ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 503, № 1, с. 46–52

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.46.072:51

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ЭКОСИСТЕМ ШЕЛЬФА АРКТИКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЕГО РЕСУРСОВ

© 2022 г. Н. В. Соловьева[1,*], академик РАН Л. И. Лобковский[1,**]

Поступило 10.10.2021 г.
После доработки 24.11.2021 г.
Принято к публикации 25.11.2021 г.

Предложен метод оценок экологического риска для шельфа Арктики. Метод основан на вероятностной модели, которая позволяет совместить естественный режим функционирования экосистем шельфа с режимами воздействия стрессоров. Модель позволила рассчитать годовой ход экологического риска на фоне естественных вариаций компонент экосистемы при заданных вероятностях воздействий со стороны технологических процессов. Так же был рассчитан годовой ход допустимой вероятности воздействий. На основе полученных результатов сделан нетривиальный вывод об опасности снижения требований по экологической безопасности освоения ресурсов в экосистемах с низкой биологической продуктивностью.

Ключевые слова: моделирование, оценки экологического риска, вероятность допустимых воздействий, экосистемы шельфа, Арктика

DOI: 10.31857/S2686739722030124

ВВЕДЕНИЕ

Особое место среди морских экосистем занимает шельф Арктики как регион особенно важный не только как ресурсный, но и участвующий в формировании компонент современного климата [1]. Для оценки последствий интенсивного воздействия на морские экосистемы Арктики необходимы количественные методы оценки экологического риска. Цель настоящей работы – предложить современный количественный метод оценки экологического риска, основанный на вероятностной модели. Метод позволяет согласовать естественный годовой ход основных компонент шельфа с вариациями воздействия стрессоров при разработке минеральных ресурсов шельфа. Расчеты проведены для шельфовых экосистем Арктики различной продуктивности.

Условия функционирования экосистем арктических акваторий, их чувствительность и уязвимость к антропогенным воздействиям коренным образом различаются в разных регионах. Используя известные матричные методы [2, 3] или только экспертные оценки [3, 4], или систему предельно допустимых концентраций [5], весьма затруднительно выявить, при каких сочетаниях стрессоров и периодах воздействия риск будет выше. Существующие методы оценок риска [2–4] не дают ответа на подобные вопросы. Необходимы количественные оценки, учитывающие случайный характер воздействий в естественной динамике компонент экосистемы, что фактически реализовано в настоящей работе для арктических шельфовых экосистем различной биопродуктивности. В ряду существующих методов оценки экологического риска [2–4] предложенный подход имеет ряд существенных преимуществ, связанных с возможностью расчета внутригодовых вариаций риска при различных сочетаниях воздействующих факторов. С помощью вероятностной модели, основанной на предыдущих исследованиях [6–9], рассчитываются внутригодовые вариации экологического риска в зависимости от действия стрессоров в конкретные периоды естественного функционирования экосистем Арктического шельфа. Полученные результаты являются входными данными для расчета допустимой вероятности антропогенного воздействия, что позволяет оптимизировать мероприятия безопасного освоения ресурсов шельфа.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

Основные соотношения модели основаны на элементах теории вероятности [6, 7] и отражают зависимость экологического риска от времени [8, 9]. В соотношениях модели учитываются $2M$ внутри-

[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: soloceanic@yandex.ru*
***E-mail: llobkovsky@ocean.ru*

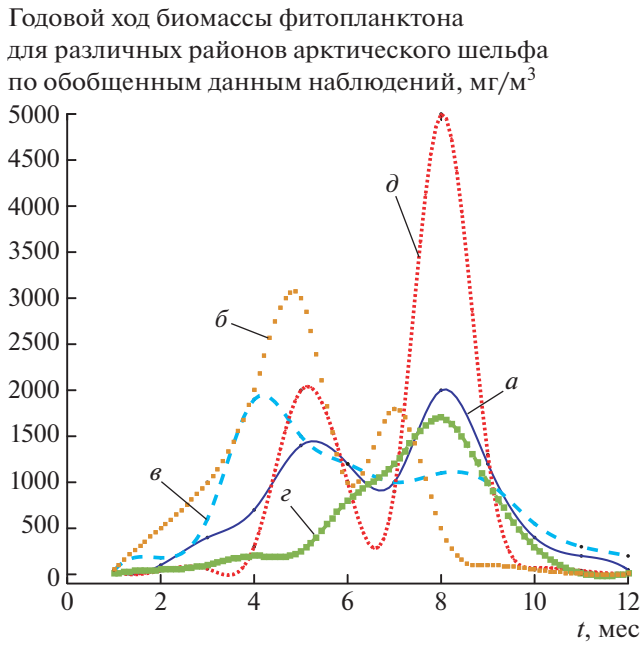

Рис. 1. Годовой ход биомассы фитопланктона по данным обобщенных наблюдений для *а* – замерзающих акваторий [12–14]; *б* – Баренцева, Белого и Чукотского морей [12, 15]; *в* – незамерзающих акваторий [16]; *г* – Карского, Лаптевых Восточно-Сибирского морей [12, 16–19]; *д* – прибрежной части Карского моря [16].

годовых состояния “вспышка–спад” для биомассы фитопланктона и K внутригодовых состояниях технической системы (технологического режима), связанного с техникой разработки ресурсов шельфа [6–9]:

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

$$y_a \le \begin{cases} \dfrac{1 - \overline{E\nu}/N_{\max}}{(1 - N_{\mathrm{cr}}/N_{\max})^2} \\ \exp\left(-\dfrac{(1 - N_{\mathrm{cr}}/N_{\max})^2}{2(1 - \overline{E\nu}/N_{\max})}\right), \end{cases} \quad (2)$$

где q_k – вероятность антропогенного воздействия (может осуществляться со стороны технической системы или технологического процесса освоения ресурсов шельфа) в течение года; p_{km} – вероятность m-го состояния биосистемы при k-м состоянии технической системы; y_k – риск биосистемы при k-м состоянии технической системы; y_{km} – риск биосистемы при k-м состоянии технической системы и m-м состоянии биосистемы; p_{am}, y_{am} и p'_{am}, y'_{am} – вероятности пребывания биосистемы в m-м внутригодовом состоянии вспышки и спада и ее риск в них соответственно; y_a – экологический риск в течение года:

$$\overline{y_a} = \sum_{m=1}^{M} (p_{am} y_{am} + p'_{am} y'_{am})_k; \\ \sum_{m=1}^{M} (p_{am} + p'_{am}) = 1, \quad \sum_{k=1}^{K} q_k = 1; \quad (3)$$

значения p_{am} и p'_{am} определяются относительной продолжительностью вспышек и спадов:

$$p_{am} = \frac{t_m}{t}; \quad p'_{am} = \frac{t'_m}{t}; \quad \sum_{m=1}^{M} (t_m + t'_m) = t; \quad (4)$$

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

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 $E_m\nu$ и $E'_m\nu$.

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

где $E_m\nu$ и $E'_m\nu$ – математическое ожидание численности популяции на вспышках и спадах соответственно. Эти значения взяты на основе данных натурных наблюдений (рис. 1). При недостатке данных или необходимости уточнения расчетов можно использовать численные эксперименты с экосистемной (динамической) математической моделью [10].

Используя соотношения для определения предельно допустимого воздействия на экосистему [6, 7], получим ее вероятность в следующем виде:

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

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}, $E_m\nu$ и $E'_m\nu$, полученные на основе данных натурных наблюдений.

Сходство в структуре и функциях шельфовых экосистем не является критерием равнозначности рисков для каждой из них. В рамках одного и того же континуума экосистемы изменяются в результате физически и биологически обуслов-

ленных процессов. При этом наблюдаемые отклики на воздействия носят существенно нелинейный характер. Это обстоятельство обусловливает наложение региональных особенностей (с использованием данных наблюдений) на универсальную модель экологического риска (соотношения 1–6).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Все входные данные для модели риска – значения $N_{\max}$, N_{cr}, p_{am}, p'_{am}, $E_m\nu$ и $E'_m\nu$ могут быть получены как на основе данных натурных наблюдений, так и при расчете по динамическим экосистемным моделям [9, 10]. Для того чтобы показать работоспособность метода, его возможности и открывающиеся перспективы, были выбраны характерные контрастные экосистемы с высокой и низкой продуктивностью. За период 1996–2018 гг. были проанализированы данные экспедиционных наблюдений за сезонными изменениями биомассы фитопланктона в Баренцевом, Белом, Чукотском, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском морях [11–19]. С учетом этих данных наблюдений был построен обобщенный годовой ход биомассы фитопланктона для различных районов Арктического шельфа (рис. 1) и выбраны два характерных варианта годового цикла: с двумя максимумами биомассы для продуктивных экосистем (рис. 1*б*) и с одним максимумом – для низкопродуктивных (рис. 1*г*). Для этих контрастных случаев годовых вариаций значений биомассы фитопланктона были проведены расчеты экологического риска и соответствующие им вероятности допустимого воздействия на экосистему по вероятностной модели.

Руководствуясь типологией морских и эстуарных опасностей, долгосрочных и краткосрочных, а также крупномасштабных и мелкомасштабных перспектив освоения минеральных ресурсов Арктического шельфа [2–4], мы учли следующие диапазоны значений вероятности воздействия со стороны стрессоров. Для всех расчетов вероятность воздействия на экосистему со стороны технических систем (или технологических процессов) выбиралась из диапазона q_k от 10^{-4} до 10^{-1} [2]. Были выбраны значения вероятности редкого события $q_1 = 10^{-3}$, события средней $q_2 = 10^{-2}$ и высокой частоты $q_3 = 10^{-1}$. Значения y_d в соотношениях (6) выбраны на основе данных обобщенных оценок техногенных воздействий и экологических последствий на этапах освоения нефтяных ресурсов шельфа [2, 3]. Интервал значений вероятности допустимого экологического риска при различных видах и этапах технологической деятельности составляет от 10^{-7} до 10^{-1} [2]. Допустимый риск y_d можно связывать, в частности, с качеством среды. Если возможно при определенных условиях увеличить значения допустимого риска, это может означать возможность снижения требований к качеству среды, а следовательно, возможность расширения диапазона воздействий Q. На основании этих данных для расчета Q выбраны три значения, соответствующие: повышенным требованиям к качеству экосистемы ($y_d = 10^{-5}$), средним ($y_d = 10^{-4}$) и ослабленным ($y_d = 10^{-3}$). Для аварийных событий при нефтяных разработках на шельфе можно выделить три типа воздействий: 1) кратковременные выбросы загрязняющих веществ в больших объемах (острый стресс для экосистемы); 2) регулярные, штатные выбросы небольших объемов, осуществляемые в течение длительного времени (хронический стресс) и 3) наложение на регулярные выбросы кратковременных воздействий высокой интенсивности. Используя приведенные выше условия в соотношениях (1–6), были рассчитаны экологический риск y_a и допустимая вероятность воздействия Q на экосистему для следующих сценариев.

Сценарий 1. Расчеты проведены для продуктивной экосистемы с двумя максимумами, значения $E_m\nu$ взяты из данных натурных наблюдений (рис. 1б). Для биомассы фитопланктона задавались значения $N_{\max} = 3 \times 10^3$ мг/м^3, $N_{\text{cr}} = 0.5$ мг/м^3, $p_{am} = t_m/t = 1/12$. Расчеты внутригодовых вариаций экологического риска и допустимого воздействия были проведены при значениях $q_1 = 10^{-3}$, $q_2 = 10^{-2}$, $q_3 = 10^{-1}$ и $y_d = 10^{-5}$. Результаты (рис. 2) показали снижение экологического риска при высоких значениях биомассы планктона и высокие значения риска при минимальных значениях биомассы (рис. 2а). Соответствующие расчеты для вероятности допустимых воздействий выявили интервалы безопасного воздействия и интервалы с низкими значениями допустимых воздействий (рис. 2б, 2в). Анализ полученных результатов показывает, что только при редких воздействиях на экосистему $q_1 = 10^{-3}$ достигается относительно безопасное состояние экосистемы и соответственно высокие значения допустимых воздействий Q от 70 до 85% (рис. 2в). Вероятность такого воздействия при соответствующем риске возможна только в течение короткого промежутка времени, на пике биомассы фитопланктона (рис. 1*б*, 2в). Этот участок выделен на рис. 2в и отражает рассчитанную зависимость вероятности допустимого воздействия от экологического риска. В течение почти всей остальной части года допустимая вероятность воздействия крайне низкая, менее 30% (рис. 2). Это обусловливается низкими значениями допустимого экологического риска $y_d = 10^{-5}$, что в терминах качества среды соответствует высоким требованиям к качеству экосистемы.

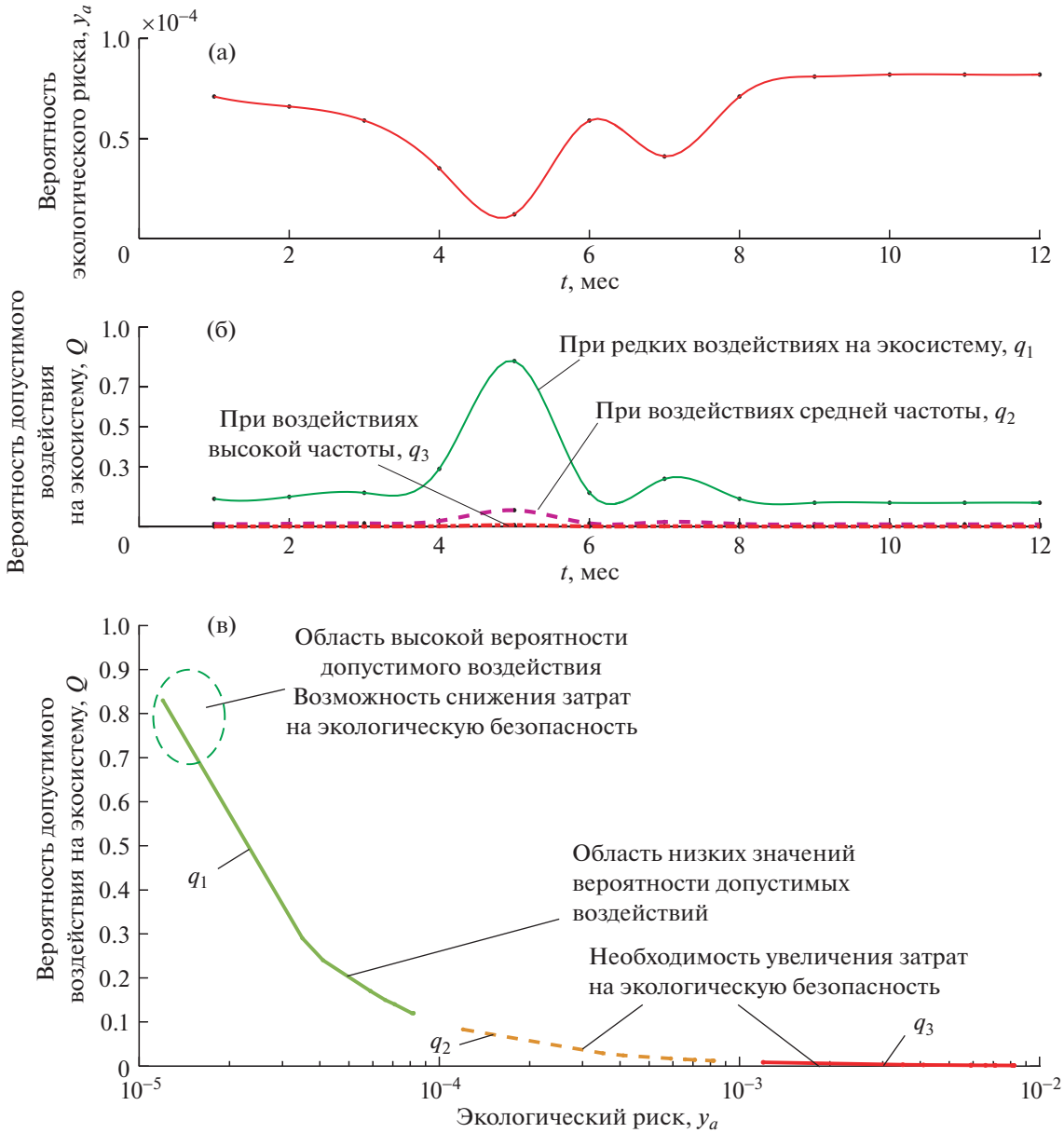

Рис. 2. Рассчитанные значения годового хода: (а) экологического риска, (б) вероятности допустимых воздействий на экосистему и (в) зависимость Q от y_a при редкой q_1, средней q_2 и высокой q_3 вероятности осуществления воздействий при повышенных требованиях к качеству среды $y_d = 10^{-5}$.

Сценарий 2 предусматривает возможность снижения требований к качеству экосистемы, т.е. задается увеличенное значение допустимого риска до $y_d = 10^{-4}$. Расчет проведен для низкопродуктивной экосистемы с одним максимумом биомассы фитопланктона (рис. 1*г*). При этом задавались значения $N_{\max} = 1.7 \times 10^3$ мг/м^3, $N_{\text{cr}} = 0.5$ мг/м^3, $p_{am} = t_m/t = 1/12$, значения $E_m\nu$ взяты из данных натурных наблюдений (рис. 1 г). На рис. 3 представлены результаты расчета внутригодовых вариаций экологического риска (рис. 3а) и допустимого воздействия (рис. 3б) при значениях $q_1 = 10^{-3}$, $q_2 = 10^{-2}$, $q_3 = 10^{-1}$. Вместе с внутригодовыми вариациями экологического риска y_a и допустимого воздействия Q были рассчитаны зависимости Q как функции y_a (рис. 3б). Результат выявил области с допустимой вероятностью воздействий выше 80% и области со значениями $Q < 20\%$. Анализ полученных результатов показывает, что для низкопродуктивной экосистемы шельфа снижение требований к качеству среды расширяет область безопасного воздействия Q, достигающего 100% на коротком интервале внутригодовых вариаций (рис. 3б).

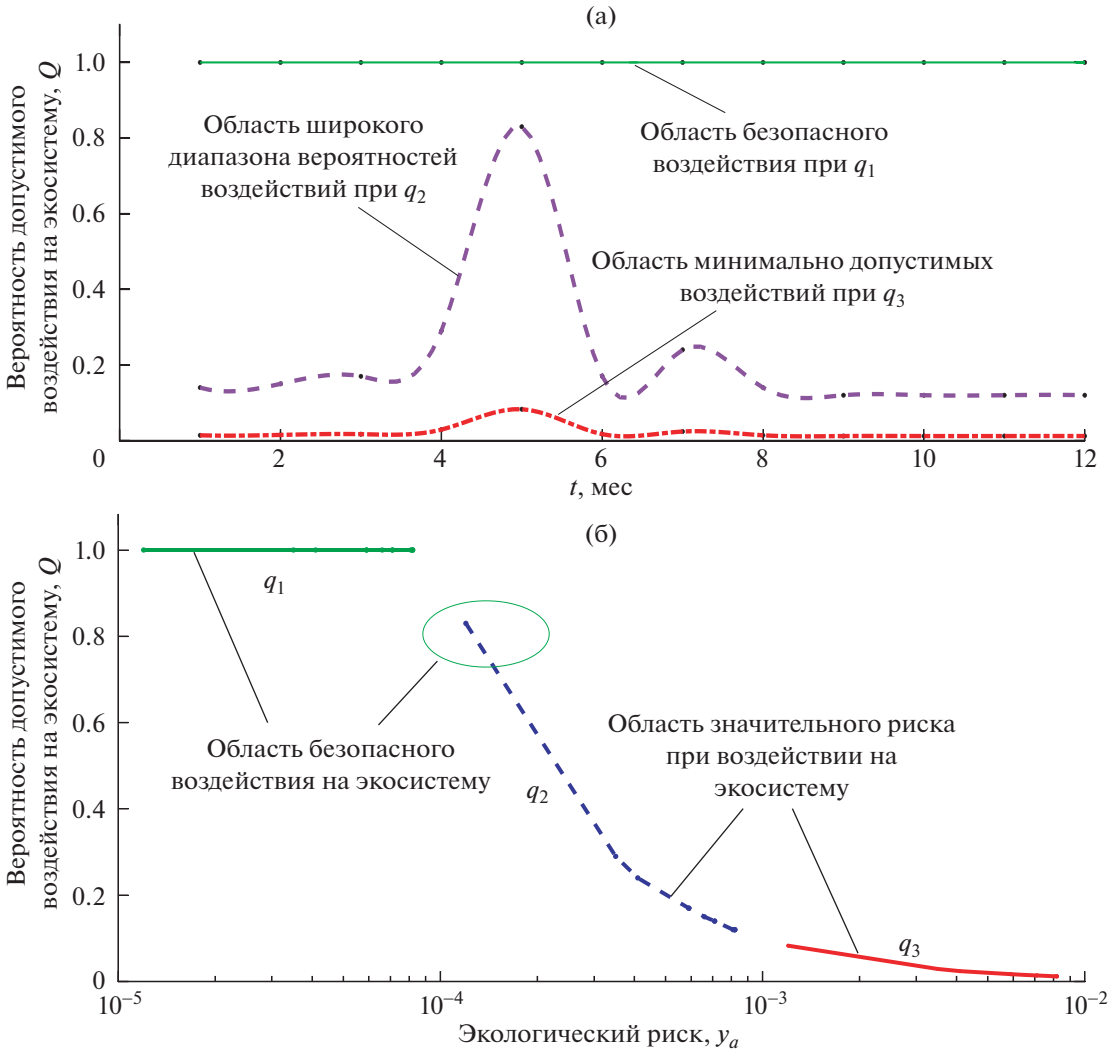

Рис. 3. Рассчитанные значения: (а) годового хода вероятности допустимых воздействий на экосистему и (б) зависимость Q от y_a при редкой q_1, средней q_2 и высокой q_3 вероятности осуществления воздействий при сниженных требованиях к качеству среды $y_d = 10^{-4}$.

Сравнительный анализ результатов проведенных расчетов по двум сценариям показывает меньший риск от воздействий на низкопродуктивные экосистемы, чем на высокопродуктивные. Заметим ключевой момент: рассчитанная область расширения допустимых воздействий в сценарии 2 связана не с меньшей уязвимостью низкопродуктивных экосистем, а со снижением требований к качеству среды. Количественные оценки в результате модельных расчетов, приведенных выше, выявили более сложный отклик на внешние воздействия для шельфовых арктических экосистем различной продуктивности, чем те, которые могут быть получены матричными методами или экспертным анализом. Такие оценки позволяют оконтурить особо опасные области в пространстве значений риска, а также дать обоснование для перераспределения средств для обеспечения экологической безопасности в течение года.

ВЫВОДЫ

Преимуществом предложенного метода является возможность оценить допустимую степень воздействия на морскую систему с сохранением устойчивости ее функционирования, трофической структуры и компонентного состава. В реальных условиях действие стрессоров накладывается на динамику естественного функционирования экосистемы шельфа. И предложенный метод, в отличие от существующих, позволяет оценить экологический риск от совокупности стрессоров и сочетать эти воздействия с динамикой естественного функционирования экологических систем. Внутригодовые колебания основных ком-

понентов Арктического шельфа при действии стрессоров вызывают колебания степени опасности, а следовательно, и годовые колебания экологического риска. Предложенный метод позволяет получить количественную оценку экологического риска, ее вариаций в течение года, а также оценить вероятности антропогенного воздействия, допустимые для каждой конкретной арктической экосистемы шельфа в конкретный период времени с учетом рисков, заложенных в технологические проекты освоения ресурсов. На примере контрастных по продуктивности экосистем шельфа Арктики проведенные модельные расчеты по двум сценариям показали эффективность предложенной модели.

Нетривиальность выводов, полученных на основе модельных расчетов, связана с нелинейным характером отклика экосистемы на воздействие стрессоров в Арктике. Практические выводы касаются допустимости воздействий на экосистемы различной биопродуктивности. Расчеты показали, что нет оснований снижать требования по экологической безопасности и подвергать более интенсивному воздействию стрессоров низкопродуктивные экосистемы Арктического шельфа. Предположение о том, что последствия антропогенного воздействия на низкопродуктивные экосистемы будут менее негативны по сравнению с воздействиями на высокопродуктивные, не подтверждается. Другими словами, не следует снижать надежностные требования к техническим системам, обеспечивающим безопасность освоения ресурсов Арктического шельфа в случае перехода от высокопродуктивных к низкопродуктивным экосистемам.

К затруднениям, связанным с реализацией предложенного метода, можно отнести необходимость иметь большой объем данных наблюдений. Грубость оценок риска зависит от объема привлеченной информации об исследуемой шельфовой экосистеме.

Отметим, что предложенный подход следует рассматривать в рамках вероятности допустимого риска, когда полное устранение риска либо практически невозможно, либо экономически неоправданно. В процессе реализации крупномасштабных проектов освоения морских ресурсов Арктического шельфа (например, разработка нефтяных и газовых месторождений) ошибки в оценке рисков могут привести к серьезным экологическим и экономическим потерям, которые можно минимизировать, используя предложенный метод.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников ИО РАН: академика РАН М.В. Флинта за организацию экспедиционных исследований арктических экосистем и доктора биологических наук В.А. Силкина за обсуждения вопросов моделирования процессов в экосистемах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по государственному заданию, тема № 00128-2021-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лобковский Л.И.* Сейсмогенно-триггерная гипотеза усиления эмиссии метана и изменения климата в Арктике // Земля и Вселенная. 2020. № 6. С. 27–36.
2. *Патин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа: в 2-х т. 2-е изд. т. 1: Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. М.: Изд-во ВНИРО. 2017. 326 с.
3. *Elliott M.* Marine Science and Management Means Tackling Exogenic Unmanaged Pressures and Endogenic Managed Pressures – A Numbered Guide // Marine Pollution Bulletin. 2011. 62 (4). P. 651–655. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.11.033
4. *Chen S.Q., 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. V. 250. P. 25–33.
5. *Данилов-Данильян В.И., Розенталь О.М.* Методология экологического нормирования природных вод // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 223–228.
6. *Флейшман Б.С.* Основы системологии. М.: Изд-во: Радио и связь. 1982. 368 с.
7. *Fleishman B.S.* Stochastic Theory of Ecological Interactions // Ecological Modelling. 1982. V. 17. № 2. P. 65–73.
8. *Solovjova N.V.* Ecological Risk Modelling in Developing Resources of Ecosystems Characterized by Varying Vulnerability Levels // Ecological Modelling. 2019. V. 406. P. 60–72.
9. *Solovjova N.V.* Risk Assessment Simulation for Shelf Ecosystems Based on the Ecoscreening and Dynamic Methods Synthesis // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2020. V. 243. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106881
10. *Беляев В.И.*, *Кондуфорова Н.В.* Математическое моделирование экологических систем шельфа. Киев: Наук. Думка. 1990. 240 с.
11. *Silkin V., Pautova L., Giordano M., Artemiev V.* Interannual Variability of Emiliania Huxleyi Blooms in the Barents Sea: In Situ Data 2014–2018 // Marine Pollution Bulletin. 2020. V. 158. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111392
12. *Флинт М.В.* Биоресурсы Арктических морей России: изменения под воздействием климата и факторов антропогенной природы, экосистемные ос-

новы охраны. В кн.: Научно-технические проблемы освоения Арктики / Российская академия наук. М.: Наука. 2015. С. 55–71.

13. *Flint M.V., Poyarkov S.G., Rymsky-Korsakov N.A.* Ecosystems of the Siberian Arctic Seas-2017 (Cruise 69 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh) // Oceanology. 2018. V. 5. P. 315–318. https://doi.org/10.1134/S0001437018020042
14. *Дружкова Е.И., Макаревич П.Р.* Годовой цикл нанофитопланктона прибрежных вод Баренцева моря // Известия РАН. Серия Биологическая. 2008. № 4. С. 497–506.
15. *Ильяш Л.В., Ратькова Т.Н., Радченко И.Г., Житина Л.С.* Фитопланктон Белого моря // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир. 2012. С. 605–639.
16. *Макаревич П.Р., Ларионов В.В.* Годовой цикл развития планктонного фитоценоза Обь-Енисейского мелководья Карского моря // Океанология. 2011. Т. 37. № 1. С. 3–8.
17. *Demidov A.B., Mosharov S.A., Makkaveev P.N.* Patterns of the Kara Sea Primary Production in Autumn: Biotic and Abiotic Forcing of Subsurface Layer // J. Mar. Sys. 2014. V. 132. P. 130–149.
18. *Суханова И.Н., Флинт М.В., Дружкова Е.И. и др.* Фитопланктон северо-западной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 605–619.
19. *Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., et al.* Modelling Kara Sea Phytoplankton Primary Production: Development and Skill Assessment of Regional Algorithms // J. Sea Res. 2017. V. 125. P. 1–17.

MODEL ASSESSMENTS OF ENVIRONMENTAL RISK FOR ARCTIC SHELF ECOSYSTEMS IN THE DEVELOPMENT OF ITS RESOURCES

N. V. Solovjova[a,#] and Academician of the RAS L. I. Lobkovsky[a,#]

[a]*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: soloceanic@yandex.ru*

[##]*E-mail: llobkovsky@ocean.ru*

The article proposes a method for assessing environmental risk for the Arctic shelf. The method is based on a probabilistic model that allows you to combine the natural mode of functioning of shelf ecosystems with the modes of exposure to stressors. The model made it possible to calculate the annual course of environmental risk against the background of natural variations of ecosystem components with given probabilities of impacts from technological processes. The annual course of the permissible probability of impacts was also calculated. Based on the results obtained, a non-trivial conclusion is made about the danger of reducing the requirements for environmental safety of resource development in ecosystems with low biological productivity.

Keywords: modeling, environmental risk assessments, probability of acceptable impacts, shelf ecosystems, Arctic