



Морской шум в Южном океане

Автор

Christine Erbe, Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, Perth, WA 6102, Australia

Doug Nowacek, Duke University Marine Lab, Beaufort, NC 28516, USA

Rachel Przeslawski, Geoscience Australia, Canberra, ACT 2601, Australia

Daniel P. Costa, Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of California Santa Cruz, CA 95060, USA

Краткий обзор

Морской шум – это форма загрязнения океана, которая может оказать воздействие на фауну, от крошечного зоопланктона до огромных китов. Он может мешать их акустическому восприятию окружающей среды океана и общению; вызывать нарушения в поведении животных и вынуждать их перемещаться; приводить к несбалансированности в потребности и поглощении энергии; в крайних случаях приводить к повреждениям и травмам и в конечном итоге оказывать воздействие на здоровье и способность к выживанию. Южный океан не застрахован от морского шума и его воздействий; однако на данный момент проведено очень мало исследований биоакустических воздействий на антарктические виды в Южном океане. В настоящей статье мы представляем обзор источников морского шума в Южном океане, его потенциального воздействия, вариантов смягчения воздействия на окружающую среду, а также потребностей в управлении и исследованиях.

Подробный обзор

Источники морского шума в Южном океане

Океан не тихое место. Он таит в себе множество звуков, которые возникают не только в океане, но также над ним и под ним, распространяясь в океан. К естественным, абиотическим источникам звука относятся ветер, дующий над открытым океаном и надо льдом; осадки на море или морской лёд; разбивающиеся волны; подводные вулканы, землетрясения и оползни; а также вскрытие ледяного покрова. К биотическим источникам звука относятся щёлкающие звуки, издаваемые креветками, хоровые звуки рыб, свист дельфинов, щелчки зубатых китов и пение тюленей и усатых китов.

Источники и уровни подводного звука меняются в зависимости от местоположения, времени суток, времени года и акустической частоты. Подводный звук вокруг Антарктиды имеет большую пространственно-временную изменчивость из-за сезонных изменений льда. Ледяной покров может ослаблять звук в диапазоне от нескольких герц до 500 Гц, но при этом также и добавлять звук в эту полосу частот, особенно вдоль кромки льда. Звук льда может быть как тональным

(трение айсбергов), так и импульсным (треск льда). Ветер, дующий над открытым океаном и над тонким льдом, создаёт непрерывный широкополосный подводный звук в диапазоне от нескольких десятков герц до 20 кГц. Морская мегафауна излучает одиночные звуки (длящиеся несколько секунд), звуки, объединённые в песни (продолжающиеся от нескольких часов до нескольких дней), и хоровые звуки (когда происходит наложение такого большого количества звуков и (или) песен, что спектр шума окружающей среды увеличивается в соответствующей полосе частот). К представителям мегафауны, издающим эти звуки, относятся южные синие киты (*Balaenoptera musculus intermedia*; 18–27 Гц), финвалы (*Balaenoptera Physalus*; 15–30 Гц и 90–100 Гц), южные малые полосатики (*Balaenoptera bonaerensis*; 100–300 Гц), тюлени Уэдделла (*Leptonychotes weddelli*; 100 Гц – 15 кГц) и морские леопарды (*Hydrurga leptonyx*; 50 Гц – 6 кГц) [1,2]. Киты обитают в течение лета в Южном полушарии, тюлени – круглый год.

В последние десятилетия Южный океан всё больше подвергается воздействию антропогенного шума, создаваемого круизными, научно-исследовательскими и рыболовными судами, гидролокаторами, сейсмическими пневмопушками, а также периодическим строительством научно-исследовательских станций и причалов. Не все регионы Антарктики подвергаются воздействию шума в равной степени. Скорее всего, наиболее посещаемым является южнотихоокеанское побережье Антарктиды (между морем Росса и Антарктическим полуостровом) [3]. В последние годы неуклонно растёт судоходство даже несмотря на отсутствие международных судоходных маршрутов через Южный океан. В последние годы присутствие в этом регионе туристических судов (измеряется судо-днями) более чем вдвое превышает присутствие рыболовных судов и втрое – присутствие исследовательских судов. В период с 1999 по 2019 год количество рейсов туристических судов утроилось и продолжает расти (см. сводку данных в [3]). Деятельность научно-исследовательских судов также продолжает увеличиваться, в то время как промысловая деятельность по-прежнему остаётся более менее постоянной. Туристические суда заходят в регион только в течение лета в Южном полушарии, на которое также приходится сезон максимально активной деятельности научно-исследовательских и вспомогательных судов (т.е. ледоколов, обслуживающих научно-исследовательские станции). Рыболовные суда присутствуют в течение всего года за пределами паковых льдов, следовательно, зимой на более низких широтах.

Судовой шум возникает из-за кавитации гребного винта, а также звуков двигателей и механизмов, которые передаются в воду через корпус. Шум широкополосный (10 Гц – 20 кГц) и непрерывный. Ледоколы также создают шум при ломке льда. Суда для сейсмических исследований буксируют группу пневмопушек, которые многократно выпускают в воду воздух под высоким давлением, создавая серию резких акустических импульсов (5 Гц – 20 кГц, каждые 5–20 с). Морские сейсмические исследования используются для изучения земной коры, её структуры и геологии. Все суда оснащены навигационными эхолотами, которые издают акустический импульсный сигнал (> 10 кГц) каждые несколько секунд [3]. Полученный уровень зависит от ряда факторов, таких как батиметрия (мелкая, наклонная или глубокая), геология морского дна, профили температуры и солёности в водной толще, глубина, на которой расположен приёмник, и, конечно же, расстояние до источника [4]. В правильных условиях звук судна может распространяться на сотни километров, [5] а сейсмические исследования регистрировались на расстоянии тысяч километров [6]. Звук в Южном океане может распространяться на большие расстояния (сотни тысяч километров [7,8]), поскольку холодные

поверхностные воды создают приповерхностный звуковой канал, а глубокая батиметрия предотвращает потерю акустической энергии на низких частотах. Следовательно, антарктический морской шум может оказывать воздействие на морскую фауну вдали от источника звука (рис. 1).

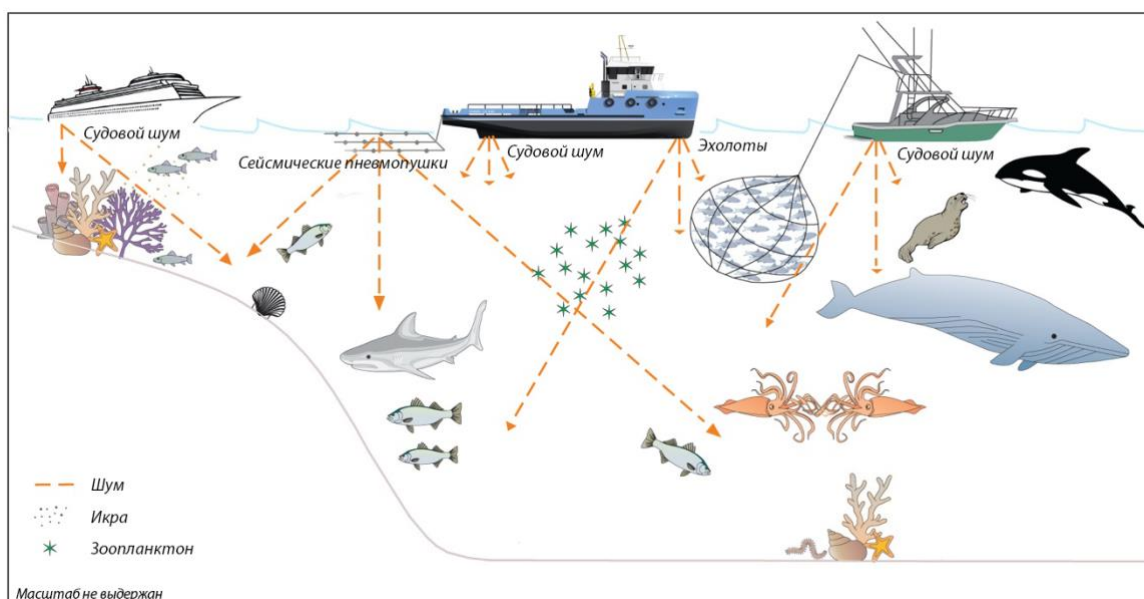


Рисунок 1. Концептуальная схема, отображающая характерные антропогенные источники подводного шума и некоторые виды антарктической фауны, которые могут подвергаться воздействию шума.

Оранжевыми стрелками показаны волновые векторы, указывающие возможные направления распространения звука. Схема не является исчерпывающей и не включает в себя величину или тип воздействия.

Воздействие шума на морскую фауну

Подводный шум может воздействовать на морскую фауну по-разному – от острого до хронического воздействия как на поведение, так и на физиологию животных. В крайних случаях источники интенсивного шума, такие как большие группы сейсмоприёмников или подводные взрывы, могут моментально травмировать или даже убить, особенно представителей мелкой планктонной фауны [9]. К другим острым последствиям относятся потеря слуха, внезапные изменения поведения и стресс, которые в ряде случаев могут негативно сказаться на здоровье животного.

Потеря слуха, вызванная шумом, может быть временной (временный сдвиг слухового порога, ВССП) или постоянной (постоянный сдвиг слухового порога, ПССП). Учитывая важность звука для многих морских животных, нарушение слуха может негативно воздействовать на акустическую коммуникацию, навигацию, поиск пищи, размножение и другие жизненные функции. Имеются документальные сведения, что обыкновенный тюлень (*Phoca vitulina*) испытывает ПССП на уровне 8 дБ (не восстанавливается через > 10 лет) после воздействия шума 4 кГц при 181 дБ отн. 1 мкПа и 199 дБ отн. 1 мкПа²с, что соответствует шуму, издаваемому военным гидролокатором на близком расстоянии [10]. Резкое воздействие шума может привести либо к ВССП, либо к ПССП, в зависимости от уровня воздействия. ПССП может также возникнуть после хронического воздействия шума более низкого уровня.

Хроническое воздействие может иметь большее значение для общего здоровья популяций животных. Хронический шум может вынудить их покинуть важную среду обитания. Перемещение часто не принимается во внимание, так как полагается, что животные могут просто переместиться в более спокойные районы, но животные выбирают среду обитания по определённым причинам, и подходящих альтернатив может не быть. От рыб до китов, – все виды ежесезонно возвращаются в критически важные места обитания, такие как места кормления и размножения. Некоторые мигрирующие киты потребляют значительную часть своего годового рациона во время нагула в Антарктике [11], однако временное окно для кормления здесь очень ограничено (около 3 месяцев). Было отмечено, что крупномасштабные сейсмические исследования, продолжающиеся от нескольких недель до нескольких месяцев, вытесняют таких животных, как финвалы, в Северную Атлантику; однако они вернулись после завершения сейсморазведки [12].

Шум также может оказать воздействие на акустическое поведение (т. е. на образование и использование звуков). Увеличение хронического низкочастотного шума от судоходства, вероятно, привело к долгосрочному сдвигу вверх звуков, издаваемых южными китами (вид *Eubalaena*) [13]. Гренландские киты (*Balaena mysticetus*; арктический вид) увеличили как скорость издавания звуков, так и уровень источника в результате увеличения шума от ветра и сейсмических исследований [14]; однако был достигнут порог, после которого оба метода звуковой компенсации начали давать сбой, что привело к снижению скорости издавания звуков и уменьшению пространства для общения.

Наконец, было отмечено, что морские ежи (*Arbacia lixula* [15]), рыбы (например, нильская тиляпия, *Oreochromis niloticus* [16]) и киты подвержены стрессу, вызванному шумом. Уровень глюкокортикоидных гормонов стресса у южных китов снизился в период снижения шума от судоходства [17]. Хотя временное повышение уровня гормонов стресса и не является пагубным (они вызывают реакцию борьбы или бегства, чтобы избежать угрозы), длительное повышение уровня гормонов может поставить под угрозу иммунную и репродуктивную функции.

В настоящее время имеется очень мало знаний о шуме в контексте других неакустических факторов стресса (например, химического загрязнения или истощения количества кормовых объектов), в том числе с учётом того, может ли шум способствовать взаимоусиливающему взаимодействию (т. е. воздействию двух или более факторов стресса в большей величине, чем сумма их воздействия по отдельности). Животные могут быть более восприимчивыми к акустическому стрессу в присутствии других факторов стресса. Множественные факторы стресса могут привести к переломному моменту, когда можно будет наблюдать воздействие шума; это может быть особенно применимо к тепловому стрессу [18], к которому многие антарктические виды могут быть всё более уязвимыми [19].

Таблица 1. Примеры воздействия шума на морские виды, обитающие в Южном океане (* или аналогичные, неантарктические виды). В эту таблицу не включены исследования, в которых отражено отсутствие воздействий.

Таксономическая группа	Виды	Источник шума	Воздействие	Источник
Зоопланктон	*Copepoda, Cladocera	Сейсмические пневмопушки	Уменьшение изобилия и способности выживания	[9]
Гребешки	*Морской гребешок (<i>Pecten fumatus</i>)	Сейсмические пневмопушки	Поведенческие и физиологические реакции	[20]
Морские ежи	*Морской ёж (<i>Arbacia lixula</i>)	Имитация эхолота/звукового локатора	Стресс	[15]
Ракообразные	*Южный лангуст (<i>Jasus edwardsii</i>)	Сейсмические пневмопушки	Нарушение выпрямления, травма стагоцисты	[21]
Кальмары	*Кальмар южный (<i>Sepioteuthis australis</i>)	Сейсмические пневмопушки	Реакция испуга, поведение избегания	[22]
Рыбы	*Атлантическая треска (<i>Gadus morhua</i>), сайда (<i>Pollachius virens</i>)	Сейсмические пневмопушки	Изменения частоты сердечных сокращений и поведения	[23]
Морские птицы	*Пингвин (<i>Spheniscus demersus</i>)	Сейсмические пневмопушки	Вытеснение из предпочитаемого места кормления	[24]
Усатые киты	Южный синий кит (<i>Balaenoptera musculus intermedia</i>)	Военно-морской гидролокатор	Прекращение кормления, нырок, поведение избегания Повышенная скорость издавания звуков	[25]
Усатые киты	Финвал (<i>Balaenoptera Physalus</i>)	Суда, Сейсмические пневмопушки	Изменения в характеристиках издавания звуков (продолжительность, диапазон частот, пиковая частота)	[12]
Усатые киты	Горбатый кит (<i>Megaptera novaeangliae</i>)	Суда, Сейсмические пневмопушки	Снижение взаимодействия между особями	[26]
Зубатые киты	Косатка (<i>Orcinus orca</i>)	Суда, Военно-морской гидролокатор	Поведение избегания	[27,28]
Зубатые киты	Кашалот (<i>Physeter macrocephalus</i>)	Военно-морской гидролокатор	Нарушение поиска пищи и отдыха, поведение избегания	[29]
Тюлени	*Пёстрая нерпа (<i>Phoca largha</i>), *кольчатая нерпа (<i>Pusa hispida</i>)	Сейсмические пневмопушки	Акустическая маскировка	[30]
Тюлени	*Северный морской слон (<i>Mirounga angustirostris</i>)	Шум в октавной полосе частот	ВССП	[31]
Тюлени	*Морской заяц (<i>Erignathus barbatus</i>)	Сейсмические пневмопушки	ВССП	[32]
Тюлени	*Северный морской слон (<i>Mirounga angustirostris</i>)	Акустический исследовательский сигнал (АТОС)	Изменение поведения в при погружении в воду	[33]

Варианты смягчения воздействий

Для снижения вероятности и степени воздействия требуется уменьшение воздействия шума. Это может быть обеспечено с помощью альтернативных технологий (например, меньших групп сейсмических пневмопушек или замены пневмопушек, например, на сейсмические вибраторы, или применения более тихих судов), изменения источников звука (например, уменьшения мощности, диапазона частот или других характеристик сигнала), изменения рабочих характеристик (например, сокращения рабочего цикла или линейного ускорения рабочего цикла в качестве предупреждения для животных) или применения установок для снижения шума (например, пузырьковых завес вокруг места забивки свай для строительства пристани). Исследование присутствия животных на месте в режиме реального времени (например, наблюдатели за морскими млекопитающими на борту, дроны с камерами или пассивная акустическая локализация и отслеживание с помощью буксируемой системы) может дать информацию для управления на месте, например, временное снижение мощности или отключение, если животные находятся поблизости. При предварительном планировании можно учитывать закрытие по времени и территории, позволяющее избегать критических мест обитания и сезонов (рис. 2).



Рисунок 2. Схема вариантов шумоподавления. Горизонтальный вид на океан у кромки льда. Варианты шумоподавления показаны у источника (например, изменение технологии или операций), рядом с источником (например, установка шумоподавляющего оборудования), в зонах мониторинга (например, задействование наблюдателей за морскими млекопитающими, пассивный акустический мониторинг, инфракрасные камеры или системы формирования гидролокационных изображений) и по всей территории (т.е. ограничение операций в определённые сезоны или в пределах морских охраняемых районов (МОР)).

Вся деятельность в Антарктике подлежит предварительной оценке воздействия на окружающую среду в соответствии с положениями Приложения I к Протоколу по охране

окружающей среды к Договору об Антарктике. Однако единого регулирующего органа не существует. Исследовательская деятельность оценивается каждой отдельной страной, подписавшей Договор об Антарктике. Вопросы туризма регулируются Консультативным совещанием по Договору об Антарктике (КСДА) и Международной ассоциацией антарктических туроператоров (МААТО), а рыболовство – Комиссией по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (АНТКОМ). Подходы, применяемые Сторонами Договора к оценке и разрешению деятельности, создающей шум (например, к сейсмическим исследованиям), могут различаться в зависимости от положений законодательства каждой конкретной страны.

Задачи

Потребности в исследованиях

На данный момент собрано мало информации о воздействии шума на различные виды в водах Антарктики (таблица 1), поэтому выводы приходится делать на основе исследований аналогичных и родственных видов в других местах. Достоверность таких экстраполяций неизвестна, учитывая различия в окружающем шуме, распространении звука и экологических особенностях. Недавний семинар по воздействию шума на морских млекопитающих Антарктики выявил необходимость в сборе более полной информации о численности и ареалах распространения животных и о способности животных слышать, а также в оценке эффективности методов смягчения воздействия [3]. В то время как в некоторых районах за уровнем шума окружающей среды в Антарктике ведётся тщательный мониторинг, в других районах необходимы базовые измерения [1]. Базовые измерения звукового ландшафта особенно важны, поскольку изменение климата приводит к значительным изменениям протяжённости морского льда, таянию ледников и отколу айсбергов – всё это влияет на звуковой ландшафт. Что касается воздействия шума, то, хотя краткосрочные воздействия на особей различных видов нами хорошо изучены, понимание кумулятивных и множественных факторов стресса и, в частности, воздействия на популяции и экосистему, практически отсутствует.

Потребности в управлении

Управление шумом требует междисциплинарного подхода, сочетающего понимание а) физики и техники (т. е. образования шума, вариантов технических изменений, методов измерения и мониторинга шума), б) геонауки (т. е. параметров окружающей среды, которые влияют на распространение звука, и разработки программы мониторинга и смягчения последствий); в) биологии и экологии (т. е. изучение попадающих под воздействие животных, их распространения, поведения и восприимчивости к воздействиям шума; рис.3; [34]). Для измерения и мониторинга шума и реакции животных необходимы стандарты (например, [35]).



Рисунок 3. Схема исследований и потребностей в управлении в конкретных дисциплинах, связанных с оценкой, мониторингом и смягчением воздействия шума.

В дальнейшем управление шумом требует подхода на международном уровне. В то время как в отдельных национальных юрисдикциях есть свои собственные руководящие принципы управления шумом (или их нет вообще), необходим согласованный на международном уровне подход, в частности, для мигрирующих животных, пересекающих сферы ответственности, и для регионов с международным присутствием, таких как Южный океан.

Выводы

- Антропогенная деятельность в Южном океане создаёт подводный шум: исследовательская деятельность (включая суда и морские сейсмические исследования), туризм и рыболовство.
- Судходство увеличивается из года в год; особенно резко увеличивается количество туристических судов.
- Морской шум может воздействовать на морскую микрофауну и мегафауну Антарктики, от зоопланктона до китов.
- Шум может изменить поведение животных, замаскировать их общение, затруднить восприятие ими окружающей среды, вытеснить животных из важных ареалов обитания, вызвать стрессовую реакцию, нарушить их жизненные функции (включая питание и размножение), уменьшить доступность кормовых объектов (путём воздействия на виды кормовых объектов), причинить непосредственный вред здоровью (в случае сильного воздействия шума) и, в конечном итоге, повлиять на их выживаемость.
- Было проведено очень мало исследований воздействия шума на Антарктику и виды представителей флоры и фауны Антарктик, поэтому управление шумом зачастую основывается на информации, полученной от неантарктических видов в других океанах. Применимость результатов требует исследования.

- Неизвестно, как воздействуют несколько факторов стресса и как они взаимодействуют. Например, делает ли изменение климата животных более или менее восприимчивыми к воздействиям шума?
- Разные стороны, подписавшие Договор об Антарктике, применяют разные подходы к оценке подводного шума, смягчению его потенциального воздействия и разрешению антропогенной деятельности, поэтому необходим более унифицированный подход.

References

1. Menze, S., Zitterbart, D.P., van Opzeeland, I., Boebel, O., The influence of sea ice, wind speed and marine mammals on Southern Ocean ambient sound. *Royal Society Open Science* **4**(1) (2017) doi:10.1098/rsos.160370.
2. Erbe, C., Dunlop, R., Jenner, K.C.S., Jenner, M.-N.M., McCauley, R.D., Parnum, I., Parsons, M., Rogers, T., Salgado-Kent, C., Review of underwater and in-air sounds emitted by Australian and Antarctic marine mammals. *Acoustics Australia* **45**, 179-241 (2017) doi:10.1007/s40857-017-0101-z.
3. Erbe, C., Dähne, M., Gordon, J., Herata, H., Houser, D.S., Koschinski, S., Leaper, R., McCauley, R., Miller, B., Müller, M., Murray, A., Oswald, J.N., Scholik-Schlomer, A.R., Schuster, M., van Opzeeland, I.C., Janik, V.M., Managing the effects of noise from ship traffic, seismic surveying and construction on marine mammals in Antarctica. *Frontiers in Marine Science* (2019) doi:10.3389/fmars.2019.00647.
4. Farcas, A., Thompson, P.M., Merchant, N.D., Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* **57**, 114-122 (2016) doi:10.1016/j.eiar.2015.11.012.
5. Erbe, C., Marley, S., Schoeman, R., Smith, J.N., Trigg, L., Embling, C.B., The effects of ship noise on marine mammals--A review. *Frontiers in Marine Science* **6**, 606 (2019) doi:10.3389/fmars.2019.00606.
6. Nieu Kirk, S., Mellinger, D., Moore, S., Klinck, K., Dziak, R., Goslin, J., Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999–2009. *The Journal of the Acoustical Society of America* **131**(2), 1102-1112 (2012) doi:10.1121/1.3672648.
7. Gavrillov, A., Li, B.: Antarctica as one of the major sources of noise in the ocean. Paper presented at the Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, 2nd International Conference and Exhibition, Heraklion, Crete, 25-29 June 2007
8. Gavrillov, A., Propagation of underwater noise from an offshore seismic survey in Australia to Antarctica: measurements and modelling. *Acoustics Australia* **46**(1), 143-149 (2018) doi:10.1007/s40857-018-0131-1.
9. McCauley, R.D., Day, R.D., Swadlow, K.M., Fitzgibbon, Q.P., Watson, R.A., Semmens, J.M., Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature Ecology & Evolution* **1**, 0195 (2017) doi:10.1038/s41559-017-0195.
10. Reichmuth, C., Sills, J.M., Mulsow, J., Ghoul, A., Long-term evidence of noise-induced permanent threshold shift in a harbor seal (*Phoca vitulina*). *The Journal of the Acoustical Society of America* **146**(4), 2552-2561 (2019) doi:10.1121/1.5129379.
11. Lockyer, C.: Growth and energy budgets of large baleen whales from the Southern Hemisphere. In: Advisory Committee on Marine Resources Research (ed.) *Mammals in the Seas*, vol. 3 - General Papers and Large Cetaceans. pp. 379-487. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy (1981)

12. Castellote, M., Clark, C., Lammers, M., Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation* **147**(1), 115-122 (2012) doi:10.1016/j.biocon.2011.12.021.
13. Parks, S.E., Clark, C.W., Tyack, P.L., Short- and long-term changes in right whale calling behavior: The potential effects of noise on acoustic communication. *The Journal of the Acoustical Society of America* **122**(6), 3725-3731 (2007) doi:10.1121/1.2799904.
14. Thode, A.M., Blackwell, S.B., Conrad, A.S., Kim, K.H., Marques, T., Thomas, L., Oedekoven, C.S., Harris, D., Bröker, K., Roaring and repetition: How bowhead whales adjust their call density and source level (Lombard effect) in the presence of natural and seismic airgun survey noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* **147**(3), 2061-2080 (2020) doi:10.1121/10.0000935.
15. Vazzana, M., Mauro, M., Ceraulo, M., Dioguardi, M., Papale, E., Mazzola, S., Arizza, V., Beltrame, F., Inguglia, L., Buscaino, G., Underwater high frequency noise: Biological responses in sea urchin *Arbacia lixula* (Linnaeus, 1758). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **242**, 110650 (2020) doi:10.1016/j.cbpa.2020.110650.
16. Kusku, H., Acoustic sound-induced stress response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to long-term underwater sound transmissions of urban and shipping noises. *Environmental Science and Pollution Research* (2020) doi:10.1007/s11356-020-09699-9.
17. Rolland, R.M., Parks, S.E., Hunt, K.E., Castellote, M., Corkeron, P.J., Nowacek, D.P., Wasser, S.K., Kraus, S.D., Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society of London: Series B Biological Sciences* **279**(1737), 2363-2368 (2012) doi:10.1098/rspb.2011.2429.
18. Przeslawski, R., Huang, Z., Anderson, J., Carroll, A.G., Edmunds, M., Hurt, L., Williams, S., Multiple field-based methods to assess the potential impacts of seismic surveys on scallops. *Marine Pollution Bulletin* **129**(2), 750-761 (2018) doi:10.1016/j.marpolbul.2017.10.066.
19. Peck, L.S., Webb, K.E., Bailey, D.M., Extreme sensitivity of biological function to temperature in Antarctic marine species. *Functional Ecology* **18**(5), 625-630 (2004) doi:10.1111/j.0269-8463.2004.00903.x.
20. Day, R.D., McCauley, R.D., Fitzgibbon, Q.P., Hartmann, K., Semmens, J.M., Exposure to seismic air gun signals causes physiological harm and alters behavior in the scallop *Pecten fumatus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**(40), E8537 (2017) doi:10.1073/pnas.1700564114.
21. Day, R.D., McCauley, R.D., Fitzgibbon, Q.P., Hartmann, K., Semmens, J.M., Seismic air guns damage rock lobster mechanosensory organs and impair righting reflex. *Proc Biol Sci* **286**(1907), 20191424 (2019) doi:10.1098/rspb.2019.1424.
22. Fewtrell, J.L., McCauley, R.D., Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Marine Pollution Bulletin* **64**(5), 984-993 (2012) doi:10.1016/j.marpolbul.2012.02.009.
23. Davidsen, J.G., Dong, H., Linné, M., Andersson, M.H., Piper, A., Prystay, T.S., Hvam, E.B., Thorstad, E.B., Whoriskey, F., Cooke, S.J., Sjursen, A.D., Rønning, L., Netland, T.C., Hawkins, A.D., Effects of sound exposure from a seismic airgun on heart rate, acceleration and depth use in free-swimming Atlantic cod and saithe. *Conservation Physiology* **7**(1) (2019) doi:10.1093/conphys/coz020.
24. Pichegru, L., Nyengera, R., McInnes, A.M., Pistorius, P., Avoidance of seismic survey activities by penguins. *Scientific Reports* **7**(1), 16305 (2017) doi:10.1038/s41598-017-16569-x.
25. Goldbogen, J.A., Southall, B.L., DeRuiter, S.L., Calambokidis, J., Friedlaender, A.S., Hazen, E.L., Falcone, E.A., Schorr, G.S., Douglas, A., Moretti, D.J., Kyburg, C., McKenna, M.F., Tyack, P.L., Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar. *Proceedings of the Royal Society, B* **280**(1765), 20130657 (2013) doi:10.1098/rspb.2013.0657.

26. Dunlop, R.A., McCauley, R.D., Noad, M.J., Ships and air guns reduce social interactions in humpback whales at greater ranges than other behavioral impacts. *Marine Pollution Bulletin* **154**, 111072 (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111072.
27. Miller, P.J.O., Antunes, R.N., Wensveen, P.J., Samarra, F.I.P., Alves, A.C., Tyack, P.L., Kvadsheim, P.H., Kleivane, L., Lam, F.-P.A., Ainslie, M.A., Thomas, L., Dose-response relationships for the onset of avoidance of sonar by free-ranging killer whales. *The Journal of the Acoustical Society of America* **135**(1), 975 (2014) doi:10.1121/1.4861346.
28. Williams, R., Erbe, C., Ashe, E., Beerman, A., Smith, J., Severity of killer whale behavioural responses to ship noise: A dose-response study. *Marine Pollution Bulletin* **79**, 254-260 (2014) doi:10.1016/j.marpolbul.2013.12.004.
29. Curé, C., Isojunno, S., Visser, F., Wensveen, P.J., Sivle, L.D., Kvadsheim, P.H., Lam, F.P.A., Miller, P.J.O., Biological significance of sperm whale responses to sonar: comparison with anti-predator responses. *Endangered Species Research* **31**, 89-102 (2016) doi:10.3354/esr00748.
30. Sills, J.M., Southall, B.L., Reichmuth, C., The influence of temporally varying noise from seismic air guns on the detection of underwater sounds by seals. *The Journal of the Acoustical Society of America* **141**(2), 996-1008 (2017) doi:10.1121/1.4976079.
31. Kastak, D., Schusterman, R.J., Southall, B.L., Reichmuth, C.J., Underwater temporary threshold shift induced by octave-band noise in three species of pinniped. *Journal of the Acoustical Society of America* **106**(2), 1142-1148 (1999)
32. Sills, J.M., Ruscher, B., Nichols, R., Southall, B.L., Reichmuth, C., Evaluating temporary threshold shift onset levels for impulsive noise in seals. *The Journal of the Acoustical Society of America* **148**(5), 2973-2986 (2020) doi:10.1121/10.0002649.
33. Costa, D.P., Crocker, D.E., Gedamke, J., Webb, P.M., Houser, D.S., Blackwell, S.B., Waples, D., Hayes, S.A., Le Boeuf, B.J., The effect of a low-frequency sound source (acoustic thermometry of the ocean climate) on the diving behavior of juvenile northern elephant seals, *Mirounga angustirostris*. *The Journal of the Acoustical Society of America* **113**(2), 1155-1165 (2003) doi:10.1121/1.1538248.
34. Przeslawski, R., Brooke, B., Carroll, A.G., Fellows, M., An integrated approach to assessing marine seismic impacts: Lessons learnt from the Gippsland Marine Environmental Monitoring project. *Ocean & Coastal Management* **160**, 117-123 (2018) doi:10.1016/j.ocecoaman.2018.04.011.
35. Carroll, A.G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., Bruce, B., A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Marine Pollution Bulletin* **114**(1), 9-24 (2017) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.11.038.

Источники

- Акустические записи морских млекопитающих Антарктики: <https://cmst.curtin.edu.au/research/marine-mammal-bioacoustics/>
- Открытие звука в море (DOSITS): <https://dosits.org/>
- Прослушивание окружающей среды в глубине океана (LIDO): <http://www.listentothedeep.com/>

Ключевые слова

Морской шум, судовой шум, сейсмические пневмопушки, биоакустическое воздействие, регулирование шума