

**2. Давление:** Экосистемы прибрежной зоны подвержены влиянию не только объектов, за которые они берутся, но и изменений внешней среды и деятельности человека. Эти нагрузки могут повлиять на стабильность экосистем прибрежной зоны и привести к изменчивости экосистем прибрежной зоны. Таким образом, измерение давления отражается следующими показателями в системе индексов: выбросы твердых промышленных отходов, количество сточных вод, поступающих в море на 10 000 руб. ВВП, и интенсивность антропогенного воздействия (Z8 – Z10).

**3. Выносимость:** существует предел экологической и биологической емкости экосистем прибрежной зоны. Чем больше грузоподъемность, тем ниже уязвимость.

Соответственно размерность выносимости отражается следующими показателями: индекс экологической емкости прибрежной зоны, индекс экологической емкости биологических ресурсов прибрежной зоны, индекс социально-экологической емкости прибрежной зоны и индекс туристической емкости прибрежной зоны (Z11 – Z14).

**4. Устойчивость:** Экосистемы прибрежных зон обладают определенной степенью экологической устойчивости, в основном зависящей от уровня инвестиций общества в защиту прибрежных зон. Таким образом, устойчивость экосистем прибрежной зоны тесно связана с тем, какое значение человеческое общество придает защите окружающей среды [20]. Соответственно, изменение устойчивости может быть отражено следующими показателями: доля ВВП и человеческие ресурсы, инвестированные в охрану окружающей среды прибрежной зоны (Z15).

**Методы. Расчет показателей.** Характеристики объекта определяют показатели Z1 – Z7. Рассмотрим каждый из выбранных показателей.

**Z1. Отношение общей стоимости морской экономики (включая стоимость продукции**

первичной, вторичной и третичной морской промышленности) к региональному ВВП прибрежной зоны оцениваемого региона. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$Z1 = \frac{\text{Морской ВВП}_{\text{прибрежной зоны}}}{\text{Региональный ВВП}} \times 100 \% \quad (1)$$

**Z2. Морская экономическая плотность прибрежной зоны** рассчитывается как отношение общей стоимости морского хозяйства (включая первичную, вторичную и третичную морскую промышленность) в прибрежной зоне района оценки к длине береговой линии в районе:

$$Z2 = \frac{\text{Морской ВВП}_{\text{прибрежной зоны}} \text{ (млн руб.)}}{L_{\text{берег. линии}} \text{ (км)}} \quad (2)$$

**Z3 (S). Индекс разнообразия морских биологических ресурсов (безразмерный)** рассчитывается с использованием формулы индекса разнообразия Шеннона – Винера:

$$S = -\sum_{i=1}^n p_i \times \ln(p_i), \quad (3)$$

где  $S$  – индекс разнообразия Шеннона – Винера,  $N$  – количество видов в районе оценки (по данным станций),  $p_i$  – доля особей вида  $I$  ( $i = 1, 2 \dots n$ ).

$p_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$  – соответствуют числу признаков (на пример, особей) определенного объекта (например, вида) в выборке (например, в сообществе).

**Z4. Плотность населения прибрежной зоны (чел/км).** Отношение количества людей в районе оценки к длине прибрежной зоны в районе оценки рассчитывается следующим образом:

$$Z4 = \frac{\text{Плотность населения прибрежной зоны (чел/км)}}{L_{\text{берег. линии}} \text{ (км)}} \quad (4)$$

**Z5. Площадь водно-болотных угодий, связанных с морем, на душу населения (м<sup>2</sup>/чел.)**

$$Z5 = \frac{S_{\text{водно-болотных угодий}}}{\text{Численность населения в регионе}} \quad (5)$$

**Z6. Занятость в море (млн чел.).** Показатель оценивает количество людей, занятых в первичном, вторичном и третичном морских секторах, и связанную с этим занятость в регионе. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$Z6 = A1 + A2 + A3 + B, \quad (6)$$

где  $Z6$  указывает общее количество работников, связанных с морем в районе оценки.  $A1$ ,  $A2$  и  $A3$  обозначают количество работников в первичной, вторичной и третичной морской промышленности в районе оценки соответственно.  $B$  – количество других сотрудников, связанных с морем, в районе оценки.

**Z7. Выбросы твердых промышленных отходов за год, ч (т/ млн руб.).** Интенсивность сброса твердых промышленных отходов в море в оцениваемом регионе отражает отношение регионального сброса твердых отходов в море к общему объему промышленной продукции в регионе. Этот показатель рассчитывается следующим образом:

$$Z7 = \frac{\text{Выбросы твердых промышленных отходов в млн руб.}}{\text{Общий объем промышленной продукции}} \quad (7)$$

Показатели  $Z8 - Z10$  определяют давление на экосистему.

**Z8. Количество сточных вод, поступающих в море, на 1 000 000 руб. ВВП (т/млн руб.).** Интенсивность сброса промышленных сточных вод в море в регионе отражается отношением объема сточных вод к региональному ВВП. Формула расчета, следующая:

$$Z8 = \frac{\text{Количество сточных вод, поступающих в море/ВВП}}{\text{ВВП}} \quad (8)$$

**Z9. Интенсивность мелиорации (км<sup>2</sup>/км):**

$$Z9 = \frac{\text{Отношение площади мелиорации/ протяженность региональной береговой линии}}{\text{протяженность региональной береговой линии}} \quad (9)$$

**Z10. Максимальная экологическая емкость прибрежной зоны.** Это максимальная экологическая емкость, которую может выдержать водный объект прибрежной зоны в экстремальных условиях. Относительная емкость используется для расчета индекса экологической емкости для вод прибрежной зоны. Показатель экологической емкости вод прибрежной зоны определяется по методу сравнения наличия/отсутствия и включает в себя две удельные величины: нормальное

значение экологической емкости вод прибрежной зоны и максимальное значение экологической емкости вод прибрежной зоны  $R_{\text{water-normal}}$ . В анализе используются экспертные оценки. Интервал оценивания (0–100). После выставления баллов рассчитывается значение индекса:

$$R_{\text{water-normal}} = \frac{1}{2} \times \sum_{k=1}^K ((r_{2_{wm}}^k)^2 - (r_{1_{wm}}^k)^2) / \sum_{k=1}^K (r_{2_{wm}}^k) - (r_{1_{wm}}^k), \quad (10)$$

где  $k$  – количество экспертных оценок,  $[r_1 - r_2]$  – интервал, заданный экспертом.

Показатель максимальной экологической емкости воды прибрежной зоны обозначаем как  $R_{\text{water-max}}$ . К нему так же применим метод экспертных оценок.

$$R_{\text{water-max}} = \frac{1}{2} \times \sum_{k=1}^K ((r_{2_{wm}}^k)^2 - (r_{1_{wm}}^k)^2) / \sum_{k=1}^K (r_{2_{wm}}^k) - (r_{1_{wm}}^k), \quad (11)$$

Максимальная экологическая емкость прибрежной зоны будет рассчитана по формуле:

$$Z10 = (R_{\text{water-max}} - R_{\text{water-normal}}) / R_{\text{water-normal}}. \quad (12)$$

Выносливость системы определяют показатели Z11 – Z14.

**Z11. Индекс экологической емкости по живым ресурсам прибрежной зоны.** Это максимальная экологическая емкость прибрежной зоны по биологическим ресурсам, которая может поддерживаться в экстремальных условиях. Индекс экологической емкости биологических ресурсов прибрежной зоны определяется методом сравнения наличия/отсутствия; в нем участвуют две величины: нормальное значение экологической емкости биоресурсов прибрежной зоны и максимальное значение экологической емкости биологических ресурсов прибрежной зоны. Расчет проводится аналогично индексу Z10 с использованием экспертных оценок.

**Z12. Индекс социально-экологической емкости прибрежной зоны.** Он отражает максимальную социально-экологическую емкость, которую прибрежная зона может выдержать в экстремальных условиях. Данный индекс определяется методом сравнения наличия/отсутствия и включает две величины: нормальное значение социально-экологической емкости прибрежной зоны и максимальное значение социально-экологической емкости прибрежной зоны. Расчет производится при помощи экспертных оценок, как показано для Z10.

**Z13. Индекс туристической емкости прибрежной зоны.** Это максимальный туристический потенциал, который прибрежная зона может выдержать в экстремальных условиях. Индекс туристической емкости прибрежной зоны определяется с помощью метода сравнения наличия/отсутствия; он включает в себя два значения: нормальное значение туристической емкости прибрежной зоны и максимальное значение туристической емкости прибрежной зоны. Расчет аналогичен индексу Z10.

**Z14. Инвестиции в охрану окружающей среды прибрежной зоны в процентах от ВВП (%).** Уровень инвестиций в охрану окружающей среды прибрежной зоны в регионе отражается отношением инвестиций в охрану окружающей среды прибрежной зоны ( $Inv_{\text{env}}$ ) к ВВП (GDP). Формула расчета выглядит следующим образом:

$$Z14 = Inv_{\text{env}} / GDP \times 100. \quad (13)$$

Устойчивость системы определяется инвестициями в защиту прибрежной зоны.

**Z15. Инвестиции в защиту прибрежной зоны (млн руб.).** Величина показателя определяется путем агрегирования количества различных видов затрат рабочей силы и соответствующей средней цены за единицу.

#### Метод определения весов

Вес показателей определяют путем объединения субъективных и объективных весов. Использование этих двух методов для формирования комбинированных весов может обеспечить достоверность результатов взвешивания.

**Определение субъективных весов с помощью групповой аналитической иерархии.** Процесс группового анализа иерархии (ГАНР) совершенствует традиционный АНР (процесс анализа иерархии одним экспертом). Таким образом, ГАНР подходит для анализа весов индикаторов несколькими экспертами. Итоговый вес индикатора определяется средним арифметическим результатов весов индикаторов, оцененных каждым экспертом. При фактическом использовании данного метода все еще существует недостаток, заключающийся в том, что сравнение важности между показателями является слишком.

Чтобы лучше отражать мнения экспертов, взвешивание показателей следует выражать в виде интервальных значений. Суть метода заключа-

ется в определении экспертами **относительной** важности двух показателей. Предположим, что в определении весов системы индикаторов оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны участвует определенное количество (К) экспертов. В процессе определения веса значение интервала для двух показателей,  $x_g$  и  $x_h$ , на одном и том же уровне попадает в интервал  $[d_1^k, d_2^k]$ , где  $(d_2^{(k)} \geq d_1^{(k)})$  для всего множества экспертов  $C_K$ .

В этом случае совместная функция для определения относительной важности показателей  $x_g$  и  $x_h$  будет выглядеть следующим образом:

$$f_{g,h} = \frac{1}{2} \times \frac{\sum_{k=1}^K \left\{ [d_2^k]^2 - [d_1^k]^2 \right\} \times c_k}{\sum_{k=1}^K \left\{ [d_2^k] - [d_1^k] \right\} \times c_k} \quad (14)$$

На основе описанного выше метода можно определить относительную важность двух индикаторов на одном уровне. Затем можно определить вес системы показателей оценки уязвимости экосистемы прибрежной зоны в соответствии с шагами и требованиями метода иерархий.

**Определение объективных весов методом энтропийного взвешивания.** Стандартизация показателей. Показателями в системе показателей оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны являются  $Z_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), и необходимо оценить  $m$  прибрежных зон.

$X_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ) – значение показателя  $j$ -го показателя для оцениваемой  $i$ -й прибрежной зоны.

Показатели стандартизируются с использованием различных методов. Стандартизированное значение показателя –  $R_{ij}$ . Для индикатора типа «чем больше, тем лучше» он стандартизирован с использованием уравнения

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (15)$$

Для индикаторов «чем меньше, тем лучше» они стандартизируются с использованием уравнения

$$r_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (16)$$

Стандартизация показателей производится при помощи следующих функций

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (17)$$

Далее рассчитывается значение энтропии  $j$ -го показателя  $H_j$

$$H_j = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (18)$$

Определение объективного веса каждого показателя:

$$w_{2p} = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (19)$$

**Усовершенствованная модель экосистемы прибрежной зоны. Оценка уязвимости**

**Требования к оценке.** Выше была построена система индексов оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны, состоящая из 15 показателей [21, 22]. Очевидно, что существуют некоторые различия в масштабе, методе расчета и характере этих 15 показателей.

Поэтому в процессе расчета уязвимости экосистемы прибрежной зоны необходимо обрабатывать каждый показатель. Только в том случае, если масштаб и ориентация индикаторов согласованы, можно определить уязвимость экосистемы прибрежной зоны путем объединения весов индикаторов.

Исходя из этого, требования к проведению оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны следующие.

1. Исходные значения для каждого индикатора определяются на основе метода, используемого для определения индикаторов в системе индексов оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны. Для конкретного региона следует создать несколько единиц оценки в соответствии с географическим или административным делением, а исходные значения каждого показателя следует определять отдельно для каждой единицы оценки.

2. Чтобы определить исходные значения показателей каждой единицы оценки, необходимо их нормализовать и установить диапазон значений (0, 100), таким образом сформировав матрицу нормализованных значений показателей. В процессе нормализации необходимо учитывать характер показателей, чтобы стандартизировать показатели «чем больше, тем лучше» и «чем меньше, тем лучше».

3. После нормализации все индикаторы имеют диапазон значений (0–100). Исходя из этого и в соответствии с принципом равного распределения,

степень уязвимости экосистем прибрежной зоны можно разделить на пять уровней, а именно: крайне неустойчивый, крайне неустойчивый, в целом неустойчивый, слабо неустойчивый и совсем слабо неустойчивый, – что соответствует диапазонам значений 80–100, 60–80, 40–60, 20–40 и 0–20 соответственно.

4. Построить модель оценки уязвимости экосистемы прибрежной зоны на основе определенных критериев классификации уязвимости экосистемы прибрежной зоны. Затем на основе стандартизированных значений индекса провести оценку уязвимости экосистемы конкретной прибрежной зоны и вынести соответствующее суждение.

**Адаптивность и недостатки модели**

Объектный анализ – это метод отражения информации об объекте (включая оценочные показатели, свойства и ценности) через конкретный проводник – материю-элемент – для достижения всесторонней оценки объекта. Преимущество этого метода заключается в том, что он имеет дело с несовместимыми проблемами и определенным образом превращает их в совместимые проблемы. Это соответствует требованиям оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны.

У представленной модели есть две проблемы. Во-первых, при определении весов индикаторов она не может определять веса многоуровневых индикаторов. Во-вторых, при обработке объектов решений метод может решить только проблему принятия решений одним экспертом и не может справиться с принятием решений несколькими экспертами. Таким образом, традиционная модель оценки нуждается в совершенствовании.

**Стандартизация и нормирование значений показателей.** Пятнадцать индикаторов построенной системы индексов имеют определенные различия по масштабу и характеру. Поэтому необходимо стандартизировать и нормализовать их.

Несколько уровней, выделенных в модели, маркируются уровнями 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно по принципу от низкой уязвимости к высокой. Под индексом объекта (O) находится классическая область  $R_{0j}$  для каждого уровня

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \text{Level 1 } Z_1 0-20 \\ Z_2 0-20 \\ Z_3 0-20 \\ Z_4 0-20 \\ Z_5 0-20 \\ Z_6 0-20 \\ Z_7 0-20 \end{bmatrix}, \quad R_{02} = \begin{bmatrix} \text{Level 2 } Z_1 20-40 \\ Z_2 20-40 \\ Z_3 20-40 \\ Z_4 20-40 \\ Z_5 20-40 \\ Z_6 20-40 \\ Z_7 20-40 \end{bmatrix},$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} \text{Level 3 } Z_1 40-60 \\ Z_2 40-60 \\ Z_3 40-60 \\ Z_4 40-60 \\ Z_5 40-60 \\ Z_6 40-60 \\ Z_7 40-60 \end{bmatrix}, \quad R_{04} = \begin{bmatrix} \text{Level 4 } Z_1 60-80 \\ Z_2 60-80 \\ Z_3 60-80 \\ Z_4 60-80 \\ Z_5 60-80 \\ Z_6 60-80 \\ Z_7 60-80 \end{bmatrix},$$

$$R_{05} = \begin{bmatrix} \text{Level 5 } Z_1 80-100 \\ Z_2 80-100 \\ Z_3 80-100 \\ Z_4 80-100 \\ Z_5 80-100 \\ Z_6 80-100 \\ Z_7 80-100 \end{bmatrix}.$$

При условии, что объект принадлежит данному множеству его оценка попадает в интервал

$$R_{po} = \begin{bmatrix} Z_1 0 - 100 \\ Z_2 0 - 100 \\ Z_3 0 - 100 \\ Z_4 0 - 100 \\ Z_5 0 - 100 \\ Z_6 0 - 100 \\ Z_7 0 - 100 \end{bmatrix}.$$

При показателе давления (P) классическая область  $R_{0j}$  для каждого класса определяется следующим образом:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \text{Level 1 } Z_8 \text{ 0-20} \\ Z_9 \text{ 0-20} \\ Z_{10} \text{ 0-20} \\ \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix}, R_{02} = \begin{bmatrix} \text{Level 2 } Z_8 \text{ 20-40} \\ Z_9 \text{ 20-40} \\ Z_{10} \text{ 20-40} \\ \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix},$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} \text{Level 3 } Z_8 \text{ 40-60} \\ Z_9 \text{ 40-60} \\ Z_{10} \text{ 40-60} \\ \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix}.$$

Аналогично для всех групп показателей.

**Идентификация оцениваемого элемента материи.** Для удобства отметим значение каждого показателя отдельно  $Z_i$ . Согласно приведенной системе индексов количество веществ-элементов, подлежащих оценке при оценке уязвимости экосистемы прибрежной зоны, равно пяти. Пусть оцениваемым элементом материи является  $P_m$  ( $m = 0, 1 \dots 4$ ). Соответствующие результаты вычислений представляют собой оцениваемые элементы материи, обозначаемые  $R_m$ . Исходя из вышеизложенного, материальными элементами, подлежащими оценке уязвимости экосистем прибрежной зоны, являются:

$$R_0 = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \\ Z_6 \\ Z_7 \end{bmatrix}, R_p = \begin{bmatrix} Z_8 \\ Z_9 \\ Z_{10} \end{bmatrix}, R_E = \begin{bmatrix} Z_{11} \\ Z_{12} \\ Z_{13} \\ Z_{14} \end{bmatrix}, R_R = [Z_{14}], R_O = \begin{bmatrix} P \\ E \\ R \end{bmatrix},$$

где  $R_0$  – элемент оценки уязвимости экосистемы прибрежной зоны,  $R_0$  – оценка материи-элемента

объекта,  $R_p$  – оценка материи-элемента давления,  $R_E$  – оценка материи-элемента выносливости,  $R_R$  – оценка материального элемента устойчивости.

Определение корреляции между показателем оцениваемого элемента материи по каждому классу проводится по формуле:

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \frac{p(x_i, x_0 j t)}{p(x_i, x_{pi}) - p(x_i, x_0 j t)}, \text{ где } p(x_i, x_{pi}) - p(x_i, x_0 j t) \neq 0 \\ p(x_i, x_0 j t) - 1, \text{ где } p(x_i, x_{pi}) p(x_i, x_0 j t) / = 0 \end{cases} \quad (20)$$

где

$$\rho(x_i, x_0 j i) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{0ji} + b_{0ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{0ji} - a_{0ji}),$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pij} + b_{pij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pij} - a_{pij}),$$

где  $b_{0ji}$  – верхняя граница классической области,  $a_{0ji}$  – нижняя граница классической области,  $b_{pi}$  – верхняя граница узловой области,  $a_{pi}$  – нижнее предельное значение поля сечения,  $\rho(x_i, x_0 j i)$  – расстояние между точкой  $x_i$  и  $x_0 j i$ ,  $\rho(x_i, x_{pi})$ : расстояние между точкой  $x_i$  и интервалом  $x_{pi}$ .

**Расчет релевантности для каждого показателя**

Если весовой коэффициент показателя  $x_i$  равен  $a_i$  и  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ , то

$$K_j(p) = \sum_{i=1}^n a_i \times K_j(x_i), \quad (21)$$

где  $K_j(p)$  – совокупность корреляций оцениваемых показателей по каждому уровню с учетом веса показателя. Если  $K_j0(p) = \max_{j \in (1, 2 \dots m)} K_j(p)$ , то оцениваем  $Pm$  как принадлежащее классу  $j0$ . Вышеупомянутая модель позволяет оценить уязвимость каждого. Экосистема прибрежной зоны и ее компоненты, что обеспечивает эффективную поддержку принятия решений.

Система индексов оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны и модель оценки уязвимости экосистем прибрежной зоны, построенные в данном исследовании, применимы повсеместно. Выбранные показатели и методы определения их значений в целом применимы ко всем экосистемам прибрежной зоны. Построенная модель оценки не зависит от географии и не ограничивает изучаемую популяцию.



Список литературы

1. *Almutairi A., Mourshed M., & Ameen R.F.M.* Coastal community resilience frameworks for disaster risk management // *Nat Hazards*. 2020. No. 101. P. 595–630. DOI: 10.1007/s11069-020-03875-3.
2. *Omer A., Elagib N.A., Zhuguo M., Saleem F., Mohammed A.* Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities // *Science of The Total Environment*. Vol. 749. 2020. P. 141446. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141446.
3. *Pinto R., Martins F.C.* The Portuguese National Strategy for Integrated Coastal Zone Management as a spatial planning instrument to climate change adaptation in the Minho River Estuary (Portugal NW-Coastal Zone) // *Environmental Science & Policy*. Vol. 33. 2013. P. 76–96. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.04.005.
4. *Montefalcone M.* Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: a review // *Ecological Indicators*. Vol. 9. Iss. 4. 2009. P. 595–604. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.09.013.
5. *Halpern B., Longo C., Hardy D. et al.* An index to assess the health and benefits of the Global Ocean // *Nature*. 2012. No. 488. P. 615–620. DOI: 10.1038/nature11397.
6. *Heng Cai, Nina S. N. Lam, Lei Zou & Yi Qiang* (2018) Modeling the Dynamics of Community Resilience to Coastal Hazards Using a Bayesian Network // *Annals of the American Association of Geographers*. Vol. 108. No. 5. P. 1260–1279. DOI: 10.1080/24694452.2017.1421896.
7. *Rasoulkhani K., Mostafavi A., Reyes M.P., Batouli M.* Resilience planning in hazards-humans-infrastructure nexus: A multi-agent simulation for exploratory assessment of coastal water supply infrastructure adaptation to sea-level rise // *Environmental Modelling & Software*. Vol. 125. 2020. P. 104636. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104636.
8. *Bernhardt J.R., Leslie H.M.* Resilience to Climate Change in Coastal Marine // *Ecosystems Annual Review of Marine Science*. Vol. 5. P. 371–392. January 2013. DOI: 10.1146/annurev-marine-121211-172411.
9. *Santos C.F., Michel J., Neves M., Janeiro J., Andrade F., Orbach M.* Marine spatial planning and oil spill risk analysis: Finding common grounds // *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 74. Iss. 1. 2013. P. 73–81. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.07.029.
10. *Wu J., Chen B., Mao J., Feng Z.* Spatiotemporal evolution of carbon sequestration vulnerability and its relationship with urbanization in China's coastal zone // *Science of The Total Environment*. Vol. 645. 2018. P. 692–701. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.086.
11. *Pramanik M.K., Biswas S.S., Mondal B. et al.* Coastal vulnerability assessment of the predicted sea level rise in the coastal zone of Krishna – Godavari delta region, Andhra Pradesh, East Coast of India // *Environ. Dev. Sustain*. 2016. No. 18. P. 1635–1655. DOI: 10.1007/s10668-015-9708-0.
12. *Dutta D., Wright W. & Rayment P.* Synthetic impact response functions for flood vulnerability analysis and adaptation measures in coastal zones under changing climatic conditions: a case study in Gippsland Coastal Region, Australia // *Nat. Hazards*. 2011. No. 59. P. 967–986. DOI: 10.1007/s11069-011-9812-x.
13. *Hao-Tian C., Gui-Zhen H., Yong-Long L., Jing-Jing F.* Integrated assessment of ecological carrying capacity in coastal cities: A case study in Lianyungang city // *Acta Ecologica Sinica*. 2020. P. 1–10.
14. *Wu W., Chen J., Ye Ry.* Vulnerability assessment of urban socio-ecological systems in coastal zones under the influence of typhoons: Big data perspective // *Acta Ecologica Sinica*. 2019. P. 692–701.
15. *Cai H., Nina S. N. Lam, Lei Zou Yi Qiang.* Modeling the Dynamics of Community Resilience to Coastal Hazards Using a Bayesian Network // *Annals of the American Association of Geographers*. 2017. Vol. 108. 2018. Iss. 5. P. 1260–1279. DOI: 10.1080/24694452.2017.1421896.
16. *Yao Wang, Mingxun Li, Fanling Meng, Ge Lou.* HPIP expression predicts chemoresistance and poor clinical outcomes in patients with epithelial ovarian cancer // *Human Pathology*. Vol. 60. 2017. P. 114–120. DOI: 10.1016/j.humpath.2016.10.015.
17. *Rumson A.G., Garcia A.P., Hallett S.H.* The role of data within coastal resilience assessments: an East Anglia, UK, case study // *Ocean & Coastal Management*. Vol. 185. 2020. P. 105004. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.105004.
18. *Jozaei J., Mitchell M., Clement S.* Using a resilience thinking approach to improve coastal governance responses to complexity and uncertainty: a Tasmanian case study, Australia // *Journal of Env. Management*. Vol. 253. 2020. P. 109662. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109662.
19. *Merrill A.N.H., Mulvaney K.K., Martin D.M., Chintala M.M., Berry W., Gleason T.R.* A Resilience Framework for Chronic Exposures: Water Quality and Ecosystem Services in Coastal Social-Ecological Systems // *Coastal Management*. Vol. 46. 2018. Iss. 4: Applying Ecosystem Services to the Practice of Coastal Management: Understanding Values, a special issue from the coastal society, guest-edited by T. Smythe and E. Washburn. P. 242–258. DOI: 10.1080/08920753.2018.1474066.
20. *Jatin Nathwani, Xiaoli Lu, Chunyou Wu, Guo Fu, Xiaonan Qin.* Quantifying security and resilience of Chinese coastal urban ecosystems // *Science of The Total Environment*. Vol. 672. 2019. P. 51–60. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.322.
21. *Lam N.S.-N., Qiang Yi, Arenas H., Brito P. & Liu Kam-Biu.* Mapping and assessing coastal resilience in the Caribbean region // *Cartography and Geographic Information Science*. Vol. 42. 2015. Iss. 4. P. 315–322. DOI: 10.1080/15230406.2015.1040999.
22. *Lam N.N.S. et al.* Measuring community resilience to coastal hazards along the Northern Gulf of Mexico // *Natural Hazards Review*. 2016. T. 17. No 1. P. 04015013.

ASSESSMENT OF VULNERABILITY OF COASTAL ZONE ECOSYSTEMS

*O.E. Arkhipova*

Federal Research Centre the Southern Scientific Centre  
of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don  
arkhipova@ssc-ras.ru

**Abstract.** Coastal zones have a certain ability to cope with and recover from the adverse effects of environmental pressures, which is the vulnerability of coastal zone ecosystems. Anthropogenic pressure is mainly due to the maritime economy and urbanization, especially human overexploitation of marine and other natural resources, which leads to coastal zone ecosystems exceeding their ecological capacity, which leads to partial collapse of the ecosystem. The article provides an overview of existing systems of indicators for assessing the vulnerability of coastal zone ecosystems and proposes an approach to ecosystem management that involves the participation of several parties in the process of exploitation of coastal resources in order to achieve sustainable development. Based on the above review, a pressure measurement has been added to the traditional site-tolerance-tolerance model to develop a target-pressure-tolerance-tolerance model for assessing coastal zone ecosystem vulnerability. A method for calculating each group of indicators is proposed. The indicators and methods for determining their values selected in this article are generally applicable to all ecosystems of the coastal zone.

**Keywords:** Coastal zones, object, pressure, endurance, resilience, model.

**References**

1. Almutairi A., Mourshed M., & Ameen R.F.M. Coastal community resilience frameworks for disaster risk management. *Nat Hazards*. 2020. No. 101. P. 595–630. DOI: 10.1007/s11069-020-03875-3.
2. Omer A., Elagib N.A., Zhuguo M., Saleem F., Mohammed A. Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities. *Science of The Total Environment*. Vol. 749. 2020. P. 141446. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141446.
3. Pinto R., Martins F.C. The Portuguese National Strategy for Integrated Coastal Zone Management as a spatial planning instrument to climate change adaptation in the Minho River Estuary (Portugal NW-Coastal Zone). *Environmental Science & Policy*. Vol. 33. 2013. P. 76–96. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.04.005.
4. Montefalcone M. Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: a review. *Ecological Indicators*. Vol. 9. Iss. 4. 2009. P. 595–604. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.09.013.
5. Halpern B., Longo C., Hardy D. et al. An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*. 2012. No. 488. P. 615–620. DOI: 10.1038/nature11397.
6. Heng Cai, Nina S. N. Lam, Lei Zou & Yi Qiang (2018) Modeling the Dynamics of Community Resilience to Coastal Hazards Using a Bayesian Network. *Annals of the American Association of Geographers*. Vol. 108. No. 5. P. 1260–1279. DOI: 10.1080/24694452.2017.1421896.
7. Rasoulkhani K., Mostafavi A., Reyes M.P., Batouli M. Resilience planning in hazards-humans-infrastructure nexus: A multi-agent simulation for exploratory assessment of coastal water supply infrastructure adaptation to sea-level rise. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 125. 2020. P. 104636. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104636.
8. Bernhardt J.R., Leslie H.M. Resilience to Climate Change in Coastal Marine. *Ecosystems Annual Review of Marine Science*. Vol. 5. P. 371–392. January 2013. DOI: 10.1146/annurev-marine-121211-172411.
9. Santos C.F., Michel J., Neves M., Janeiro J., Andrade F., Orbach M. Marine spatial planning and oil spill risk analysis: Finding common grounds. *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 74. Iss. 1. 2013. P. 73–81. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.07.029.
10. Wu J., Chen B., Mao J., Feng Z. Spatiotemporal evolution of carbon sequestration vulnerability and its relationship with urbanization in China's coastal zone. *Science of The Total Environment*. Vol. 645. 2018. P. 692–701. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.086.
11. Pramanik M.K., Biswas S.S., Mondal B. et al. Coastal vulnerability assessment of the predicted sea level rise in the coastal zone of Krishna – Godavari delta region, Andhra Pradesh, East Coast of India. *Environ. Dev. Sustain*. 2016. No. 18. P. 1635–1655. DOI: 10.1007/s10668-015-9708-0.
12. Dutta D., Wright W. & Rayment P. Synthetic impact response functions for flood vulnerability analysis and adaptation measures in coastal zones under changing climatic conditions: a case study in Gippsland coastal region, Australia. *Nat. Hazards*. 2011. No. 59. P. 967–986. DOI: 10.1007/s11069-011-9812-x.
13. Hao-Tian C., Gui-Zhen H., Yong-Long L., Jing-Jing F. Integrated assessment of ecological carrying capacity in coastal cities: A case study in Lianyungang city. *Acta Ecologica Sinica*. 2020. P. 1–10.
14. Wu W., Chen J., Ye Ry. Vulnerability assessment of urban socio-ecological systems in coastal zones under the influence of typhoons: Big data perspective. *Acta Ecologica Sinica*. 2019. P. 692–701.
15. Cai H., Nina S.N. Lam, Lei Zou Yi Qiang. Modeling the Dynamics of Community Resilience to Coastal Hazards

Using a Bayesian Network. *Annals of the American Association of Geographers*. 2017. Vol. 108. 2018. Iss. 5. P. 1260–1279. DOI: 10.1080/24694452.2017.1421896.

16. Yao Wang, Mingxun Li, Fanling Meng, Ge Lou. HPIP expression predicts chemoresistance and poor clinical outcomes in patients with epithelial ovarian cancer. *Human Pathology*. Vol. 60. 2017. P. 114–120. DOI: 10.1016/j.humpath.2016.10.015.

17. Rumson A.G., Garcia A.P., Hallett S.H. The role of data within coastal resilience assessments: an East Anglia, UK, case study. *Ocean & Coastal Management*. Vol. 185. 2020. P. 105004. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.105004.

18. Jozaei J., Mitchell M., Clement S. Using a resilience thinking approach to improve coastal governance responses to complexity and uncertainty: a Tasmanian case study, Australia. *Journal of Env. Management*. Vol. 253. 2020. P. 109662. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109662.

19. Merrill A.N.H., Mulvaney K.K., Martin D.M., Chintala M.M., Berry W., Gleason T.R. A Resilience Framework

for Chronic Exposures: Water Quality and Ecosystem Services in Coastal Social-Ecological Systems. *Coastal Management*. Vol. 46. 2018. Iss. 4: Applying Ecosystem Services to the Practice of Coastal Management: Understanding Values, a special issue from the coastal society, guest-edited by T. Smythe and E. Washburn. P. 242–258. DOI: 10.1080/08920753.2018.1474066.

20. Jatin Nathwani, Xiaoli Lu, Chunyou Wu, Guo Fu, Xiaonan Qin. Quantifying security and resilience of Chinese coastal urban ecosystems. *Science of The Total Environment*. Vol. 672. 2019. P. 51–60. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.322.

21. Lam N.S.-N., Qiang Yi, Arenas H., Brito P. & Liu Kam-Biu. Mapping and assessing coastal resilience in the Caribbean region. *Cartography and Geographic Information Science*. Vol. 42. 2015. Iss. 4. P. 315–322. DOI: 10.1080/15230406.2015.1040999.

22. Lam N.N.S. et al. Measuring community resilience to coastal hazards along the Northern Gulf of Mexico. *Natural Hazards Review*. 2016. T. 17. No 1. P. 04015013.