

Оценки экологического риска для шельфовых экосистем на основе моделирования

Н. В. Соловьева

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
e-mail: soloceanic@yandex.ru*

Поступила 15.06.2020 г.; принята к публикации 10.08.2020 г.; опубликована 25.09.2020 г.

Целью работы является проведение модельных оценок экологического риска для экосистемы Северного Каспия при различных сочетаниях стрессоров. Знания о состоянии экосистем эстуариев, шельфов и прогноз изменений при интенсивном антропогенном воздействии и колебаниях климата приобретает все большую значимость в связи с проблемой управления морскими системами и рисками освоения их ресурсов. Обеспечить экологическую безопасность при одновременной минимизации затрат очень трудно. Это можно объяснить не только противоречиями между задачами экологии и экономики, но и сложившейся практикой применения в каждой из этих областей самостоятельных подходов, при которой комплексный характер реального изучаемого объекта во внимание не принимается. В технократической практике принятие бизнес-решений ориентировано в первую очередь на достижение экономических показателей при отсутствии должного учета экологического фактора. В настоящей работе предложен метод оценок экологического риска, основанный на совместном использовании динамических (экосистемных) моделей, вероятностных экоскрининговых методов и данных наблюдений. Результаты расчета риска на основе такого синтеза открывают возможности согласования экологических и экономических целей безопасного освоения шельфа.

Ключевые слова: экологический риск, вероятность допустимых воздействий, экосистема шельфа.

Благодарности: данная работа подготовлена в рамках государственного задания № 0149-2020-0005. Автор выражает благодарность руководителям лабораторий Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, в частности доктору биологических наук В. А. Силкину за обсуждение направлений моделирования с рисковым подходом, действительному члену Российской академии наук Л. И. Лобковскому за предложение по внедрению полученных результатов в проекты освоения ресурсов шельфа, доктору биологических наук Т. А. Шигановой за обсуждения проблем планктона в Каспийском море, а также доктору географических наук Е. Е. Совге (МГИ РАН) за поддержку работы при представлении в журнал «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря».

Для цитирования: Соловьева Н. В. Оценки экологического риска для шельфовых экосистем на основе моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 107–121. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-107-121

© Соловьева Н. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Modelling-Based Estimations of the Ecological Risk for Shelf Ecosystems

N. V. Solovjova

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: soloceanic@yandex.ru*

Submitted 15.06.2020; revised 10.08.2020; published 25.09.2020

This paper aims at performing model evaluations of ecological risk for the North Caspian ecosystem in case of various combinations of stressors. Knowing the status of estuary and shelf ecosystems as well as prediction of changes under intense anthropogenic influence and climate fluctuations are getting more and more important due to the issue of marine system management and risks related to development of their resources. It is rather difficult to provide ecological safety and simultaneously minimize costs. This can be explained not only by controversies between ecological and economical tasks but also by a common practice to apply separate methods in each of these fields without taking into account the complex nature of a real object under study. In a technocratic practice, making business decisions is aimed mostly at achievement of economic indicators without proper consideration of the ecological factor. The paper offers a method for ecological risk evaluation based on combined use of dynamic (ecosystemic) models, probability ecoscrining methods and observational data. Risk evaluation results using this synthesis allow for aligning ecological and economical purposes of safe shelf development.

Keywords: ecological risk, admissible impact probability, shelf ecosystem.

Acknowledgements: this study is performed under State Order no. 0149-2020-0005. The author is grateful to laboratory heads of Shirshov Institute of Oceanology, RAS, namely to V. A. Silkin, Dr.Sci. (Biol.), for discussion of directions of modelling with a risk-based approach; to academician of the Russian Academy of Sciences L. I. Lobkovsky for the proposal to apply the obtained results to shelf development projects; to T. A. Shiganova, Dr.Sci. (Biol.), for discussion of plankton problems in the Caspian Sea; as well as to E. E. Sovga (MHI RAS), Dr.Sci. (Biol.), for support of the paper when submitting it to *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea Journal*.

For citation: Solovjova, N.V., 2020. Modelling-Based Estimations of the Ecological Risk for Shelf Ecosystems. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 107–121. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-107-121 (in Russian).

Введение

Шельфовые экосистемы являются наиболее продуктивными районами Мирового океана, а также обеспечены большими запасами минеральных ресурсов, интенсивность разработок которых увеличивается в последние десятилетия. В этом смысле шельф занимает ключевое положение в решении вопроса разработки ресурсов. Вместе с тем существование процессов различного генезиса в шельфовых экосистемах на фоне климатических изменений и антропогенного пресса делают эти акватории сосредоточением проблем, связанных с обеспечением экологической безопасности. Экосистемные риски для шельфовых и эстуарных районов интегрируют в себе последствия климатических и естественных неблагоприятных условий, внешних антропогенных и инвазивных факторов и серьезно затрагивают

экономику. Согласование экологических и экономических требований становится важнейшим аспектом управления шельфовыми экосистемами и требует привлечения методов математического моделирования, натуральных и дистанционных наблюдений, а также выработки нового подхода к оценке риска в условиях быстро изменяющейся окружающей среды.

Методы моделирования оценок риска, основанные на сетевом анализе (*Ecological Network Analysis, ENA*), давно и успешно применяются для экосистем шельфа и эстуариев [1–6] не только в рамках стационарной структуры экосистемы, но и при изменениях в ее структуре. Требования к данным для ENA включают наличие межсекторальных потоков, секторальных хранилищ и граничных потоков ввода и вывода [1, 2]. Применение таких требований помогает в предоставлении практической информации лицам, принимающим решения в области охраны окружающей среды [3, 4]. Количественные методы оценки экологических рисков (*Ecological Risk Assessment, ERA*) учитывают воздействие химических и нехимических стрессоров на разные уровни биологической организации и пространственного масштаба и являются инструментами управления природными ресурсами [2, 4]. Различные подходы к оценке риска влияния отдельных стрессоров основаны на количественных и полуквантитативных методах, ранжировании стрессоров, индексации уровня риска, составлении карт и матриц риска, матриц полезности сети, экспертных оценок [2]. В региональную оценку экологического риска входит широко используемая оценка относительного риска (*Relative Risk Assessment, RRA*), основанная на весе фактических данных (*Weight-of-Evidence, WOE*) [5]. Отмечается, что результатом практического применения таких методов экологического риска, как *ERA* и *RRA* для морских систем, становятся лишь общие рекомендации по решению проблем в форме стратегий [6].

Одним из распространенных подходов к оценке риска является построение матриц экологического риска, отражающих вероятность возникновения опасного события и тяжесть возможных последствий с учетом известных технологий освоения нефтяных ресурсов на шельфе [7]. Использование таких матриц позволяет оценить степень ущерба природным ресурсам шельфа и время восстановления после опасного события, например разлива нефти, сброса бурового раствора и т. д. При этом остается неучтенной временная динамика экологического риска в пределах вариации основных параметров экосистемы, что приобретает значение при совместном действии климатических, природных неблагоприятных факторов и антропогенной нагрузки, когда, исходя из принципов предосторожности [7], особое внимание следует уделять комбинированному влиянию наиболее неблагоприятных условий на экосистему и прогнозированию последствий их кумулятивного воздействия.

Отметим, что широкий спектр методов, применяемых для создания эффективного инструмента оценки экологического риска, оказывается мало востребованным из-за довольно общих рекомендаций. Модели ограничиваются мгновенным вычислением причинно-следственных связей отдельных факторов и часто игнорируют системные эффекты, поэтому не могут реализовать целостную оценку во временной динамике на экосистемном уровне [1, 6].

При этом очевидно, что недостаточно рассматривать только кумулятивный эффект стрессоров в условиях статической экосистемы. Необходимо

сочетать динамику стрессоров с динамикой функционирования экосистемы. Это может быть сделано путем синтеза динамических моделей состояния экосистем с экоскрининговыми моделями вероятностных оценок риска и данными наблюдений с учетом кумулятивного эффекта стрессоров, что и предлагается в настоящей работе. В отличие от существующих подходов, связанных с ранжированием и составлением матриц риска, предложенный метод, основанный на вероятностных экоскрининговых оценках риска, учитывает не только изменяющиеся условия внешних воздействий на экосистему шельфа, но и внутригодовую динамику хода ее основных компонент. Это позволяет рассчитывать экологический риск не как фиксированную величину для исследуемой экосистемы, а как изменяющуюся в течение года вместе с внутригодовой динамикой функционирования ее компонент. Такая возможность особенно важна для шельфа, где сосредоточены процессы различного генезиса, присутствуют высокие градиенты значений биомасс и концентраций компонент шельфа. Метод основан на синтезе известного динамического (экосистемного) подхода [8, 9], экоскрининговых оценок риска [10, 11] и использовании данных наблюдений [12, 13].

Материалы и методы. Вероятностная модель риска

Для моделирования различных сценариев сочетания воздействия внешних стрессоров и внутригодовой динамики функционирования экосистемы была выбрана акватория шельфа Северного Каспия, подверженная интенсивному влиянию речного стока и антропогенной нагрузке при освоении ресурсов, в том числе и нефтегазовых. Структура метода включает в себя следующее. Входными данными для модели оценки риска могут быть данные натуральных наблюдений биомасс (численностей) организмов или результаты моделирования состояния экосистемы с использованием динамических моделей (экосистемный подход) [12, 13]. В обоих случаях имеют место подъемы и спады биомасс в популяциях (сезонные максимумы и минимумы), используемые как входные данные для расчета вероятности экологического риска, значения которой также претерпевают изменения в течение года. Периоды подъемов и спадов численности популяций не совпадают с календарными сезонами. Максимальные значения численности для каждого m -го подъема N_{\max} и спада N'_{\max} ; $m = \overline{1, M}$, где M – количество периодов подъем – спад в течение года, а также средние значения численностей или биомасс. Значение M может меняться от года к году под воздействием естественных и антропогенных факторов.

В общем случае для $2M$ внутригодовых состояний популяции подъем – спад при K внутригодовых состояниях технической системы (технологического режима) получена оценка внутригодового риска в следующем виде [10–12, 14]:

$$y_k \leq \sum_{k=1}^K q_k \sum_{m=1}^M p_{km} y_{km} = \sum_{k=1}^K q_k \sum_{m=1}^M (p_{am} y_{am} + p'_{am} y'_{am})_k = \sum_{k=1}^K q_k y_a, \quad (1)$$

где q_k – вероятность аварии технической системы (или в общем случае вероятность допустимой антропогенной нагрузки, предусмотренной технологическими процессами) в течение года; p_{km} – вероятность m -го состояния

биосистемы при k -ом состоянии технической системы; y_k – вероятность риска биосистемы при k -ом состоянии технической системы; y_{km} – вероятность риска биосистемы при k -ом состоянии техсистемы и m -ом состоянии биосистемы; p_{am} , y_{am} и p'_{am} , y'_{am} – вероятности пребывания биосистемы в m -ом внутригодовом состоянии подъема и спада и ее риск в них соответственно; \bar{y}_a – экологический риск в течение года:

$$\bar{y}_a = \sum_{m=1}^M (p_{am} y_{am} + p'_{am} y'_{am})_k; \quad \sum_{m=1}^M (p_{am} + p'_{am}) = 1; \quad \sum_{k=1}^K q_k = 1. \quad (2)$$

Значения p_{am} и p'_{am} определяются относительной продолжительностью подъемов и спадов:

$$p_{am} = t_m / t; \quad p'_{am} = t'_m / t; \quad \sum_{m=1}^M (t_m + t'_m) = t, \quad (3)$$

где t_m , t'_m и t – продолжительность подъемов, спадов и года соответственно в произвольных единицах измерения.

Обобщение соотношений экоскрининга на случай зависимости риска от времени дает следующее [10, 13, 14]:

$$y_a \leq \begin{cases} \frac{1 - E_v / N_{\max}}{(1 - N_{cr} / N_{\max})^2} \\ \exp\left(-\frac{(1 - N_{cr} / N_{\max})^2}{2(1 - \bar{E}_v / N_{\max})}\right) \end{cases}. \quad (4)$$

Величины N_{cr} и N_{\max} являются видоспецифическими постоянными значениями для популяции, не зависящими от m -го состояния ее внутри года. Зависимыми от времени величинами являются только $E_m v$ и $E'_m v$.

$$\bar{E}_v = \sum_{m=1}^M (p_{am} E_m v + p'_{am} E'_m v)_k, \quad (5)$$

где $E_m v$ и $E'_m v$ – математическое ожидание численности популяции на подъемах и спадах соответственно. Эти значения дают численные эксперименты с экосистемной математической моделью или данные наблюдений [15, 16].

Используя соотношения экоскрининга [10, 11] для определения предельно допустимого воздействия на экосистему, получим ее вероятность в следующем виде [15]:

$$Q = \begin{cases} 1, & \text{при } y_k \leq y_d \\ \frac{y_d}{y_k} & \text{при } y_d < y_k < 1, \\ y_d, & \text{при } y_k = 1 \end{cases} \quad (6)$$

где y_k определяется оценкой (1); Q – предельно допустимая вероятность антропогенных воздействий для экологической системы; y_d – предельно допустимый экологический риск при различных видах техногенной деятельности.

Для расчета y_a и Q используются значения N_{\max} , N_{cr} , p_{am} , p'_{am} , $E_m v$ и $E'_m v$, полученные в результате численных экспериментов с динамической моделью экосистемы [12, 15, 16], или данные натуральных наблюдений.

Использование данных наблюдений

В настоящей работе были использованы данные наблюдений за сезонными изменениями биомассы фитопланктона в Северном Каспии [16–19]. Для оценки экологического риска при эксплуатации технических объектов добычи нефтегазовых ресурсов и оценки вероятности допустимых воздействий на экосистему было выбрано первичное звено трофической цепи (фитопланктон), состояние которого будет одним из факторов устойчивости всей структуры экосистемы.

Наблюдения временных вариаций биомассы и численности фитопланктона и зоопланктона осуществлялись вместе с анализом распределения T ($^{\circ}\text{C}$), S (‰), O_2 , P , Si , NO_3 , NH_4 , а также гидрофизических характеристик акватории [16, 17]. Анализ наблюдений позволил сделать выводы о наличии мощного антициклонического круговорота, ось которого вытянута с юго-запада на северо-восток. Вдоль этого направления наблюдается резкое понижение концентрации минеральных форм биогенных элементов. Концентрация фосфатов, нитратов и кремниевой кислоты падает почти до аналитического нуля. Температура поверхностного слоя в летний период достигает 26°C . Концентрация органического фосфора ($3.2\text{--}4.0$ мкмоль/л) и органического азота ($50\text{--}60$ мкмоль/л) очень высока. Пересыщение поверхностных вод растворенным кислородом ($110\text{--}120\%$) подтверждает наличие интенсивного процесса фотосинтеза [18].

В последние десятилетия в шельфовых экосистемах наблюдаются изменения, напрямую не связанные с антропогенным воздействием и затрагивающие не только количественные параметры среды, но и само направление тренда. Такие изменения коснулись и экосистемы шельфа Северного Каспия в связи с инвазивными процессами. Наблюдения 2002–2010 гг. и последующих лет выявили широкий диапазон количественных показателей весеннего развития фитопланктона на акватории Северного Каспия [17–19]. По результатам наблюдений в августе 2002 г., суммарная биомасса фитопланктона колебалась от 79.9 до 280.7 мг/м³, цианобактерий – от 30.7 до 208.2 мг/м³, диатомовых водорослей – от 6.2 до 46 мг/м³, зеленых водорослей – от 0.33 до 52.4 мг/м³ [16]. Средняя биомасса по всему району составляла 180 ± 73 мг/м³, а численность составляла $195\,590 \pm 114\,070$ кл./л, что характерно для нижнего предела мезотрофных вод [19]. Однако реальная биомасса и численность фитопланктона, вероятно, были на $20\text{--}30\%$ выше за счет неучтенных фракций: пикопланктона (< 2 мкм) и мелких фитофлагеллят ($4\text{--}8$ мкм) [16]. Вселение гребневика, потребляющего зоопланктон, снизило пресс на фитопланктон, количественные показатели которого возросли в последнее десятилетие [19]. Конец биологической весны приходится на июнь, что обусловлено изменением видового состава фитопланктона. Суммарная биомасса по наблюдениям составляет до $1.2\text{--}2$ г/м³ [17]. С характерным для осени снижением температуры происходит снижение биомассы фитопланктона, составляющее, по многолетним данным полевых наблюдений в октябре, от $1\text{--}2$ г/м³ до $2\text{--}3$ мг/м³ [19]. Осенний максимум биомассы фитопланктона, по наблюдениям, меньше летнего в $2\text{--}3$ раза.

Сезонное увеличение биомассы зоопланктона следует за сезонным пиком биомассы фитопланктона с запаздыванием по времени, что отражает

трофическую связь между данными компонентами. По наблюдениям, количественные характеристики развития зоопланктона варьировали в широком диапазоне величин: средняя численность зоопланктона в летний период 2005–2010 гг. колебалась от 110 до 800 тыс. экз./м³, а биомасса – от 900 до 6000 мг/м³; осенью эти показатели были в основном ниже летних и составляли 45–300 тыс. экз./м³ и 350–1900 мг/м³ соответственно [18, 19]. Наблюдения показали снижение к осени численности зоопланктона в 2.5 раза, а биомассы в 3.7 раза, что свидетельствует о выедании его гребневиком [19]. Максимумы биомассы гребневика следуют с запаздыванием за пиками значений биомассы зоопланктона. Наблюдения показали два таких максимума – летний и осенний [20], соответствующие интенсивному развитию гребневика в Северном Каспии [16, 18].

Данные наблюдений использовались для задания значений N_{\max} , N_{cr} , p_{am} , p'_{am} , $E_m v$ и $E'_m v$ в соотношениях (1)–(6). Для задания этих значений можно использовать совместно данные наблюдений и расчеты по динамической модели шельфа [12, 15, 16].

Результаты расчетов

Наиболее опасная для морской экологической системы ситуация возникает при сочетании естественных неблагоприятных условий, антропогенных воздействий и инвазий. Наименее опасные экологические условия соответствуют области наличия только неблагоприятных естественных условий и отсутствия антропогенных воздействий и инвазий. Используя только экспертные оценки, весьма затруднительно выявить, при каких сочетаниях стрессоров и периодов воздействия риск будет выше: например, в случае длительного воздействия при подъеме биомассы (сезонном максимуме) или кратковременного воздействия при минимуме биомассы. Для учета последствий множества возможных сочетаний естественного хода биомасс компонентов шельфовой экосистемы, вариаций стрессоров, объемов и режимов воздействий на экосистему одного лишь экспертного анализа мало. Необходимо с помощью количественных оценок оконтурить особо опасные области в пространстве значений риска. Предложенный метод позволяет проводить такие оценки. В подтверждение работоспособности метода в настоящей работе приведены три сценария расчетов, которые осуществлялись пошагово как в отношении учитываемых компонент экосистемы, так и в отношении сочетания и режимов воздействия стрессоров – от наименее опасной области к более опасной.

Значения y_d в соотношениях (6) выбраны на основе данных экологического состояния, обобщенных оценок техногенных воздействий и экологических последствий на этапах освоения нефтяных ресурсов шельфа. Согласно данным [7, 14, 21], интервал значений вероятности допустимого экологического риска при различных видах и этапах технологической деятельности составляет от 10^{-7} до 10^{-1} . На основании этих данных для расчета Q выбраны три значения, соответствующие повышенным ($y_d = 10^{-5}$), средним ($y_d = 10^{-4}$) и ослабленным ($y_d = 10^{-3}$) требованиям к качеству экосистемы. Вероятность воздействия на экосистему со стороны технических систем в процессе работ на шельфе, заложенная в технологические процессы, q_k выбиралась с учетом зарубежных и отечественных данных [7]. Из диапазона

изменения q_k от 10^{-4} до 10^{-1} были выбраны значения вероятности редкого события $q_1 = 10^{-3}$, события средней частоты $q_2 = 10^{-2}$ и часто происходящего $q_3 = 10^{-1}$. С использованием приведенных выше условий и расчетов по соотношениям (1)–(6) были проведены оценки допустимой вероятности Q воздействия на экосистему [14, 21] для следующих сценариев.

Сценарий 1. Для расчета экологического риска и вероятности допустимого воздействия по соотношениям (1)–(6) на основе данных наблюдений для северо-каспийской экосистемы [17–19] были взяты средние $E_m v$, максимальные $N_{\max} = 7 \cdot 10^3$ мг/м³ и критические $N_{cr} = 10$ мг/м³ значения биомассы. Учитывалось сочетание естественных неблагоприятных факторов (пониженная освещенность [15]) и антропогенное воздействие типа «авария технической системы при весеннем подъеме биомассы фитопланктона» продолжительностью один месяц в соотношениях (3) $P_{am} = t_m/t = 1/12$. При значениях $q_1 = 10^{-3}$, $q_2 = 10^{-2}$, $q_3 = 10^{-1}$ и $y_d = 10^{-5}$ получены следующие результаты (рис. 1).

Анализ полученного результата (рис. 1) показал, что только при значении $q_1 = 10^{-3}$ (редком событии воздействия на экосистему) и высоких значениях биомассы фитопланктона ($6 \cdot 10^3$ мг/м³ [15, 17, 21]) расчет дает высокие

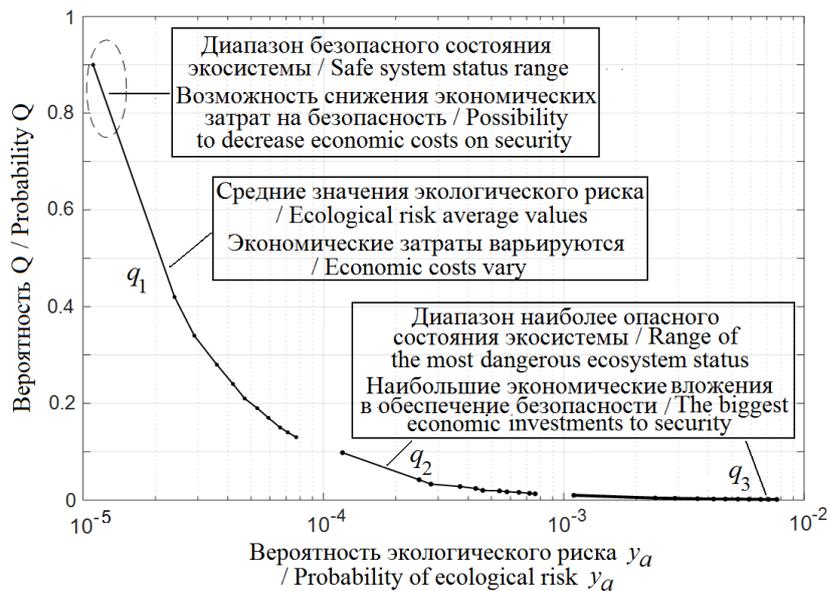


Рис. 1. Зависимость допустимой вероятности антропогенного (техногенного) воздействия Q от экологического риска y_a при низкой (q_1), средней (q_2) и высокой (q_3) вероятности аварии технической системы в экосистеме шельфа Северного Каспия во время весеннего подъема биомассы фитопланктона длительностью 1 месяц и $y_d = 10^{-5}$

Fig. 1. Dependence of admissible probability of anthropogenic (technology-related) impact Q on ecological risk y_a at low (q_1), mean (q_2) and high (q_3) probability of technological unit accident rate in the North Caspian shelf ecosystem during the one month-long spring growth of phytoplankton biomass and $y_d = 10^{-5}$

значения (до 0.9) допустимой вероятности антропогенного воздействия указанного типа. При низких значениях биомассы и редком антропогенном воздействии допустимая вероятность Q не превышает 0.2 (рис. 1). А при более частых технологических аварийных ситуациях $q_2 = 10^{-2}$ и $q_3 = 10^{-1}$ вероятность допустимого воздействия не должна превышать единиц и долей процента (рис. 1).

Сценарий 2. Для летнего подъема с одним летним максимумом биомассы фитопланктона [17, 18] рассчитывалась допустимая вероятность более длительного воздействия, в течение трех расчетных месяцев ($P_{am} = t_m/t = 1/4$), при тех же значениях q_1 , q_2 и q_3 . Для расчета средних значений биомассы фитопланктона $E_m v$ (соотношения (4)) использованы данные наблюдений [19]. Полученные результаты показали, что увеличение длительности антропогенного воздействия до трех месяцев снижает допустимую вероятность такой нагрузки почти в два раза (по сравнению со сценарием 1): $Q = 0.42$ (рис. 2). Предложенный метод оценки риска и вероятности воздействия



Рис. 2. Зависимость допустимой вероятности антропогенного (техногенного) воздействия Q от экологического риска y_a при низкой (q_1), средней (q_2) и высокой (q_3) вероятности аварии технической системы в экосистеме шельфа Северного Каспия во время весеннего подъема биомассы фитопланктона длительностью 3 месяца и $y_d = 10^{-5}$

Fig. 2. Dependence of admissible probability of anthropogenic (technology-related) impact Q on ecological risk y_a at low (q_1), mean (q_2) and high (q_3) probability of technological unit accident rate in the North Caspian shelf ecosystem during the three month-long spring growth of phytoplankton biomass and $y_d = 10^{-5}$

применим в рамках существующей трофической структуры экосистемы, даже если отдельные ее компоненты переходят на какое-то ограниченное время в теплящееся состояние.

Сценарий 3 отличается от предыдущих более мягкими требованиями к качеству экосистемы, характеризующимися допустимой вероятностью экологического риска $y_d = 10^{-4}$. При таком снижении требований (увеличении допустимого экологического риска y_d от значений 10^{-5} до значений 10^{-4}) допустимая вероятность антропогенной нагрузки Q приближается к 1 (100 %) только при редких событиях $q_1 = 10^{-3}$ (рис. 3, сектор Q_1). Для воздействия средней частоты (сектор Q_2 , где $q_2 = 10^{-2}$) допустимая вероятность антропогенной нагрузки Q находится в широком диапазоне значений от 13 до 83 %, что требует перераспределения экономических затрат на безопасность. В случае частых воздействий (рис. 3, сектор Q_3 , где $q_3 = 10^{-1}$) допустимая вероятность антропогенной нагрузки Q менее 1 %. Если такого технологического регламента невозможно избежать, то необходимо увеличить экономические затраты на обеспечение экологической безопасности.

Результаты оценки экологического риска показали, что для экосистемы Северного Каспия в условиях естественных подъемов и спадов биомассы фитопланктона существуют сценарии антропогенного воздействия, которые позволяют снизить надежностное обеспечение технологических процессов освоения ресурсов, тем самым сокращая затраты и расширяя спектр применяемых технологий.

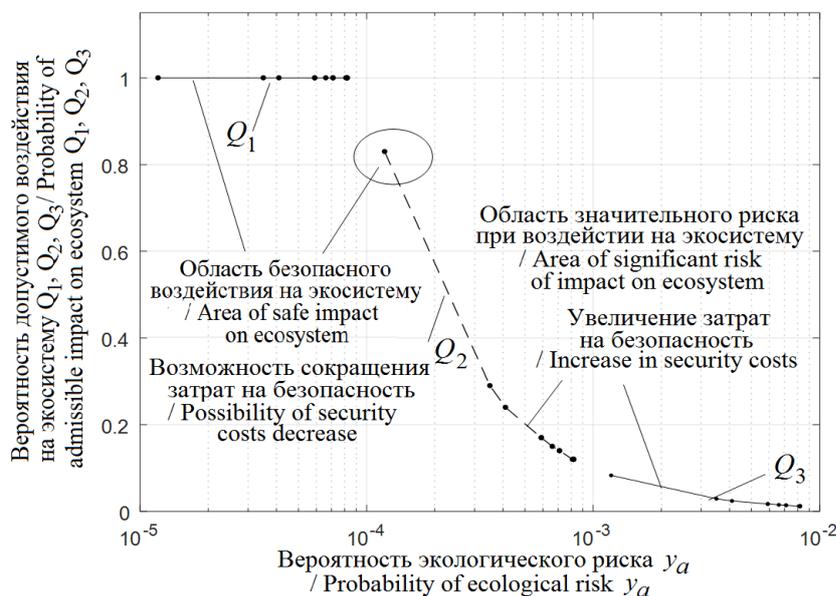


Рис. 3. Зависимость вероятности допустимого воздействия на экосистему Северного Каспия от значений экологического риска y_a и $y_d = 10^{-4}$ (при низкой Q_1 , средней Q_2 и высокой Q_3 вероятности воздействия)

Fig. 3. Dependence of probability of admissible impact on the North Caspian ecosystem on ecological risk values y_a and $y_d = 10^{-4}$ (at low Q_1 , mean Q_2 and high Q_3 probability of impact)

Выводы

Результаты модельных расчетов вероятности экологического риска при сочетании неблагоприятных естественных факторов, аварийных и штатных антропогенных воздействиях в различные периоды естественной динамики компонент экосистемы шельфа показали работоспособность предложенного метода и позволили оценить вероятности допустимого воздействия на шельфовую экосистему, выделить области со 100%-ной допустимой вероятностью воздействия и особо критичные области с допустимой вероятностью воздействий менее 5 %. При практическом использовании методов оценки рисков важно различать три диапазона по шкале вероятности: высокий, низкий и средний диапазоны допустимой вероятности риска, которые нормируются и регулируются стандартами разных стран. Определение границ и критериев приемлемого экологического риска в разных странах и при разных путях освоения морских ресурсов является достаточно условным и зависит не только от экологических требований, но и от экономических, социальных и иных ограничений. В рамках концепции экосистемно-ориентированных исследований, объединяющей природные и экономические аспекты, метод оценки экологического риска позволит избежать ошибок 1-го и 2-го рода. Если безопасная ситуация принимается как ситуация, представляющая угрозу безопасности экосистемы (ошибка 1-го рода), тогда чрезмерная осторожность, связанная с ложной тревогой, не так опасна (хотя и приводит к неоправданным расходам), как ошибка 2-го рода, когда опасная ситуация скрыта внешним благополучием.

Возможность рассчитывать внутригодовую динамику экологического риска параллельно с внутригодовой динамикой компонент экосистемы шельфа является новым подходом по сравнению с ранжированием и матричными методами оценки риска. Вместе с тем синтез всех имеющихся методов может стать весьма эффективным инструментом в управлении риском. Перебор возможных сочетаний стрессоров и регламентов воздействий выделит области (имеются в виду области сочетания стрессоров и режимов воздействий) с практически несущественными последствиями воздействий (100%-ная допустимая вероятность воздействий) и критические области с высоким экологическим риском и допустимой вероятностью воздействий менее 5 %. Знание таких областей и периодов вариаций риска открывает новые возможности согласования экологических и экономических требований к безопасному освоению ресурсов шельфа. Другими словами, появляется возможность управления риском на основе количественного подхода к оценкам допустимых воздействий.

Обеспечить экологическую безопасность при одновременной минимизации затрат очень трудно. Технократический подход к освоению ресурсов шельфа ориентирован в первую очередь на достижение экономических показателей при отсутствии должного учета экологического фактора. Первичность в определении допустимой величины экологического риска и на ее основе – допустимой интенсивности антропогенного воздействия в методе моделирования риска позволит согласовать эколого-экономические требования с минимальными вероятными затратами на безопасность. Иными словами, нет необходимости поддерживать постоянный уровень финансирования

экономических мероприятий по обеспечению экологической безопасности. Более рациональный подход мог бы заключаться в координации курса изменений риска и затрат, необходимых для его предотвращения.

Эффективное практическое применение указанного подхода требует достаточно полной базы данных натуральных наблюдений за компонентами и процессами в исследуемых экосистемах, а также проведения серий предварительных численных экспериментов с экосистемными моделями. Понижение оценки условного риска для групп живых организмов по мере уменьшения неопределенности ситуации (при проведении необходимых исследований и пополнении баз данных) позволяет уточнять значения допустимой вероятности антропогенных воздействий. Такое уточнение непосредственно связано с понижением надежностных требований к эксплуатируемому оборудованию и расширяет спектр применения различных технологий. Это создает условия для снижения затрат на создание, поддержание и функционирование технических систем при безопасном освоении ресурсов шельфовых экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen S., Fath B. D., Chen B.* Information-based network environ analysis: a system perspective for ecological risk assessment // *Ecological Indicators*. 2011. Vol. 11, iss. 6. P. 1664–1672. doi:10.1016/j.ecolind.2011.04.013
2. *Chen S., Chen B., Fath B. D.* Ecological risk assessment on the system scale: a review of state-of-the-art models future perspectives // *Ecological Modelling*. 2013. Vol. 250. P. 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.015>
3. *Elliott M., Cutts N. D., Trono A.* A typology of marine and estuarine hazards and risks as vectors of change: A review for vulnerable coasts and their management // *Ocean and Coastal Management*. 2014. Vol. 93. P. 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.03.014>
4. Ecological network analysis metrics: the need for an entire ecosystem approach in management and policy / B. D. Fath [et al.] // *Ocean & Coastal Management*. 2019. Vol. 174. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.007>
5. *Landis W. G.* Ecological risk assessment conceptual model formulation for nonindigenous species // *Risk Analysis*. 2004. Vol. 24, iss. 4. P. 847–858. doi:10.1111/j.0272-4332.2004.00483.x
6. *Astles K. L.* Linking risk factors to risk treatment in ecological risk assessment of marine biodiversity // *ICES Journal of Marine Science*. 2015. Vol. 72, iss. 3. P. 1116–1132. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu207>
7. *Патин С. А.* Нефть и экология континентального шельфа: в 2-х т. Т. 1 : Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. М.: Изд-во ВНИРО, 2017. 326 с. URL: https://gubkin.ru/faculty/geology_and_geophysics/chairs_and_departments/kafedra-geoekologii/methodological-materials/neft_i_eko_kont_shalf_t1.pdf (дата обращения: 16.08.2020).
8. *Беляев В. И.* Моделирование морских систем. К.: Наукова думка, 1987. 203 с.
9. *Belyaev V. I., Konduforova N. V.* Modelling of the shelf ecosystem // *Ecological Modelling*. 1992. Vol. 60, iss. 2. P. 95–118. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(92\)90041-C](https://doi.org/10.1016/0304-3800(92)90041-C)
10. *Fleishman B. S.* Contribution to the theory of adaptation with application to ecology // *Ecological Modelling*. 1984. Vol. 26, iss. 1–2. P. 21–31. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(84\)90090-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90090-5)

11. Флейшман Б. С. Основы системологии. М. : «Радио и связь», 1982. 368 с.
12. Solovjova N. V. Synthesis of ecosystemic and ecoscreening modelling in solving problems of ecological safety // *Ecological Modelling*. 1999. Vol. 124, iss. 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00122-2)
13. Solovjova N. V., Lobkovsky L. I. A method of ecological and economic risk assessment during the development of the shelf based on mathematical modelling // *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 464, iss. 1. P. 992–996. doi:10.1134/S1028334X15090226
14. Соловьева Н. В., Лобковский Л. И. Метод оценки экологического риска при освоении ресурсов Арктического шельфа // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 1(33). С. 50–60. doi:10.25283/2223-4594-2019-1-50-60
15. Solovjova N. V. Ecological risk modelling in developing resources of ecosystems characterized by varying vulnerability levels // *Ecological Modelling*. 2019. Vol. 406. P. 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.05.015>
16. Solovjova N. V., Shiganova T. A., Lobkovsky L. I. Mathematical modelling of the main parameters of the North Caspian ecosystem under biological pollution // *Russian Journal of Biological Invasions*. 2018. Vol. 9, iss. 3. P. 253–262. <https://doi.org/10.1134/S2075111718030141>
17. Умербаева Р. И., Попова Н. В., Саркисян Н. А. Характеристика планктона мелководной части Северного Каспия // *Юг России: экология, развитие*. 2012. Т. 7, № 1. С. 43–49. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2012-1-43-49>
18. Условия, определяющие распределение гребневика *Mnemiopsis leidyi* и его влияние на экосистему Северного Каспия / Т. А. Шиганова [и др.] // *Океанология*. 2003. Т. 43, № 5. С. 716–733.
19. Population dynamics of *Mnemiopsis leidyi* in the Caspian Sea, and effects on the Caspian ecosystem / Т. А. Shiganova [et al.] // *Aquatic Invasions in the Black, Caspian, and Mediterranean Seas* / Н. Dumont, Т. Shiganova, U. Niermann (eds.). Dordrecht : Kluwer Academic Publication, 2004. P. 71–111. https://doi.org/10.1007/1-4020-2152-6_3
20. Соловьева Н. В. Моделирование изменений трофической структуры экологической системы шельфа при смене доминирующих видов // *Экологические системы и приборы*. 2018. № 1. С. 41–49.
21. Соловьева Н. В. Моделирование кумулятивного влияния внешних факторов на состояние экосистемы шельфа и оценка допустимой вероятности антропогенного воздействия // *Экологические системы и приборы*. 2018. № 11. С. 23–35.

Об авторе:

Соловьева Наталья Владимировна, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4268-7790**, soloceanic@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Chen, S.Q., Fath, B.D. and Chen, B., 2011. Information-based Network Environ Analysis: a System Perspective for Ecological Risk Assessment. *Ecological Indicators*, 11(6), pp. 1664–1672. doi:10.1016/j.ecolind.2011.04.013
2. Chen, S.Q., Chen, B. and Fath, B.D., 2013. Ecological Risk Assessment on the System Scale: a Review of State-of-the-Art Models Future Perspectives. *Ecological Modelling*, 250, pp. 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.015>

3. Elliott, M., Cutts, N.D. and Trono, A., 2014. A Typology of Marine and Estuarine Hazards and Risks as Vectors of Change: a Review for Vulnerable Coasts and their Management. *Ocean and Coastal Management*, 93, pp. 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.03.014>
4. Fath, B.D., Asmus, H., Asmus, R., Baird, D., Borrett, S.R., Jonge, V., Ludovisi, A., Niquil, N., Scharler, U.M. [et al.], 2019. Ecological Network Analysis Metrics: The Need for an Entire Ecosystem Approach in Management and Policy. *Ocean and Coastal Management*, Vol. 174, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.007>
5. Landis, W.G., 2004. Ecological Risk Assessment Conceptual Model Formulation for Nonindigenous Species. *Risk Analysis*, 24(4), pp. 847–858. doi:10.1111/j.0272-4332.2004.00483.x
6. Astles, K.L., 2015. Linking Risk Factors to Risk Treatment in Ecological Risk Assessment of Marine Biodiversity. *ICES Journal of Marine Science*, 72(3), pp. 1116–1132. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu207>
7. Patin, S.A., 2017. *Oil and Continental Shelf Ecology: in 2 vol. Vol. 1: Offshore Oil And Gas Industry: Present Situation, Prospects, Factors of Impact*. Mocsow: VNIRO publishing, 326 p. (in Russian).
8. Belyaev, V.I., 1987. [*Modelling of Marine Systems*]. Kiev: Naukova dumka, 203 p. (in Russian)
9. Belyaev, V.I. and Konduforova, N.V., 1992. Modelling of the Shelf Ecosystem. *Ecological Modelling*, 60(2), pp. 95–118. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(92\)90041-C](https://doi.org/10.1016/0304-3800(92)90041-C)
10. Fleishman, B.S., 1984. Contribution to the Theory of Adaptation with Application to Ecology. *Ecological Modelling*, 26(1–2), pp. 21–31. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(84\)90090-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90090-5)
11. Fleishman, B.S., 1982. [*Fundamentals of Systemology*]. Moscow: Radio i svyaz', 368 p. (in Russian)
12. Solovjova, N.V., 1999. Synthesis of Ecosystemic and Ecoscreening Modelling in Solving Problems of Ecological Safety. *Ecological Modelling*, 124(1), pp. 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00122-2)
13. Solovyova, N.V. and Lobkovsky, L.I., 2015. A Method of Ecological and Economic Risk Assessment during the Development of the Shelf Based on Mathematical Modelling. *Doklady Earth Sciences*, 464(1), pp. 992–996. doi:10.1134/S1028334X15090226
14. Solovieva, N.V. and Lobkovsky, L.I., 2019. Environmental Risk Assessment Method in the Development of the Arctic Shelf Resources. *Arctic Ecology and Economy*, (1), pp. 50–60. doi:10.25283/2223-4594-2019-1-50-60 (in Russian).
15. Solovjova, N.V., 2019. Ecological Risk Modelling in Developing Resources of Ecosystems Characterized by Varying Vulnerability Levels. *Ecological Modelling*, 406, pp. 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.05.015>
16. Solovjova, N.V., Shiganova, T.A. and Lobkovsky, L.I., 2018. Mathematical Modelling of the Main Parameters of the North Caspian Ecosystem under Biological Pollution. *Russian Journal of Biological Invasions*, 9(3), pp. 253–262. <https://doi.org/10.1134/S2075111718030141>
17. Umerbaeva, R.I., Popova, N.V. and Sarkisyan, N.A., 2012. Description of Plankton of Shallow Part of North Caspian Sea. *The South of Russia: Ecology, Development*, 7(1), pp. 43–49. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2012-1-43-49> (in Russian).
18. Shiganova, T.A., Musaeva, E.I., Domanov, M.M., Bulgakova, Y.V., Zernova, V.V., Sapozhnikov, V.V., Belov, A.A., Zazulya, N.I., Kuleshov, A.F. [et al.], 2003. Factors Determining the Conditions of Distribution and Quantitative Characteristics of the Ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in the North Caspian. *Oceanology*, 43(3), pp. 676–693.

19. Shiganova, T.A., Dumont, H., Sokolsky, A.F., Kamakin, A.M., Tinenkova, D. and Kurasheva, E.K., 2004. Population Dynamics of *Mnemiopsis leidyi* in the Caspian Sea, and Effects on the Caspian Ecosystem. In: H. Dumont, T. Shiganova, U. Niermann (eds.), 2004. *Aquatic Invasions in the Black, Caspian, and Mediterranean Seas*. Dordrecht: Kluwer Academic Publication, 2004. P. 71–111. https://doi.org/10.1007/1-4020-2152-6_3
20. Solovyeva, N.V., 2018. Modeling of Changes in the Trophic Structure of the Ecological System of the Shelf during the Change of Dominant Species. *Ecological Systems and Devices*, (1), pp. 41–49 (in Russian).
21. Solovjeva, N.V., 2018. Modeling of Cumulative Influence of External Factors on the Condition of the Shelf Ecosystem and Assessment of the Allowed Probability of Anthropogenic Impact. *Ecological Systems and Devices*, (11), pp. 23–35 (in Russian).

About the author:

Natalya V. Solovjova, Leading Research Associate, Shirshov Institute of Oceanology, RAS (36 Nakhimov Avenue, Moscow, 117997, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-4268-7790**, soloceanic@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.