

Научная статья  
УДК 551.46.072:51  
EDN JKDPNP

## Влияние внутригодовой динамики компонентов экосистемы на экологический риск: модельные оценки

Н. В. Соловьева

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

### Аннотация

Предложена модель оценки экологического риска с учетом внутригодовой динамики основных компонентов экосистемы. На основе модельных расчетов даны оценки экологического риска при вариациях внутригодового состояния низкопродуктивных экосистем арктического шельфа и действии техногенных стрессоров. Проведенные расчеты позволили получить модельные оценки внутригодовой динамики экологического риска и допустимого воздействия на экосистемы со стороны стрессоров в условиях освоения ресурсов арктического шельфа. Полученные предварительные результаты расчетов позволили выделить области повышенного риска и учесть различную степень требований к исключению ошибок 1-го и 2-го рода, обусловленных спецификой задач экологической безопасности. Важным практическим результатом разработки методики оценок риска является выявление временных интервалов воздействия, при которых опасная ситуация скрыта внешним благополучием (ошибка 2-го рода). Проведенные модельные исследования открывают возможность перераспределять экономические затраты на безопасность в течение года так, чтобы снизить риски в опасные периоды разработки морских ресурсов и исключить перерасход средств в относительно безопасное время. Другими словами, можно снизить эколого-экономические противоречия в управлении риском.

**Ключевые слова:** модель экологического риска, вероятность допустимых воздействий, арктический шельф, экосистема, математическое моделирование, биомасса фитопланктона, антропогенное воздействие

**Благодарности:** работа подготовлена в рамках государственного задания № 0128-2021-0004. Автор выражает благодарность руководителям лабораторий Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, в частности доктору биологических наук В. А. Силкину, за обсуждение направлений моделирования экологического риска, академику Российской академии наук М. В. Флинту за организацию экспедиционных работ в морях Арктики и доктору географических наук Е. Е. Совге (МГИ РАН) за помощь и поддержку работы при представлении в журнал «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря».

© Соловьева Н. В., 2023



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

**Для цитирования:** Соловьёва Н. В. Влияние внутригодовой динамики компонентов экосистемы на экологический риск: модельные оценки // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 86–97. EDN JKDPNP.

## **Effect of Intra-Annual Dynamics of Ecosystem Components on Ecological Risk: Model Assessments**

**N. V. Solovjova**

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
e-mail: soloceanic@yandex.ru*

### **Abstract**

The article proposes a model for assessing ecological risk taking into account the intra-annual dynamics of the main components of the ecosystem. Based on model calculations, ecological risk assessments are given for variations in the intra-annual state of low-productive ecosystems of the Arctic shelf and the effect of technogenic stressors. The proposed approach combines ecological risk models and observational data. The calculations made it possible to obtain model estimates of the intra-annual dynamics of ecological risk and permissible impacts on ecosystems from stressors in the conditions of development of Arctic shelf resources. The obtained preliminary results of calculations allowed us to identify areas of increased risk and take into account the different degree of requirements for the exclusion of type 1 and 2 errors, due to the specifics of ecological safety tasks. An important practical result of the development of the risk assessment methodology is the identification of time intervals of impacts at which a dangerous situation is hidden by external well-being (type 2 error). The conducted modelling studies allow reallocating safety expenditures throughout the year so as to reduce risks during hazardous periods of offshore resource development and exclude cost overruns during relatively safe times. In other words, it is possible to resolve environmental and economic contradictions in risk management.

**Keywords:** ecological risk model, probability of acceptable impacts, Arctic shelf, ecosystem, mathematical modelling, phytoplankton biomass, anthropogenic impact

**Acknowledgements:** This work was prepared under state assignment no. 0128-2021-0004. The author expresses gratitude to the heads of the laboratories of P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, in particular to V. A. Silkin, Dr. Sci. (Biol.), for discussing the directions of modeling environmental risk, M. V. Flint, Academician of the Russian Academy of Sciences, for organizing expedition work in the Arctic seas, and E. E. Sovga, Dr. Sci. (Geogr.) (MHI RAS), for assistance and support with submission of the work to *Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea* journal.

**For citation:** Solovjova, N.V., 2023. Effect of Intra-Annual Dynamics of Ecosystem Components on Ecological Risk: Model Assessments. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 86–97.

### **Введение**

Актуальность оценок экологического риска как интегральных характеристик состояния морских экосистем определяется не только широким диапазоном и скоростью изменения параметров, но и наличием процессов различного генезиса в океанологически контрастных акваториях.

Интенсивное освоение морских ресурсов обуславливает наложение техногенных стрессоров на естественные процессы различного происхождения: гидрофизические, гидрохимические, гидробиологические, геологические. При этом возникает необходимость в интегральной количественной оценке состояния морских экосистем в этих условиях. Получить достоверную оценку рисков, оставаясь в рамках отдельной дисциплины, не представляется возможным. Само понятие экологического риска, являясь интегральной характеристикой состояния экосистемы, требует междисциплинарных подходов. При этом могут возникать противоречия в сопряжении требований каждой из дисциплин в отдельности. Так, на практике освоения ресурсов шельфа экономические и экологические требования имеют различную направленность.

При принятии хозяйственных решений, как правило, ориентируются на экономические показатели, что отразилось на основной принятой форме оценок экологического риска, которая сводится к оценке произведения *вероятность события* × *ущерб*. В этом случае приоритет отдается экономической составляющей [1] и ведет к уменьшению важности оценки экологической составляющей в проектах освоения ресурсов шельфа.

Для шельфа Арктики задача расчета динамики экологического риска особенно актуальна в связи с нарастающими климатическими изменениями и перспективой разработки минеральных и биологических ресурсов региона. В этом смысле понимание динамики морских экосистем в контексте глобальных изменений [2] позволяет рассчитывать риски [1–7]. Существующие подходы к оценкам экологического риска могут учитывать сочетание стрессоров различной природы и многообразие реакций морских экосистем на внешнее воздействие [4]. Для морских экосистем Арктики известны методы оценки риска *ERA* [4] в сочетании с динамической объектно-ориентированной байесовской сетью *DOOBN* [8] и *DBN* [9]. Для оценок риска от разливов нефти в Арктике были разработаны модели с учетом токсичности биотрансформации [10].

Анализ существующего положения с оценками риска показывает, что для повышения эффективности и востребованности методов наиболее предпочтительным способом является комбинирование различных подходов. Оценка экологического риска с использованием системных моделей на различных уровнях организации экосистем является эволюционным шагом в поддержании экологической безопасности. При этом недостаточно учитывать кумулятивный эффект стрессоров только в статичных условиях. Необходимо сочетать динамику стрессоров с динамикой функционирования экосистемы. Для того чтобы продвинуться в этом направлении, в настоящей статье предлагается подход, основанный на синтезе вероятностных моделей риска и данных натурных наблюдений.

Цель проведенных исследований – получить модельные оценки влияния внутригодовой динамики компонентов экосистемы (в частности, фитопланктона) на динамику экологического риска в условиях действия техногенных стрессоров. Для моделирования были использованы данные наблюдений за биомассой фитопланктона в низкопродуктивных экосистемах арктического шельфа.

## Материалы и методы

Для модельных исследований внутригодовых вариаций риска в низкопродуктивных экосистемах шельфа Арктики были использованы данные наблюдений за сезонными вариациями биомассы фитопланктона в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и основной акватории Чукотского моря [11–21]. Низкая продуктивность экосистем в этих акваториях обусловлена сильной плотностной стратификацией из-за интенсивного распределения поверхностного 5–12-метрового слоя воды за счет речного стока в краевые арктические моря [12, 13]. Сезонная конвекция на шельфе Арктики большей частью не преодолевает устойчивость плотностной стратификации [21], и процесс обогащения фотического слоя биогенными элементами не происходит [12, 13]. Этот естественный барьер не ослабляют современные климатические изменения – увеличение безледного периода и прогрев поверхностного слоя воды [13, 21]. Такие особенности определяют низкий уровень продуктивности и влияют на экологический риск при действии стрессоров в условиях разработки ресурсов шельфа.

Под экологическим риском будем понимать вероятность гибели биосистемы (в частности, популяции) в условиях антропогенного воздействия в течение фиксированного времени действия стрессоров. Воздействие стрессоров техногенного характера, их множественных сочетаний отражается на естественной внутригодовой динамике экосистем с периодами всплеск и спадов биомасс компонент экосистемы.

Критерий экологической безопасности на основе риска имеет вид [22]  $K = \{y \leq y_p\}$ , где  $y$  – экологический риск;  $y_p$  – допустимый риск.

При  $y \leq y_p$  принимается решение об экологической безопасности, при  $y > y_p$  – об экологической опасности [22]. Точное значение экологического риска  $y$  не может быть получено в принципе. Возможно получить только верхнюю  $\bar{y}$  и нижнюю  $\underline{y}$  оценки риска ( $\underline{y} \leq y \leq \bar{y}$ ). Величина допустимого экологического риска лежит в интервале между более высокой  $\bar{y}$  и более низкой  $\underline{y}$  оценками. Для критерия экологической безопасности будем пользоваться верхними оценками  $\bar{K} = \{\bar{y} \leq y_p\}$ .

Будем учитывать  $L$  стрессоров ( $i = \overline{1, L}$ ), оказывающих негативное воздействие на экосистему, функционирующую в естественных условиях. Допустим, что стрессоры могут принимать  $k$  состояний ( $k = \overline{1, K}$ ). К таким состояниям относятся, например, штатный режим работы и аварийные события в функционировании технических средств, влияющих на экосистему. В соответствии с неравенствами Буля  $\max_i y_i = y_l \leq y \leq y_h = \sum_{i=1}^L y_i$ , где  $y_i$  – риск от  $i$ -го стрессора [23, 24]. Компоненты экосистемы (биомассы популяций организмов) могут испытывать подъемы и спады в течение года:  $M$  – количество периодов подъем – спад в течение года ( $m = \overline{1, M}$ ). Данные наблюдений дают максимальные значения биомассы популяции на подъемах  $N_{\max}$  и спадах  $N_{\text{ст}}$ . Будем учитывать наложение воздействий техногенных стрессоров на естественную динамику экосистемы, например моделируя воздействие технической системы освоения ресурсов, находящейся в  $k$ -м состоянии,

на агрегированную компоненту экосистемы (фитопланктон) при сезонных вариациях ее биомассы.

В общем случае для внутригодичного риска в зависимости от времени имеем соотношения [5–7, 23, 24]

$$y_k(t) \leq \sum_{k=1}^K q_k \sum_{m=1}^M p_{km} y_{km} = \sum_{k=1}^K q_k \sum_{m=1}^M (p_{am} y_{am} + p'_{am} y'_{am})_k = \sum_{k=1}^K q_k y_a(t), \quad (1)$$

$$y_a(t) \leq \frac{1 - \overline{Ev}(t)/N_{\max}}{(1 - N_{cr}/N_{\max})^2},$$

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

$$\sum_{m=1}^M (p_{am} + p'_{am}) = 1, \quad \sum_{k=1}^K q_k = 1,$$

где  $y_i$  – риск от отдельного  $i$ -го воздействия со стороны стрессоров (технического объекта);  $q_k$  – вероятность  $k$ -го состояния технического объекта;  $p_{mk}$  – условная вероятность  $m$ -го состояния экосистемы при  $k$ -м состоянии технической системы;  $y_{imk}$  – условный риск от отдельного  $i$ -го фактора воздействия при  $k$ -м состоянии технического объекта и  $m$ -м состоянии экосистемы;  $\overline{Ev}(t)$  – математическое ожидание значения биомассы популяции;  $y_k(t)$  – внутригодичный риск биосистемы при  $k$ -м состоянии технического объекта;  $p_{am}$  – вероятность пребывания биосистемы в  $m$ -м внутригодичном состоянии подъема биомассы;  $y_{am}$  – риск при подъеме биомассы;  $y'_{am}$  – риск при спаде биомассы;  $y_a$  – экологический риск в течение года;  $y_{km}$  – вероятность риска биосистемы при  $k$ -м состоянии технического объекта и  $m$ -м состоянии биосистемы;  $t_m$  – продолжительность подъема биомассы;  $t'_m$  – продолжительность спада биомассы. Формула (1) использована для нормального распределения случайной величины.

Модель внутригодичных вариаций риска (1) позволяет перейти к оценкам динамики допустимой вероятности воздействия со стороны стрессоров на экосистему. Такая иерархия действий отражает приоритет экологической составляющей при освоении ресурсов морских акваторий [21]. Для случая зависимости допустимой вероятности воздействия от времени  $Q(t)$  уравнения экоскрининга [23, 24] были расширены до вида [7]

$$Q(t) = \begin{cases} 1 & \text{для } y_k(t) \leq y_d, \\ \frac{y_d}{y_k(t)} & \text{для } y_d < y_k(t) < 1, \\ y_d & \text{для } y_k(t) = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $Q(t)$  – предельно допустимая вероятность антропогенного воздействия на экосистему;  $y_k(t)$  определяется уравнениями (1);  $y_d$  – предельно допустимый риск для экосистемы при различных требованиях к сохранению качества среды.

Вероятность состояния технических систем (авария, штатный режим эксплуатации, степень и режимы воздействия), учитываемая в проекте технической эксплуатации, также является входными данными для модели риска.

Для расчетов были использованы ориентировочные допустимые риски воздействия стрессоров на морские экосистемы (таблица).

Согласно данным [25], интервал значений вероятности допустимого экологического риска при различных видах и этапах технологической деятельности на шельфе составляет от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$ . Для расчета  $Q(t)$  выбраны значения  $y_d$ , соответствующие повышенным ( $y_d = 10^{-5}$ ), средним ( $y_d = 10^{-4}$ ) и незначительным ( $y_d = 10^{-3}$ ) требованиям к качеству экосистемы. Вероятность  $q_k$  пребывания технической системы в  $k$ -м состоянии (полагаем  $k = 3$ ) выбиралась из диапазона от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  (таблица). Были выбраны значения вероятности низкой частоты события  $q_1 = 10^{-3}$ , средней  $q_2 = 10^{-2}$  и высокой  $q_3 = 10^{-1}$  (таблица).

Предложенный метод учитывает агрегированные компоненты экосистемы. Работоспособность метода подтверждается результатами расчета риска для агрегированной компоненты начального звена трофической цепи – фитопланктона.

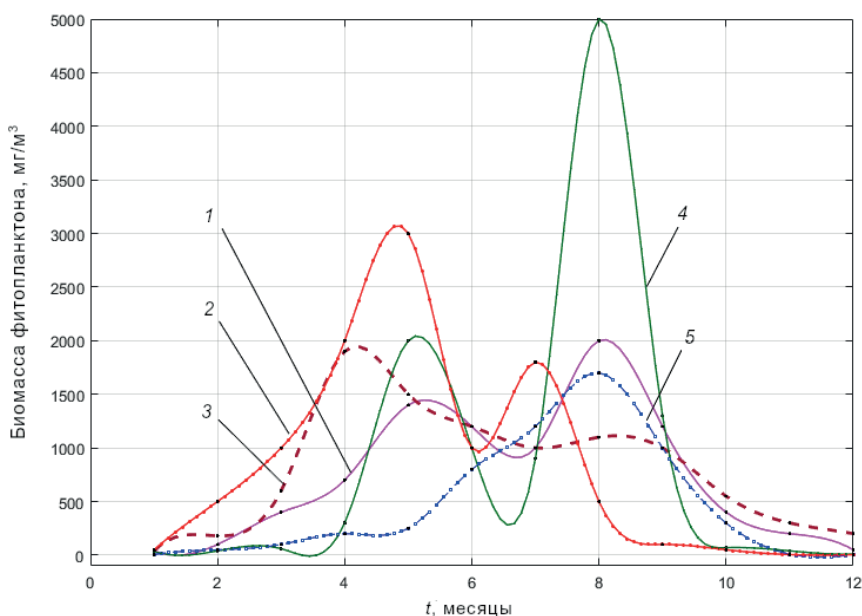
Допустимые риски воздействий стрессоров на морские экосистемы на основных этапах освоения нефтегазовых ресурсов [25]

Acceptable risks of stressors on marine ecosystems at the main stages of oil and gas resources development [25]

Вид антропогенного воздействия на экосистемы / Type of anthropogenic impact on ecosystems	Масштаб воздействия / Impact scale		Ориентировочный допустимый риск / Estimated permissible risk
	пространственный / Spatial	временной / Temporal	
Сейсмическая разведка / Seismic exploration	Местный / Local	Временный / Temporary	$10^{-1}$
Бурение разведочных скважин / Exploratory well drilling	Локальный / Topical	Кратковременный / Short-term	$10^{-7}$
Промысловые работы с одиночных платформ / Field operations from single platforms	Местный / Local	Временный / Temporary	$10^{-5}$
Промысловые региональные работы / Regional field work	Региональный / Regional	Долговременный / Long-term	$10^{-2}$
Строительство платформ, трубопроводов и др. / Construction of platforms, pipelines, etc.	Локальный / Topical	Временный / Temporary	$10^{-5}-10^{-7}$
Эксплуатация трубопроводов в безаварийном режиме / Operation of pipelines in accident-free mode	Региональный / Regional	Долговременный / Long-term	$10^{-5}$
Танкерные перевозки в безаварийном режиме / Tanker shipping in accident-free mode	Субрегиональный / Sub-regional	Временный / Temporary	$10^{-7}$

Обобщение метода на случай всех основных компонентов экосистемы выявит наиболее уязвимое звено трофической цепи, которое и будет определять риск для всей экосистемы. Обобщенные на случай  $J$  популяций соотношения (1)–(2) модели позволяют определять допустимые значения вероятности воздействия стрессоров по отношению к  $j$ -й популяции экосистемы. Если существование всех  $J$  популяций нам одинаково важно, тогда к надежности технических систем, воздействующих на экосистему, необходимо предъявлять требование допустимой годовой вероятности аварии  $Q(t)$ , удовлетворяющей условию  $Q(t) = \min_j Q(t)_j$  [22, 23].

Данные наблюдений биомассы фитопланктона используются в качестве входных для модели риска. Обобщая данные наблюдений за сезонным ходом биомассы фитопланктона в морях Карском, Белом, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском [11–20], мы выбрали значения  $N_{\max}$ ,  $N_{cr}$ ,  $p_{am}$ ,  $p'_{am}$ ,  $\overline{Ev}(t)$  в качестве входных параметров модели риска. Для получения входных данных модели риска могут быть использованы также результаты экосистемного моделирования [26, 27]. Но при слабой изученности сезонной динамики биомасс основных компонент экосистем шельфа Арктики, особенно в связи



Р и с . 1 . Годовой ход биомассы фитопланктона по обобщенным данным наблюдений замерзающих акваторий (1) [28]; Баренцева, Белого и Чукотского морей (2) [29]; незамерзающих акваторий (3) [30]; прибрежной части Карского моря (4) [30]; Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского морей (5) [11–20]

F i g . 1 . The annual course of phytoplankton biomass according to generalized observations of freezing waters (1) [28]; the Barents, White and Chukchi Seas (2) [29]; non-freezing waters (3) [30]; the coastal part of the Kara Sea (4) [30]; the Kara, Laptev, East Siberian Seas (5) [11–20]

с новыми климатическими изменениями, экосистемное моделирование пока затруднено. Динамика биомассы фитопланктона в высокопродуктивных экосистемах с двумя максимумами (Баренцево, Берингово, Чукотское (каньон Барроу) [12, 13], Белое моря, эстуарные и склоновые фронтальные зоны) и низкопродуктивных (основная акватория морей Карского и Чукотского, Лаптевых, Восточно-Сибирского [11–20]) сильно различаются (рис. 1). Отсутствие весеннего цветения фитопланктона в значительной части низкопродуктивных районов (Карское море), установленное в экспедиционных наблюдениях [11–20], обусловлено устойчивой плотностной стратификацией. На основе приведенных выше экспедиционных наблюдений выбраны следующие значения для низкопродуктивной экосистемы:  $N_{\max} = 1.7 \cdot 10^3$  мг/м<sup>3</sup>,  $N_{cr} = 10$  мг/м<sup>3</sup>,  $p_{am} = t_m/t = 1/6$  и  $\bar{E}v(t)$  (кривая 5 на рис. 1) в качестве входных значений в модель риска (1).

### Результаты расчетов

Расчет по модели (1)–(2) показал, что внутригодовые вариации экологического риска  $y_k$  (рис. 2, *a*) лежат в пределах значений от 0 до 0.8. Рассчитанные значения допустимой вероятности воздействия  $Q(t)$  от 0 до 0.2 соответствуют указанным вероятностям воздействия стрессоров (рис. 2, *b*). Это характерно в течение почти всего года за исключением пика биомассы фитопланктона (рис. 2). Только на пике биомассы фитопланктона для низкопродуктивной экосистемы (рис. 2, *b*) можно допустить вероятность воздействия от 80 до 100 %.

Проведенные расчеты подтверждают начальное предположение о влиянии внутригодовой динамики компонентов экосистемы на внутригодовую динамику риска. Подтверждение такого влияния влечет за собой корректировку статичных матричных методов оценок риска.

Полученные результаты позволили рассчитать зависимость допустимой вероятности воздействия на экосистему от экологического риска  $Q(y_k)$  при значениях  $q_k = 10^{-5} - 10^{-1}$  и  $y_d = 10^{-5} - 10^{-3}$  (рис. 3). Расчет выявил области повышенной опасности и относительной безопасности (рис. 3) при различных сочетаниях воздействий и требуемого качества среды.

Весомым практическим достижением проведенных исследований можно считать открывающуюся возможность выявлять ошибки 1-го и 2-го рода. Особенность экологических задач при наличии ошибок 1-го и 2-го рода связана с различной тяжестью последствий в случае их сохранения. Понятия ошибок взяты из статистической теории и ошибка 1-го рода означает принятие безопасной ситуации за опасную, а ошибка 2-го рода соответствует тому, что опасная ситуация скрыта внешним благополучием [21–23]. В случае ошибки 1-го рода излишняя перестраховка, связанная с ложной тревогой, не так опасна, хотя влечет за собой необоснованные затраты, как ошибка 2-го рода. Модельные расчеты (рис. 3) выявили такие области. Перебор всех возможных на практике сочетаний воздействий и требований к качеству среды позволит определить области указанных ошибок. В свою очередь это позволит перераспределять затраты на экологическую безопасность в течение года с целью минимизировать расходы. Другими словами, достигается согласование экологических и экономических требований к безопасному освоению



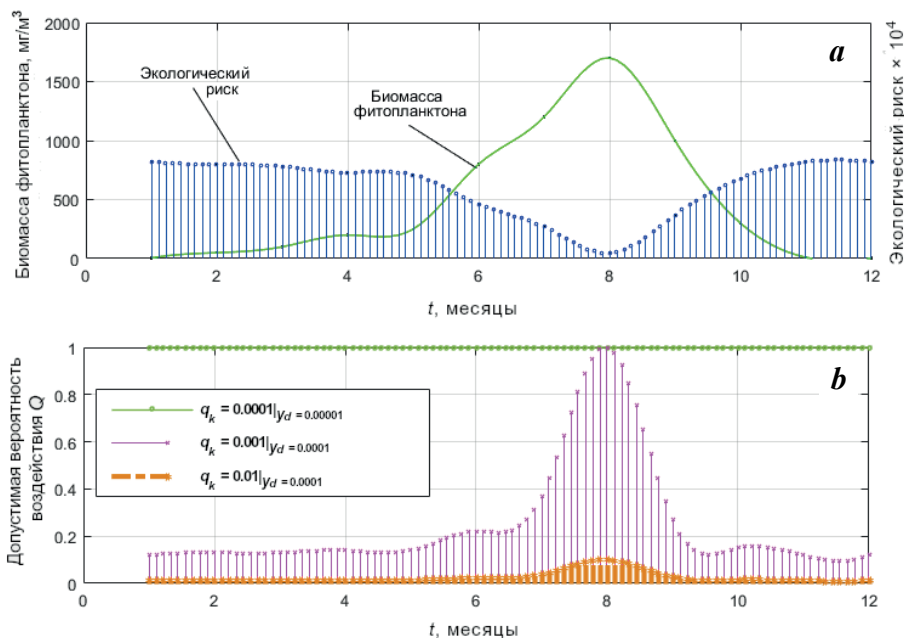


Рис. 2. Обобщенный годовой ход биомассы фитопланктона в низкопродуктивных экосистемах Арктики по данным наблюдений [11–20] и рассчитанные по модели внутригодовые вариации значений экологического риска (a) и годовой ход допустимой вероятности воздействий  $Q(t)$  со стороны стрессоров в интервале значений  $q_k = 10^{-5} - 10^{-2}$ ;  $y_d = 10^{-4} - 10^{-3}$  (b)

Fig. 2. Generalized annual course of phytoplankton biomass in low-productive ecosystems of the Arctic according to observations [11–20] and model intra-annual variations of ecological risk values (a) and the annual course of the permissible probability of impacts  $Q(t)$  from stressors in the range of values  $q_k = 10^{-5} - 10^{-2}$ ;  $y_d = 10^{-4} - 10^{-3}$  (b)

ресурсов шельфа. Повышение точности оценок экологического риска требует привлечения больших объемов данных о процессах различной природы: физической, химической, биологической, геологической, техногенной. В нашем случае часть используемых данных о компонентах экосистем, о стрессорах техногенного и естественного происхождения относится к параметрам, быстро меняющимся в водном слое. Эта часть данных удовлетворяет требованиям 3V, характерным для *BigData* [31], что позволит в перспективе связать предложенный подход оценок риска с технологиями *BigData*. Синтез моделирования и технологий *BigData* обусловлен необходимостью быстрого перебора всех возможных сочетаний стрессоров различной природы с большим количеством параметров и наложением воздействий на пространственно-временную естественную динамику экосистемы в режиме реального времени [31]. В этом смысле большое значение имеют данные дистанционного зондирования, позволяющие получить информацию об океанологических параметрах морской среды, включая гидробиологические параметры, в частности значения концентрации хлорофилла *a* [25, 26].

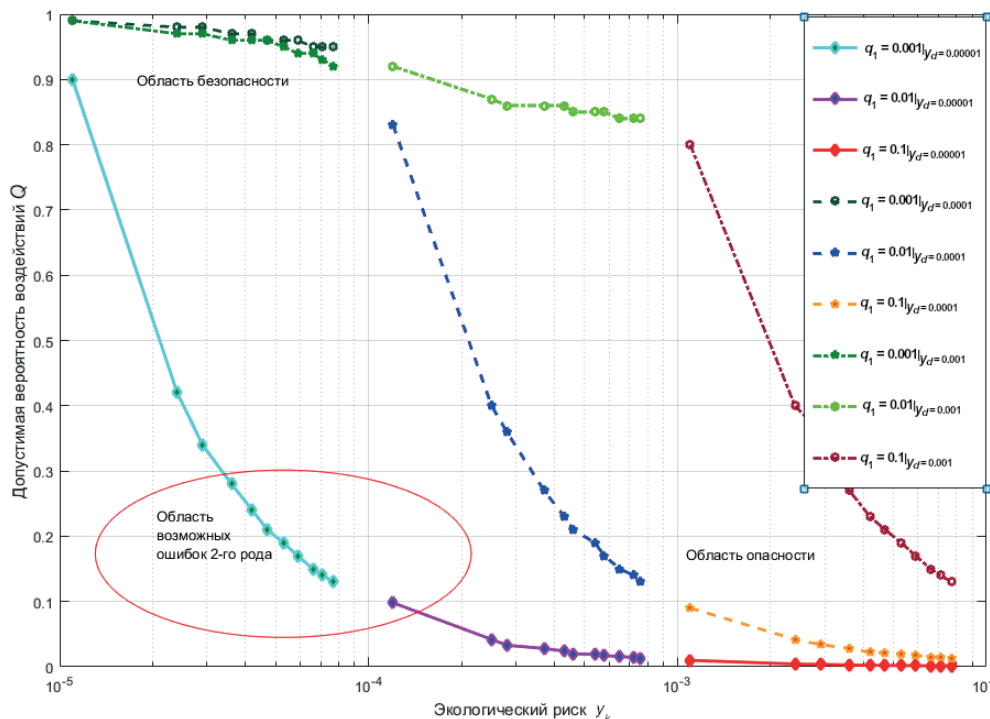


Рис. 3. Расчет зависимости допустимой вероятности воздействия на экосистему от экологического риска  $Q(y_k)$  при значениях  $q_k = 10^{-5} - 10^{-1}$  и  $y_d = 10^{-5} - 10^{-3}$   
 Fig. 3. Calculation of the dependence of the permissible probability of impact on the ecosystem on the environmental risk  $Q(y_k)$  at values  $q_k = 10^{-5} - 10^{-1}$  and  $y_d = 10^{-5} - 10^{-3}$

### Выводы

В настоящей работе влияние сезонной динамики компонентов экосистемы на внутригодовые вариации экологического риска подтверждено модельными расчетами. Полученные результаты являются одним из этапов создания количественного метода расчета риска с учетом не только параметров стрессоров, но и внутригодовых вариаций состояния экосистемы в естественных условиях функционирования. Важным результатом исследований стали расчеты зависимости допустимой вероятности воздействия на экосистему от экологического риска  $Q(y_k)$ , позволяющие выявлять области ошибок 1-го и 2-го рода.

Уточнение оценки экологического риска требует расширения данных о стрессорах техногенного происхождения. Влияние различных режимов технологических процессов, степени, частоты и времени воздействий технических систем и хозяйственной деятельности человека в акватории шельфа должны учитываться в динамике как техногенных процессов, так и самой экосистемы. Расширение спектра и содержания входных данных модели риска позволит приблизить предложенный метод к технологиям *BigData*.

Представленные в настоящей статье предварительные расчеты внутригодовых вариаций риска, проведенные по предложенной методике с целью выявления опасных ситуаций, показали работоспособность подхода и возможность распространения расчетов на морские экосистемы различных акваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ecological network analysis metrics: The need for an entire ecosystem approach in management and policy / B. D. Fath [et al.] // *Ocean and Coastal Management*. 2019. Vol. 174. P. 1–14. doi:10.1016/j.ocecoaman.2019.03.007
2. Elliott M., Borja A., Cormier R. Activity-footprints, pressures-footprints and effects-footprints – Walking the pathway to determining and managing human impacts in the sea // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 155. 111201. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111201
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. doi:10.1016/j.ocecoaman.2014.03.014
4. 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. doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.10.015
5. Solovjova N. V. Ecological risk modelling in developing resources of ecosystems characterized by varying vulnerability levels // *Ecological Modelling*. 2019. Vol. 406. P. 60–72. doi:10.1016/j.ecolmodel.2019.05.015
6. Solovjova N. V. Risk assessment simulation for shelf ecosystems based on the ecoscreening and dynamic methods synthesis // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020. Vol. 243. 106881. doi:10.1016/j.ecss.2020.106881
7. Solovjova N. V. Ecological risk simulation assessment in marine ecosystems of the Arctic shelf // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 169. 112577. doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112577
8. Sajid Z., Khan F., Veitch B. Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 153. 111001. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
9. An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline / E. Arzaghi [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 135. P. 1117–1127. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.08.030
10. Fahd F., Veitch B., Khan F. Arctic marine fish “biotransformation toxicity” model for ecological risk assessment // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 142. P. 408–418. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.03.039
11. Interannual variability of *Emiliana huxleyi* blooms in the Barents Sea: In situ data 2014–2018 / V. Silkin [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 158. 111392. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111392
12. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rimsky-Korsakov N. A. Ecosystems of the Russian Arctic-2015 (63rd Cruise of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh) // *Oceanology*. 2016. Vol. 56. P. 459–461. doi:10.1134/S0001437016030061
13. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rymisky-Korsakov N. A. Ecosystems of the Siberian Arctic Seas-2017 (Cruise 69 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh) // *Oceanology*. 2018. Vol. 58. P. 315–318. doi:10.1134/S0001437018020042
14. Phytoplankton in the northwestern Kara Sea / I. N. Sukhanova [et al.] // *Oceanology*. 2015. Vol. 55. P. 547–560. <https://doi.org/10.1134/S0001437015040141>
15. Phytoplankton of the western Arctic in the spring and summer of 2002: Structure and seasonal changes / I. N. Sukhanova [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2009. Vol. 56, iss. 17. P. 1223–1236. doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.030
16. Matishov G. G., Dzhenyuk S. L., Moiseev D. V. Climate and large marine ecosystems of the Arctic // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 87. P. 30–39. doi:10.1134/S1019331617010087

17. *Makarevich P. R., Oleinik A. A.* Structure of the annual cycle of phytoplankton community evolution in the Ob-Yenisei shoal of the Kara Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2009. Vol. 426. P. 669–671. doi:10.1134/S1028334X09040357
18. *Mosharov S. A., Demidov A. B., Simakova U. V.* Peculiarities of the primary production process in the Kara Sea at the end of the vegetation season // *Oceanology*. 2016. Vol. 56. P. 84–94. https://doi.org/10.1134/S0001437016010100
19. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms / A. B. Demidov [et al.] // *Journal of Sea Research*. 2017. Vol. 125. P. 1–17. doi:10.1016/j.seares.2017.05.004
20. *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 // *Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 132. P. 130–149. doi:10.1016/j.jmarsys.2014.01.014
21. *Флейшман Б. С.* Основы системологии. Москва : Изд-во Радио и связь, 1982. 368 с.
22. *Fleishman B. S.* Contribution to the theory of adaptation with application to ecology // *Ecological Modelling*. 1984. Vol. 26, iss. 1–2. P. 21–31. doi:10.1016/0304-3800(84)90090-5
23. *Fleishman B. S.* Hyperbolic law of reliability and its logarithmic effects in ecology // *Ecological Modelling*. 1991. Vol. 55, iss. 1–2. P. 75–88. doi:10.1016/0304-3800(91)90066-A
24. *Патин С. А.* Нефть и экология континентального шельфа: в 2-х т. Т. 1 : Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. Москва : Изд-во ВНИРО, 2017. 326 с.
25. *Беляев В. И.* Моделирование морских систем. Киев : Наукова Думка, 1987. 201 с.
26. *Беляев В. И., Кондуфорова Н. В.* Математическое моделирование экологических систем шельфа. Киев : Наукова Думка, 1990. 240 с.
27. *Флинт М. В.* Биоресурсы Арктических морей России: изменения под воздействием климата и факторов антропогенной природы, экосистемные основы охраны // Научно-технические проблемы освоения Арктики. Москва : Наука, 2015. С. 55–71.
28. *Дружкова Е. И., Макаревич П. Р.* Годовой цикл нанофитопланктона прибрежных вод Баренцева моря // *Известия РАН. Серия биологическая*. 2008. № 4. С. 497–506. EDN ISJYGT.
29. Фитопланктон Белого моря / Л. В. Ильяш [и др.] // Система Белого моря. Москва : Научный мир, 2012. Т. II : Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. С. 605–639.
30. *Макаревич П. Р., Ларионов В. В.* Годовой цикл развития планктонного фитоценоза Обь-Енисейского мелководья Карского моря // *Биология моря*. 2011. Т. 37, № 1. С. 3–8. EDN OTTCIN.
31. *Гвишани А. Д., Лобковский Л. И., Соловьева Н. В.* Перспективы синтеза моделей экологического риска и технологий больших данных для морских экосистем // *Физика Земли*. 2022. № 4. С. 101–112. EDN QIZYAJ. doi:10.31857/S0002333722040044

Поступила 29.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 07.06.2023 г.; принята к публикации 28.06.2023 г.; опубликована 25.09.2023 г.

*Об авторе:*

**Соловьева Наталья Владимировна**, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4268-7790**, **ResearcherID: AAZ-2398-2020**, **Scopus Author ID 6507375823**, *soloceanic@yandex.ru*

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*