


УДК 551.463.288:534.835.46
EDN: ZZLZXB

Н.Л. Маляренко 

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОГЕННОГО ПОДВОДНОГО ШУМА НА МОРСКИЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Объект и цель научной работы. Объектом является воздействие техногенного подводного шума на морские экосистемы. В работе продолжена тема формирования научных основ управления подводным шумовым загрязнением морских акваторий на базе методологии применения риск-ориентированного подхода к решению задач экологической безопасности. Цели статьи: аналитический обзор методологических подходов к исследованию воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы; ознакомление с приемами картирования морских акваторий по степени их уязвимости к рассматриваемому воздействию; рассмотрение методических основ количественной оценки экологического риска подводного шумового загрязнения морей с помощью индикаторов.

Материалы и методы. Использованы методические материалы, разработанные в Крыловском центре, отечественные и зарубежные публикации в рассматриваемой области. Применялись методы системного анализа, картографический метод исследования, методы расчета показателей совокупного воздействия подводного шума на морские экосистемы и количественной оценки риска воздействия шума с использованием индикаторов.

Основные результаты. Отражены современные подходы к управлению морскими экосистемами с применением инструментов экологического риск-менеджмента. Рассмотрены методы построения карт уязвимости морских экосистем к воздействию техногенного подводного шума и количественной оценки риска с помощью индикаторов. Приведен пример картирования и количественной оценки регионального экологического риска влияния техногенного импульсного шума в Северном море на сельдь в сезоны нереста.

Закключение. Рассмотрены подходы к управлению воздействием техногенного подводного шума на морскую среду, биоразнообразию и экологический статус морей, позволяющие встраивать управление шумовым загрязнением в морское пространственное планирование. Картирование риска воздействия подводного шума на биоразнообразие и количественная оценка уровней техногенного шумового загрязнения акватории с помощью индикаторов облегчают принятие решений по регулированию и снижению шума. В ряде морских регионов России, преимущественно дальневосточных, для различных источников техногенного шума выполняются разработки и оценки, необходимые для управления подводным шумовым загрязнением. Проведение аналогичных оценок для западных арктических морей имеет также большое значение, а выбор подходов к управлению риском воздействия техногенного подводного шума может существенно повлиять на экологическую безопасность морских экосистем.

Ключевые слова: техногенный подводный шум, экологический риск, морские экосистемы, экосистемное управление, карта риска, индикаторный подход к количественной оценке риска.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 551.463.288:534.835.46
EDN: ZZLZXB

N.L. Malyarenko 

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

UNDERWATER NOISE AND MARINE HABITATS: INTERNATIONAL EXPERIENCE OF HAZARD ASSESSMENT

Для цитирования: Маляренко Н.Л. Анализ международного опыта оценки экологического риска воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 107–116.

For citations: Malyarenko N.L. Underwater noise and marine habitats: international experience of hazard assessment. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 107–116 (in Russian).

Object and purpose of research. This paper discusses the impact of man-made underwater noise upon marine environments. It continues the topic of working out a scientific basis for noise pollution management of marine environments as per risk-oriented approach to environmental safety. The paper is intended to analyse and review existing methodological approaches to studying the adverse effects of man-made underwater noise upon marine environments; as well as to describe current mapping techniques for water areas illustrating the strength of underwater noise pollution impact upon their habitats, and to discuss methodological fundamentals in scoring underwater noise pollution as marine environmental hazard.

Materials and methods. The study relies on methodical documents of KSRC, as well as on Russian and foreign publication in this field. The authors followed the methods of system analysis and map-based research, as well as special methods used to score the total impact of underwater noise upon marine.

Main results. The paper reflects modern approaches to handling marine ecosystems by through environmental risk management tools. It discusses the methods used to make the maps of marine habitats in terms of their sensitivity to man-made underwater noise, as well as the methods of score-based assessment. It also tackles a case study of mapping and quantifying a regional environmental risk in the Northern Sea in terms of man-made pulse noise impact upon herring in its spawning seasons.

Conclusion. The authors discuss various approaches to managing the impact of underwater noise upon marine habitats and biodiversity, as well as environmental status of seas, so that noise pollution management could be integrated into a greater framework of marine spatial planning. Mapping the extent of underwater noise hazard for biodiversity and expressing the levels of noise pollution of given marine area by means of score indicators facilitate decision making in noise management and mitigation. In a number of Russian maritime areas, mostly in the Russian Far East, various sources of man-made noise are subject to studies and assessments required to manage underwater noise pollution. Similar assessments should definitely be performed for the seas in the west of the Russian Arctic, and proper choice of an approach to managing the underwater noise hazard might significantly improve environmental safety of marine ecosystems.

Keywords: man-made underwater noise, environmental risk, marine habitats, ecosystem management, risk map, hazard scores. *The author declares no conflicts of interest.*

Введение

Introduction

С развитием транспортных коммуникаций и других видов экономической активности в российских морях, с увеличением грузооборота по Северному морскому пути возрастает риск загрязнения окружающей среды. Одним из факторов техногенного воздействия на морскую среду является т.н. акустическое загрязнение. Необходимо изучать и анализировать последствия влияния техногенного акустического загрязнения морской среды, заранее оценивать риск воздействия подводного шума на экологические системы от деятельности на море и шельфе.

Международные и региональные организации и комиссии уделяют этой проблеме все большее внимание. За рубежом разрабатываются научно-исследовательские программы изучения воздействия на морские экосистемы подводного шума судоходства и техногенного шума, создаваемого при освоении ресурсов шельфа; реализуются проекты оценки состояния морской среды с применением концепции риск-ориентированного подхода и инструментов риск-менеджмента, например, проект RAGES (Risk-based Approaches to Good Environmental Status with Case Study on D2 (non-indigenous species) and D11 (underwater noise)) [1]. Вопросы внедрения концептуальных моделей управления техногенным подвод-

ным шумом и инструментов экологического риск-менеджмента рассмотрены в статье [2].

Экологический риск в контексте управления подводным шумовым загрязнением – вероятностная мера причинения ущерба водным биологическим ресурсам за определенное время вследствие воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы [2]. Ущерб определяется экологическими последствиями – изменениями, нарушающими естественные условия водной среды, структуру и функции морских экосистем, а также влияющими на состояние биологических видов.

Локальный уровень последствий ограничивается зоной нарушений на расстоянии не более десятков километров от источника воздействия. Региональный масштаб последствий охватывает обширные морские бассейны (крупные заливы, моря и др.), на глобальном уровне рассматриваются последствия для океанов.

Для морских млекопитающих и рыб звук – основное средство общения в водной среде. Млекопитающие страдают от шума судов и акустического излучения гидролокаторов. Рыбы на ранних стадиях своего развития наиболее уязвимы к воздействию импульса ударной волны пневмоисточника.

В настоящее время в промысловой океанологии и других морских отраслях используются методы статистического районирования морских акваторий по степени их уязвимости к тому или иному техно-

генному воздействию, в т.ч. к воздействию техногенного подводного шума. Основная сложность заключается в подборе критериев и показателей для оценки допустимых изменений состояния природной среды.

В практике управления риском воздействия шума превалирует качественная оценка риска. Это связано с дефицитом методов количественной оценки риска, недостатком данных о шумовом воздействии и местах обитания охраняемых биологических видов, высокочувствительных к шуму.

Следует отметить, что нет общепринятой методологии количественных оценок экологических последствий влияния техногенного подводного шума на морские экосистемы и водные биологические ресурсы.

В данной статье рассмотрены подходы и методы картирования и количественной оценки экологических рисков воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы с помощью индикаторов.

Методологические подходы к управлению морскими экосистемами и методы оценки устойчивости и уязвимости экосистем к воздействию техногенного подводного шума

Methodological approaches to marine ecosystem management and methods of assessing their robustness/vulnerability in terms of underwater noise impact

При управлении морскими экосистемами главным является экосистемный подход, основанный на принципе рационального использования морских биологических ресурсов, сохранения структур и функций экосистем. Цели экосистемного управления устанавливаются на долгосрочную перспективу.

Для управления воздействием техногенного подводного шума на морскую среду, биоразнообразие и экологический статус морей применяется риск-ориентированный подход, разрабатываются инструменты для оценки экологического риска. При этом используются следующие методы: экспертные оценки, матричный анализ, количественная оценка риска, имитационное моделирование и др.

Для моделирования морских экосистем и оценки экологического риска может применяться синтез экосистемного подхода и развивающегося экоскринингового подхода [3]. Экосистемные аналитиче-

ские модели, связанные с воздействием на морскую экологическую систему техногенных факторов, основаны на нелинейных дифференциальных уравнениях в частных производных, имитационные модели используют численные методы для моделирования морских экосистем. В динамических экосистемных моделях, учитывающих внутригодовую динамику компонент экосистемы и их пространственные вариации, расчеты могут выполняться в режиме реального времени.

Экоскрининговые модели позволяют в условиях неопределенности получать оценки риска для экосистем при техногенных воздействиях. С помощью вероятностных экоскрининговых моделей исследуемых акваторий получают представление о годовом ходе экологического риска и допустимые вероятностные уровни техногенных воздействий на морскую экосистему. В экоскрининговой модели под экологическим риском понимается вероятность гибели особи или популяции организмов.

Результаты численных экспериментов, проведенных по экосистемной модели, используются в экоскрининговых моделях в качестве входных данных.

Совместное применение динамических экосистемных моделей и экоскрининговых моделей на основе современных достижений в области мониторинга экосистем дает возможность оценить внутригодовую изменчивость риска, а значит, выявить наиболее опасные сезоны для популяций, подверженных техногенному воздействию. При этом первичным является определение величины допустимого риска для экосистемы, а не допустимая интенсивность техногенного воздействия [3], т.к. это позволяет варьировать экономические мероприятия для обеспечения экологической безопасности в зависимости от меняющегося в течение года экологического риска.

При синтезе экосистемного и экоскринингового подходов применяются: математическое моделирование динамических процессов, приводящих к загрязнению экосистем, логико-информационное моделирование, экоскрининговые оценки риска и методы управления риском.

Управление морскими экосистемами должно обеспечивать равновесие между сохранением и использованием биоразнообразия, а также устойчивость природных экосистем при техногенном воздействии на окружающую среду морского транспорта, сейсмозащиты, строительства морских платформ, нефтегазодобычи, укладки трубопроводов, рыболовного промысла и другой деятельности в море.

Одним из используемых методологических подходов является выделение экологически и биологически значимых районов морских акваторий на основе таких критериев как *уязвимость* и *чувствительность* морских биологических видов. При этом нужно учесть особую чувствительность и уязвимость арктических экосистем – за счет малого разнообразия биологических видов и невысокой степени устойчивости – к внешним воздействиям.

Уязвимость – это свойство природной среды (главным образом, определенного района моря, подвергнувшегося воздействию), которое характеризует последствия возможного негативного воздействия, выражаемое прямой потерей численности или биомассы отдельных видов или даже целых экологических групп сразу после него и продолжающегося сравнительно длительное время [4].

В рамках такого подхода разрабатываются методы картирования рисков по степени уязвимости морского биоразнообразия к воздействию техногенного подводного шума. Карты уязвимости всех экологических групп (от бактериопланктона до птиц) и природных комплексов (экосистем) к основным ожидаемым воздействиям, должны быть результатом инженерно-экологических изысканий на шельфе [5].

Однако в России в настоящий момент нет нормативов, предписывающих обязательную подготовку и использование карт уязвимости / чувствительности, отсутствует и утвержденная единая методика построения таких карт. Нашими специалистами предложены и используются на практике методики построения карт уязвимости прибрежных и морских зон для нефтяного загрязнения [4], необходимо начать разработку карт уязвимости биоразнообразия к воздействию техногенного подводного шума для морских зон РФ.

Для анализа распределения подводного шума судоходства по районам и оценки степени неблагоприятного воздействия шума судоходства на морские виды животных при отсутствии данных о параметрах техногенного подводного шума опосредованно могут быть использованы карты плотности движения судов. С их помощью можно определить вероятные районы наиболее высокого риска, где целесообразна последующая количественная оценка риска для разработки мер по предотвращению пересечения областей повышенной биопродуктивности морских акваторий с районами наиболее сильного техногенного воздействия.

Количественное или качественное значение индикатора (компонента природной или природно-техногенной среды) свидетельствует о текущем состоянии морской акватории, об изменении состояния или нарушении устойчивого развития.

Воздействие шума вызывает ряд физиологических и поведенческих реакций у отдельных животных, последствия которых сложно оценить количественно на уровне популяции вида и экосистемы.

За рубежом разработаны стандартизированные концептуальные подходы к оценке характеристик, значимых для экосистем, и созданы системы оценочных индикаторов (показателей) экологического риска подводного шумового загрязнения [1].

В Европе французскими компаниями Noveltis и Quiet-Oceans создан оперативный сервис Arctivities [6] (см. также [2]) для оценки экологических рисков, связанных с безопасностью деятельности на море и с воздействием техногенного подводного шума на окружающую среду и биоразнообразие, с помощью показателей риска, отслеживающих уровень воздействия шума.

Ранее [2] было рассмотрено применение карт плотности движения судов в восточных морях Арктики и северной части Тихого океана для качественной оценки воздействия подводного шума судоходства на китов и картографического отображения рисков сближения судов с китами.

В работе [7] выполнена оценка влияния техногенного импульсного шума в Северном море на сельдь в сезоны нереста (с использованием числовых индикаторов воздействия шума, основанных на оценке риска), построены карты уязвимости популяции к шумовому воздействию. Пример практического описания этого процесса будет приведен в настоящей статье.

Несмотря на широкое признание рисков для оценки состояния экосистем, скоординированные действия по управлению совокупными уровнями шума отсутствуют. Это можно объяснить сложностью получения количественных оценок риска.

Индикаторный подход, совместимый как с экосистемным подходом, так и с пространственным распределением подводного шумового загрязнения, может быть использован для количественной оценки риска воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы. Система числовых индикаторов воздействия шума, основанных на оценке риска, поможет в принятии решений по обеспечению мер, направленных на снижение шумового загрязнения морских акваторий.

Совокупное воздействие техногенных и природных факторов на морские экосистемы и биологические виды

Joint impact of man-made and natural factors upon marine habitats and species

Для возможности интеграции шумового загрязнения в качестве одного из техногенных факторов в существующие оценки совокупного воздействия антропогенной деятельности на морские экосистемы и методы управления морскими ресурсами целесообразно использовать разработанную за рубежом методологию расчета показателей совокупного воздействия на ключевые с экологической и экономической точек зрения компоненты Мирового океана [8, 9].

В работе [8] представлен метод онлайн-сбора экспертных заключений со всего мира, который описывает и документирует, как техногенные и природные факторы влияют на морские экосистемы. Данные в глобальном масштабе собраны по ряду основных антропогенных факторов и морских экосистем. Источники информации включали: данные полевых исследований, результаты моделирования, обзоры научной литературы.

Данные об интенсивности воздействия антропогенных факторов (D_i) имели крайне левостороннее распределение с очень небольшим количеством экстремальных выбросов и для обеспечения сопоставимости преобразованы с помощью $\log[X+1]$ -преобразования и масштабированы в интервале от 0 до 1.

Воздействие угрожающего фактора (угрозы) на биологический вид или экосистему определяется уязвимостью вида/экосистемы по отношению к этой угрозе. Далее экспертам предложили оценить в баллах пять критериев – «показателей уязвимости» экосистем к факторам воздействия, а также степень неопределенности данных. Показатели уязвимости: функциональное воздействие угрозы на уязвимость и чувствительность биологических видов экосистем (влияние на несколько видов или на все сообщество), пространственный охват и частоту возникновения угрозы экосистеме, устойчивость экосистемы к угрозе и время восстановления.

Для каждого показателя, используемого для оценки влияния угрожающих факторов на морские экосистемы, были разработаны системы ранжирования. Например, функциональное воздействие ранжировалось по четырем категориям: от 0 (нет воздействия) до 4 баллов (влияние на все сообщество видов). Пространственный охват – средние

площади, затронутые воздействием угроз на экосистему, ранжировались по шкале, варьирующейся от 0 (экосистема не затронута) до 6 (затронута > 10 000 кв. км).

Затем объединили пять «показателей уязвимости» и показатель неопределенности данных в единый весовой показатель уязвимости, который отражает (в относительном выражении) степень уязвимости данной экосистемы к данной угрозе. Распределение весов «показателей уязвимости» было получено с помощью вероятностной инверсии экспертных оценок. Весовые показатели уязвимости экосистем умножались на преобразованные данные D_i . Таким образом была получена матрица общих средневзвешенных безразмерных значений уязвимости экосистем к факторам воздействия.

Взвешивание антропогенных факторов по их предполагаемому экологическому воздействию позволяет выявить наибольшие угрозы (глобальные или локальные), наиболее/наименее чувствительные экосистемы и др. показатели природоохранной ценности.

В статье [9] описана аналитическая основа для расчета суммарных баллов (I_c) совокупного воздействия антропогенных факторов на морские экосистемы. Использовалась детерминированная аддитивная факторная модель. Среди рассмотренных факторов воздействия на экосистемы – коммерческое судоходство и освоение шельфа.

Для географической интерпретации и анализа данных, отражающих фактическое пространственное распределение угрожающих факторов воздействия по морскому ландшафту, была создана растровая модель угроз в виде совокупности ячеек растра (глобальных пикселей) для получения картографической информации. Каждой ячейке растровой модели соответствует одинаковый по размерам, но отличающийся цветом участок морской поверхности в зависимости от совокупного воздействия всех рассматриваемых факторов, угрожающих экосистемам.

Прогнозируемые баллы совокупного воздействия I_c рассчитывались для каждой ячейки карты океана площадью 1 км^2 как

$$I_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_i \cdot E_j \cdot \mu_{i,j}, \quad (1)$$

где D_i – нормализованное (логарифмически преобразованное и масштабированное в интервале от 0 до 1) значение интенсивности воздействия i -го фактора на экосистемы в данном местоположении;

n – число факторов воздействия на экологию экосистем; E_j – вероятность присутствия экосистемы j в данной ячейке океана (1 либо 0 соответственно); m – количество морских экосистем; μ_{ij} – весовой показатель уязвимости экосистемы j к i -му фактору воздействия (в диапазоне от 0 до 4 баллов по категориальной шкале).

В используемой модели оценивалось влияние каждого фактора на экологию всей суммы экосистем в данном местоположении, поскольку в rasterной ячейке карты факторов (в зависимости от разрешения растра) экосистемы могут накладываться друг на друга, образуя смешение типов. Например, бентические, глубоководные и пелагические экосистемы сосуществуют в пределах каждой ячейки в местах с глубинами > 60 м.

На рис. 1 приведена гистограмма оценок совокупного антропогенного воздействия I_c на морские экосистемы. Баллы I_c оценивались по шести категориям: от очень низкого воздействия ($I_c < 1,4$) до очень большого ($I_c > 15,52$). Полученные оценки I_c лежат в диапазоне от 0,01 до 90,1.

На вставках рис. 1 укрупненно показаны хвостовые значения распределения при $I_c > 15,52$, составляющие $\sim 0,5\%$ от общей площади под воздействием антропогенных факторов.

В результате построена глобальная карта антропогенного воздействия на морские системы. Фрагмент этой карты для экосистемы Северного моря показан на рис. 2 (см. вклейку). Северное море входит в число морских экосистем, наиболее подверженных влиянию человека.

Антропогенное воздействие на океаны отличается сильной пространственной неоднородностью с примерно бимодальным распределением показателей I_c (рис. 1). Наибольшее совокупное воздей-

ствие приходится на районы шельфа и континентального склона. Области с высоким прогнозируемым воздействием находятся в Северном и Норвежском морях, Южно- и Восточно-Китайском морях, восточной части Карибского бассейна, на восточном побережье Северной Америки, в Средиземном море, Персидском заливе, Беринговом море [9].

Описанный подход может быть применен к морскому пространственному планированию в местном и региональном масштабах с учетом данных о разнообразии и распространении морских биологических видов. Формулу (1) можно использовать для оценки совокупного воздействия факторов изменения экологии водной среды отдельного региона на знаковые для экосистемы (охраняемые) морские биологические виды-индикаторы (биоиндикаторы), учитывая уникальную уязвимость видовых групп к различным техногенным воздействиям, включая подводный шум.

Природа антропогенного воздействия на экосистемы отличается от воздействия на морские биологические виды. Чтобы определить, как специфичный фактор воздействует на конкретный биоиндикатор с учетом временного и пространственного распределения вида в регионе, а также уязвимости вида, в работе [10] введена метрика CUI (cumulative utilization and impact), которая вычислялась в баллах для каждой ячейки карты района Калифорнийского течения с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$:

$$CUI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_i \cdot S_j \cdot u_{i,j}, \quad (2)$$

где D_i – нормализованное (логарифмически преобразованное и масштабированное в интервале от 0 до 1) значение интенсивности воздействия i -го фактора на экосистемы в данном местоположении;

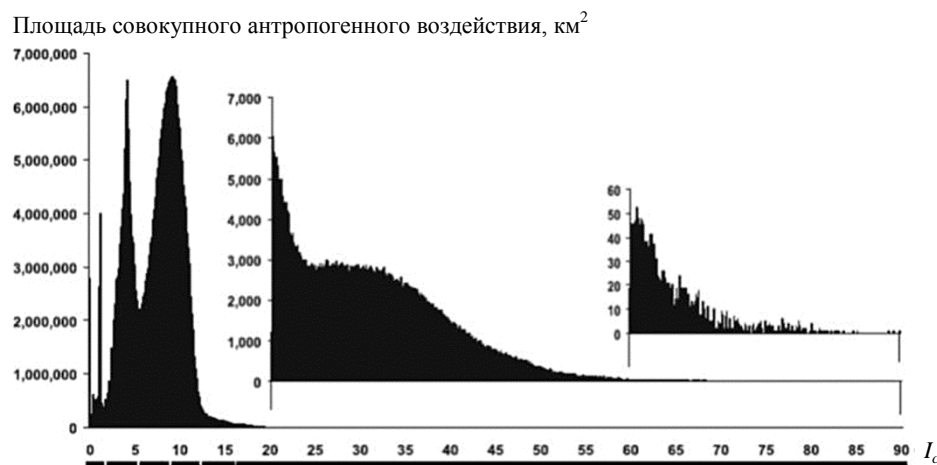


Рис. 1. Гистограмма оценок совокупного антропогенного воздействия на морские экосистемы [9]

Fig. 1. Histogram of cumulative scores for man-made impact upon marine ecosystems [9]

n – число факторов воздействия на экологию экосистем и виды; S_j – вероятность присутствия вида j в данной ячейке карты региона, получена из распределения вероятностей распространения вида в регионе, UD (utilization distributions); m – количество морских биологических видов; u_{ij} – весовой показатель уязвимости вида j к i -му фактору воздействия (масштабирован от 0 до 1).

Вес уязвимости биологического вида к фактору воздействия определялся для каждого биоиндикатора путем ранжирования шести показателей:

- частота воздействия,
- характеристика воздействия (прямое или косвенное),
- устойчивость вида к фактору воздействия,
- время восстановления особей вида от воздействия,
- относительное воздействие на воспроизводство,
- относительное воздействие на популяцию.

Балл CUI рассчитывался для каждой из трех групп видов (морские млекопитающие, морские птицы и кожистые морские черепахи) и всех видов вместе взятых.

С помощью всплывающих архивных регистраторов данных спутниковой системы Argos 54 и геолокации, основанной на измерении внешнего окружающего света (применяемой для изучения морских птиц), отслеживались перемещения видов, исследовались экологические связи между особями разных видов. Данные о распространении видов отображались на карте, вычислялось количество ячеек вероятного присутствия видов N_{UD} с подсчетом значений вероятности присутствия каждого вида в конкретной ячейке.

Интенсивности воздействия исследуемых антропогенных факторов D_i определялись с использованием картированных данных (с разрешением 1 км^2) о тех же факторах воздействия на тот же регион, опубликованных ранее в работе [11], где оценивалось влияние климатических факторов, рыболовства, судоходства, загрязнения (в т.ч. шумового) на 19 экосистем, имеющих отношение к Калифорнийскому течению.

Веса уязвимости биоиндикаторов к каждому фактору воздействия умножались на нормализованное значение интенсивности соответствующего фактора D_i в каждой ячейке, чтобы определить прогнозируемое воздействие фактора. Совокупное воздействие на виды факторов, взвешенных по уязвимости видов, учитывает факт присутствия / отсутствия вида в ячейке, но не учитывает долей пикселя в цифровом рисунке, занимаемых биоин-

дикатором. Общее количество ячеек под воздействием «взвешенных» по уязвимости видов факторов – N_{CI} .

Показатель CUI учитывает как совокупное антропогенное воздействие на морские биоиндикаторы «взвешенных» по уязвимости видов факторов, так и пространственную детализацию распространения видов в регионах. Количество ячеек, где совпадают места обитания видов-биоиндикаторов и зоны повышенного риска совокупного антропогенного воздействия «взвешенных» по уязвимости видов факторов – N_{CUI} .

Значения N_{UD} , N_{CI} , N_{CUI} нормализованы для возможности прямого сравнения с помощью логарифмического преобразования и представлены в табл. 1 (см. вклейку) для каждой группы видов-биоиндикаторов Калифорнийского течения на континентальном шельфе и за его пределами (на глубинах более 200 м).

При оценке экологического риска подводного шумового загрязнения используются методы моделирования. Результаты напрямую зависят от допущений и используемых наборов данных, требуется количественная оценка неопределенностей, связанных с моделью.

Проиллюстрируем совместное применение картирования риска воздействия техногенного подводного шума на морскую экосистему и индикаторного подхода для количественной оценки риска. Для картирования использовались данные с привязкой к координатной сетке карты региона по аналогии с методологией [10].

Пример картирования и количественной оценки риска воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы с использованием индикаторов

Case study: mapping and score-based quantification of man-made underwater noise hazard for marine ecosystems

Трансграничный характер подводного шума требует, чтобы управление воздействием техногенного подводного шума на биоиндикаторы осуществлялось на региональном уровне (хотя для некоторых мигрирующих видов может потребоваться глобальное управление).

Процесс картирования рисков и расчета показателей воздействия техногенного подводного шума

на биоиндикаторы морской экосистемы состоит из следующих этапов:

1. Определение области управления воздействием техногенного подводного шума на биоиндикаторы.
2. Масштабирование плотности популяций биоиндикаторов в процентах в зависимости от использования среды обитания популяции (предпочтительно с учетом временной изменчивости).
3. Количественная оценка уровней шумового загрязнения морской акватории. Построение карты давления техногенного подводного шума на биоиндикаторы в процентах от продолжительности оценочного периода.
4. Создание карты рисков на основе методологии расчета показателей совокупного воздействия [10].
5. Построение кривых воздействия (экспозиции) техногенного подводного шума на биоиндикаторы, показывающих процент времени, в течение которого данный процент популяции (или территории) подвергается воздействию шума. Кривые экспозиции обеспечивают количественную основу для определения числовых индикаторов – метрик, отслеживающих уровни совокупного воздействия.

Рассмотрим индикатор подверженности воздействию – индекс экспозиции EI (Exposure index). Индекс экспозиции EI выражает совокупное воздействие шума на популяцию через площадь под кривой экспозиции (выделенную цветом на рис. 3б, см. вклейку), преобразованную в логарифмический масштаб и масштабированную от 0 до 10 (рис. 3а, см. вклейку).

Однако индикатор EI не указывает на распределение экспозиции, поэтому используются и другие индикаторы. Например, небольшой процент популяции может подвергаться воздействию в течение большого процента времени от периода наблюдения (постоянное воздействие) и нужно определить значения процентов. Либо требуется установить, насколько широко (в %) и на какой процент популяции распространяется конкретное воздействие (распространенность воздействия).

Постоянное воздействие характеризует индикатор CER (Chronic Exposure Rate) – коэффициент постоянного воздействия, определяющий процент популяции, постоянно подвергающийся воздействию, с момента времени t_1 (% от периода наблюдения) в течение периода $t \geq t_1$, % (рис. 3б, см. вклейку).

Индикатор EPR (Exposure Prevalence Rate) – коэффициент распространенности воздействия – опи-

сывает процент популяции, подвергшийся воздействию с момента времени t_2 (% от периода наблюдения) в течение периода $t \geq t_2$, % (рис. 3б).

Продемонстрируем, как индикаторы подводного шума работают на практике. В исследовании [7] индикаторы применяются для оценки риска последствий воздействия на сельдь импульсной шумовой активности в Северном море, в районах ее нерестилищ. Выбрано три сезонных нерестилища (рис. 4а, см. вклейку): на севере моря (август-сентябрь), на юге (август-октябрь) и в проливе Ла-Манш (ноябрь-январь).

Важным этапом процесса картирования рисков является построение карты шумового давления в течение оценочного периода. Один из вариантов количественной оценки уровней шумового загрязнения морской акватории для построения данной карты – использование акустических моделей для прогнозирования уровней шума. С практической точки зрения такое моделирование требует знаний в области акустики, значительных затрат времени и ресурсов.

Используемый здесь подход такой же, как в исследовании [12] и ряде других работ. По спектрально-энергетическим характеристикам шума можно оценить дистанции реагирования различных видов рыб на гидроакустическое поле. В работе [12] смоделирован уровень экспозиции шума (Sound Exposure Level, SEL) как функция «дистанции воздействия».

Карта шумового давления построена с использованием «дистанции воздействия» для определенного местоположения и основана на информации Регистра импульсных шумов OSPAR (2015 г.), содержащего данные по шуму при забивке свай, использовании сейсмических пневматических пушек, при взрывах, при проявлениях активности военных гидролокаторов в Северо-Восточной Атлантике. Данные шумового давления отображались на карте с учетом календарных дней, в течение которых один или несколько импульсных источников шума возникали в ячейке сетки географической карты региона.

С использованием карты шумового давления разработана карта риска (рис. 4б, см. вклейку), на которой для соответствующих сезонов нереста указаны процентные доли времени воздействия импульсного шума и доли площади нерестилищ сельди под воздействием шума.

Полученные кривые и индексы воздействия (рис. 4в, см. вклейку) выявили различия между тремя нерестилищами. В то время как в районе Ла-

Манша не было воздействия шума, в южной и северной частях Северного моря значения индикатора EI составляли 7,54 и 7,62 соответственно. Распространенность воздействия была особенно значительной для южной части: 84 % площади нерестилищ. Постоянное шумовое воздействие было несколько выше для северного района: 10 % площади подвергалось воздействию в течение периода, составляющего > 30 % продолжительности сезона нереста.

Определение таких областей и периодов воздействия подводного шума на популяции дает возможность привести в соответствие экологические и экономические требования к безопасному освоению морских ресурсов.

Выводы

Conclusion

Научное понимание воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы, в т.ч. с применением подхода, основанного на оценке риска, позволит интегрировать управление подводным шумом в процесс морского акваториального пространственного планирования в России, направленного на сбалансирование требований экономического развития морских регионов, включая Арктику, с условиями сохранения и защиты окружающей природной среды.

Следует адаптировать для России разработанные в разных странах инструменты анализа экологического риска и риск-менеджмента для устранения отставания в проведении исследований, нацеленных на обеспечение экологической безопасности морского природопользования.

Необходимо развивать акустическое картографирование морей, находящихся под юрисдикцией РФ, в сочетании с картографированием мест обитаний высокочувствительных к подводному шуму биологических видов, имеющих природоохранное, экологическое или социально-экономическое значение, для получения пространственно-временных оценок риска воздействия техногенного подводного шума на биоразнообразию океана.

Список использованной литературы

1. Application of a risk-based approach to continuous underwater noise at local and subregional scales for the Marine Strategy Framework Directive / *E. Verling, R.M. Ricos, M. Bou-Cabo* [et al.] // *Marine Policy*. 2021. Vol. 134. P. 104786 (13 p.) DOI: 10.1016/j.marpol.2021.104786.

2. *Маляренко Н.Л.* Риск-ориентированный подход как метод исследования воздействия техногенного подводного шума на морские экосистемы // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2022. Вып. 4(402). С. 126–140. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-126-140.
3. *Соловьева Н.В.* Метод оценки эколого-экономического риска на основе математического моделирования // *Вестник МФЮА*. 2019. № 1. P. 94–106.
4. *Шавыкин А.А., Ильин Г.В.* Оценка интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения. Мурманск : ММБИ КНЦ РАН, 2010. 110 с.
5. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения : актуализир. редакция СНиП 11-02-96. Москва, 2017. 122 с.
6. Decision-making tool to help the marine industry in the Arctic region // *Noveltis* : [site]. S.l., 2022. URL: [https://www.noveltis.fr/en/references/decision-making-tool-to-help-the-marine-industry-in-the-arctic-region/#iLightbox\[5cc4cb3879a1cd516ed\]/0](https://www.noveltis.fr/en/references/decision-making-tool-to-help-the-marine-industry-in-the-arctic-region/#iLightbox[5cc4cb3879a1cd516ed]/0) (Accessed: 15.09.2023).
7. *Merchant N.D., Foulkner R.C., Martinez R.* Marine Noise Budgets in Practice // *Conservation Letters*. 2018. Vol. 11, No. 3. P. e12420 (p. 1–8). DOI: 10.1111/conl.12420.
8. Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats / *B.S. Halpern, K.A. Selkoe, F. Micheli* [et al.] // *Conservation Biology*. 2007. Vol. 21. P. 1301–1315. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x.
9. A global map of human impact on marine ecosystems / *B.S. Halpern, S. Walbridge, K.A. Selkoe* [et al.] // *Science*. 2008. Vol. 319. P. 948–952. DOI: 10.1126/science.1149345.
10. Cumulative human impacts on marine predators / *S.M. Maxwell, E.L. Hazen, S.J. Bograd* [et al.] // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. P. 2688 (p. 1–9). DOI: 10.1038/ncomms3688.
11. Mapping cumulative human impacts to California Current marine ecosystems / *B.S. Halpern, C.V. Kappel, K.A. Selkoe* [et al.] // *Conservation Letters*. 2009. Vol. 2. P. 138–148. DOI: 10.1111/j.1755-263X.2009.00058.x.
12. *Handegard N.O., Tronstad T.V., Hovem J.M.* Evaluating the effect of seismic surveys on fish – the efficacy of different exposure metrics to explain disturbance // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2013. Vol. 70, No. 9. P. 1271–1277. DOI: 10.1139/cjfas-2012-046.

References

1. Application of a risk-based approach to continuous underwater noise at local and subregional scales for the Marine Strategy Framework Directive / *E. Verling,*

- R.M. Ricos, M. Bou-Cabo* [et al.] // *Marine Policy*. 2021. Vol. 134. P. 104786 (13 p.) DOI: 10.1016/j.marpol.2021.104786.
2. *Malyarenko N.L.* Risk-oriented approach as a research method for the effect of man-made underwater noise upon marine ecosystems // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2022. Vol. 4(402). P. 126–140. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-126-140 (in Russian).
 3. *Solovyeva N.* Method of environmental & economic risk assessment based on mathematical simulation // *Herald of the Moscow University of Finances and Law (MFUA)*. 2019. No. 1. P. 94–106 (in Russian).
 4. *Shavykin A., Ilyin G.* An Assessment of the Integral Vulnerability of the Barents Sea to Oil Contamination. Murmansk : Marine Biological Institute ; Kola Research Centre of Russian Academy of Science, 2010. 110 p. (in Russian).
 5. Construction Rules SP 47.13330.2016 Construction surveys in civil engineering. Main provisions. Updated edition of Construction Rules and Guidelines SNIIP 11-02-96, Moscow, 2017, 122 p. (in Russian).
 6. Decision-making tool to help the marine industry in the Arctic region // *Noveltis* : [site]. S.l., 2022. URL: [https://www.noveltis.fr/en/references/decision-making-tool-to-help-the-marine-industry-in-the-arctic-region/#iLightbox\[5cc4cb3879a1cd516ed\]/0](https://www.noveltis.fr/en/references/decision-making-tool-to-help-the-marine-industry-in-the-arctic-region/#iLightbox[5cc4cb3879a1cd516ed]/0) (Accessed: 15.09.2023).
 7. *Merchant N.D., Foulkner R.C., Martinez R.* Marine Noise Budgets in Practice // *Conservation Letters*. 2018. Vol. 11, No. 3. P. e12420 (p. 1–8). DOI: 10.1111/conl.12420.
 8. Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats / *B.S. Halpern, K.A. Selkoe, F. Micheli* [et al.] // *Conservation Biology*. 2007. Vol. 21. P. 1301–1315. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x.
 9. A global map of human impact on marine ecosystems / *B.S. Halpern, S. Walbridge, K.A. Selkoe* [et al.] // *Science*. 2008. Vol. 319. P. 948–952. DOI: 10.1126/science.1149345.
 10. Cumulative human impacts on marine predators / *S.M. Maxwell, E.L. Hazen, S.J. Bograd* [et al.] // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. P. 2688 (p. 1–9). DOI: 10.1038/ncomms3688.
 11. Mapping cumulative human impacts to California Current marine ecosystems / *B.S. Halpern, C.V. Kappel, K.A. Selkoe* [et al.] // *Conservation Letters*. 2009. Vol. 2. P. 138–148. DOI: 10.1111/j.1755-263X.2009.00058.x.
 12. *Handegard N.O., Tronstad T.V., Hovem J.M.* Evaluating the effect of seismic surveys on fish – the efficacy of different exposure metrics to explain disturbance // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2013. Vol. 70, No. 9. P. 1271–1277. DOI: 10.1139/cjfas-2012-046.

Сведения об авторе

Маляренко Нина Леонидовна, научный сотрудник лаборатории техногенного подводного шума, математического моделирования и гидроакустики океана ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-30-40. E-mail: nmoshnik@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9359-9451>.

About the author

Nina L. Malyarenko, Researcher, Man-Made Underwater Noise, Mathematical Simulation and Ocean Hydroacoustics Laboratory KSRC. Address: 44, Moskovskoye shosse, St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-30-40. E-mail: nmoshnik@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9359-9451>.

Поступила / Received: 05.06.23
Принята в печать / Accepted: 29.02.24
© Маляренко Н.Л., 2024

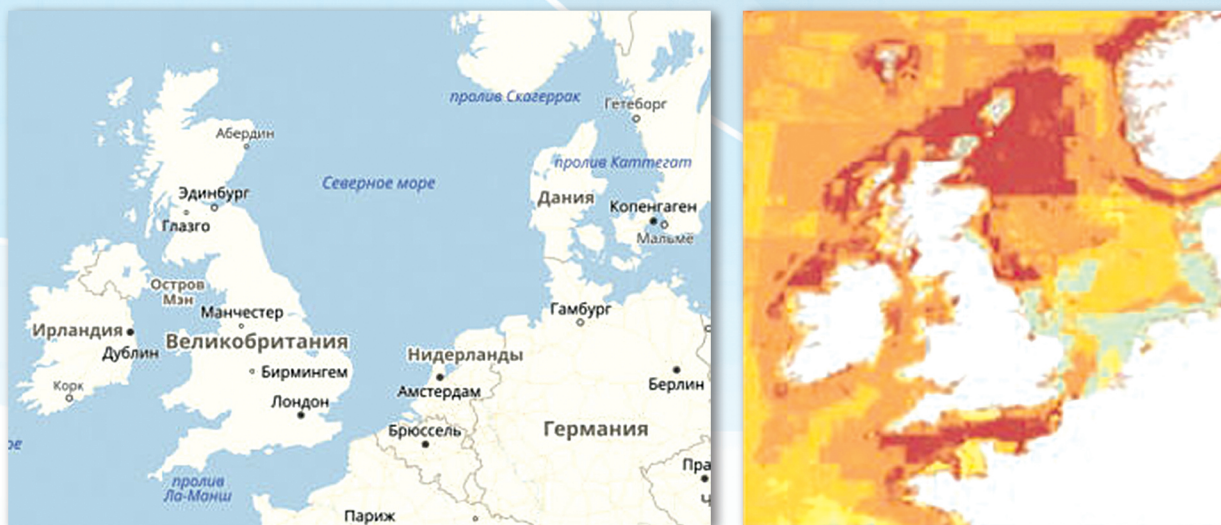


Рис. 2. Фрагмент глобальной карты антропогенного воздействия (справа) для экосистемы Северного моря [9]

Fig. 2. A fragment of overall human impact map (right) for Northern Sea habitats [9]

Категории совокупного антропогенного воздействия:







	Очень низкое	$I_c < 1,4$
	Низкое	$1,4 \leq I_c < 4,95$
	Среднее	$4,95 \leq I_c < 8,47$
	Выше среднего	$8,47 \leq I_c < 12$
	Большое	$12 \leq I_c \leq 15,52$
	Очень большое	$I_c > 15,52$

Таблица 1. Показатели распространения морских видов в Калифорнийском течении на континентальном шельфе / за его пределами (на глубинах более 200 м) и совокупного антропогенного воздействия на них [10]

Table 1. Occurrence of marine species in the California Current on the continental shelf and in blue waters (depths over 200 m), and cumulative human impact on them [10]

Виды	N_{UD}	N_{CI}	N_{CUI}
Все три морских вида (млекопитающие, птицы, черепахи)	65/82	199/41	40/3
Морские млекопитающие	39/23	204/96	27/0
Морские птицы	75/317	203/23	42/38
Морские черепахи	13/22	172/100	9/0

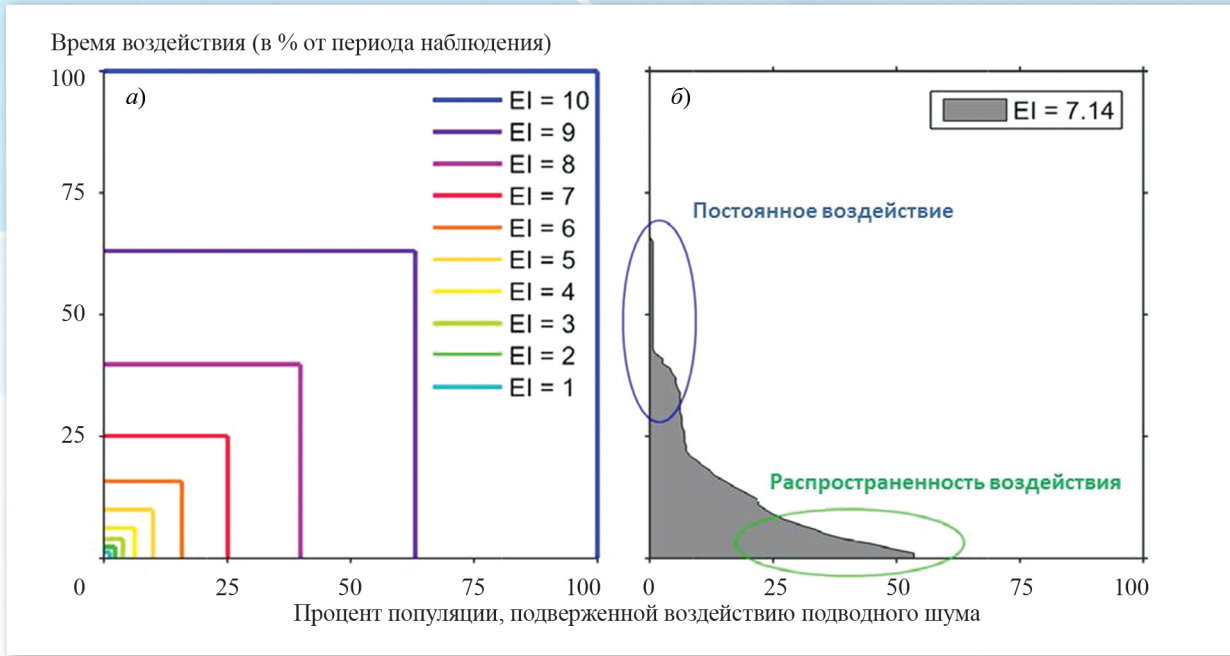


Рис. 3. Масштабирование площади воздействия подводного шума на популяцию

Fig. 3. Scaling the area of underwater noise impact upon a population of species

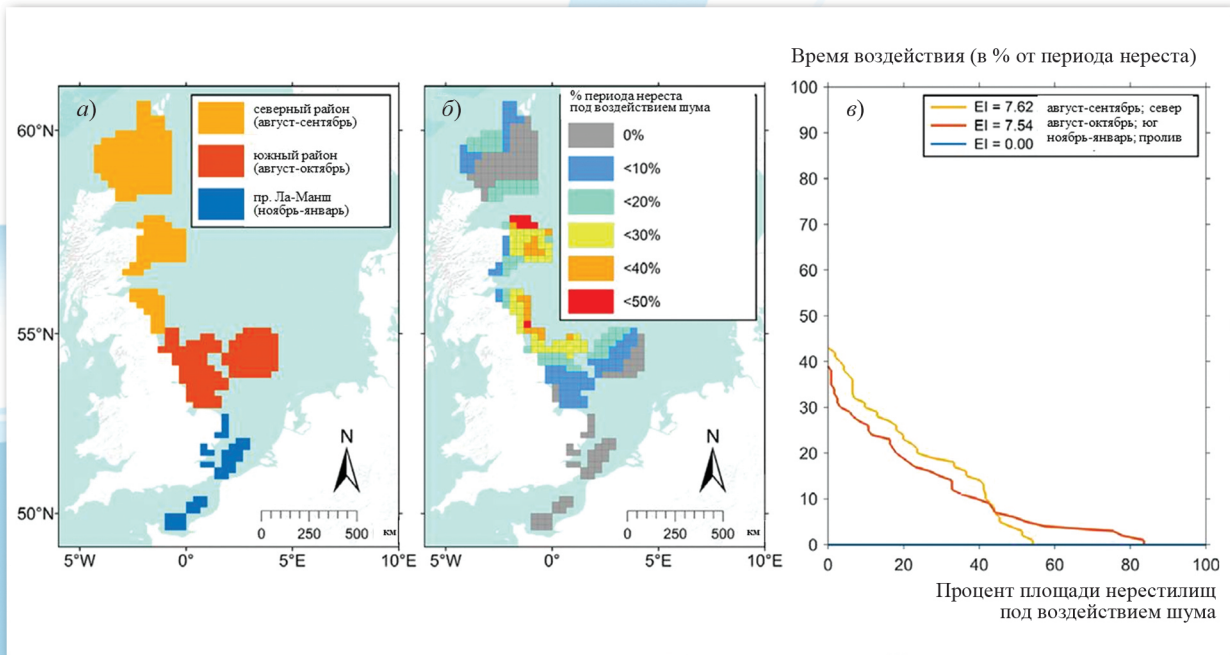


Рис. 4. Картирование рисков и определение индексов воздействия импульсного техногенного шума на сельдь в сезоны нереста в Северном море [7]

Fig. 4. Risk mapping and calculation of pulse man-made noise impact scores for the Northern Sea herring in its spawning seasons [7]