© Луньков А. А., Беликов Р. А., Шатравин А. В., Чернецкий А. Д., Беликова Е. А., Кочетов О. Ю., Овчинников О. Б., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 2, С. 104–130

УДК 534.23; 534.836.2; 551.463.21; 591.5 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).7

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ПОДВОДНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО ШУМА ПРИ ПОГРУЖЕНИИ СВАЙ НА АКВАТОРИИ СОЛОВЕЦКОГО ЗАЛИВА В БЕЛОМ МОРЕ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМА И ЕГО ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А. А. Луньков[1,2], Р. А. Беликов[1], А. В. Шатравин[1], А. Д. Чернецкий[1], Е. А. Беликова[1], О. Ю. Кочетов[1], О. Б. Овчинников[1,3]

[1] Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: mirounga76@mail.ru;
[2] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38,
e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru;
[3] Акустический институт им. Н. Н. Андреева,
Россия, 117449, Москва, ул. Шверника, д. 4, e-mail: ovchi@akin.ru

В связи с началом строительства в пос. Соловецкий технологического и пассажирского причалов проведена оценка степени потенциального влияния подводного шума при погружении свай на морских млекопитающих. Построена первичная геоакустическая модель акватории Соловецкого залива, учитывающая неровности рельефа дна, но предполагающая однородность свойств дна. Методом широкоугольного параболического уравнения проведено численное моделирование распространения подводных шумов, генерируемых при погружении металлических свай с помощью вибропогружателя, а также выполнены дополнительные оценки уровня шума для гидравлического молота. Согласно результатам моделирования, проведенного с учетом неровностей рельефа дна, при использовании молота превышение опасного уровня в 160 дБ отн. 1 мкПа будет наблюдаться до расстояния около 1 км вдоль судового хода, а при вибропогружении – на расстоянии до 30 м от места установки сваи. Шум, превышающий уровень в 120 дБ отн. 1 мкПа, при котором возможны нарушения в поведении животных, мог распространяться до дистанции немного большей 1 км при вибропогружении и приблизительно до 16 км при забивке свай молотом. Условия, подходящие для распространения шума, наблюдаются только вдоль судового хода, в других направлениях распространение шума сильно затруднено ввиду наличия мелей и островов. Из-за больших потерь при распространении звука по мелководной акватории со сложной батиметрией, степень возможного влияния шума на морских млекопитающих при установке свай в грунт оценена как незначительная. Влияние шума на белух в Соловецком заливе при вибропогружении свай летом 2025 г., вероятно, отсутствовало. Воздействие на морских зайцев и кольчатых нерп было бы значительным, если бы использовался гидравлический молот; однако при вибропогружении свай, с учетом малочисленности тюленей в районе исследования и их возможной толерантности к антропогенному шуму, влияние оценено как незначительное. Показана важность учета локальных условий распространения шума и особенностей биологии и экологии различных видов морских млекопитающих для корректной оценки потенциального влияния на них антропогенного шума.

Ключевые слова: численное моделирование, распространение шума, антропогенное воздействие, строительный шум, забивка свай молотом, вибропогружение свай, белуха, кольчатая нерпа, морской заяц, Белое море

Введение

В настоящее время активно реализуются проекты по развитию береговой инфраструктуры в труднодоступных регионах Севера и Дальнего Востока Российской Федерации (Соловей и др., 2012; Таровик и др., 2022). Строительство гидротехнических сооружений, промышленная и транспортная активность на морском шельфе вызывают повышение уровня шума под водой, что может приводить к негативному воздействию на морскую биоту, начиная от слабых поведенческих реакций до летального исхода (Richardson et al., 1995). Подводный строительный шум, возникающий при проведении сваебойных работ (Nedwell, Howell, 2004; Wang et al., 2014; Dahl et al., 2015a; Herbert-Read et al., 2017; Branstetter et al., 2018; Guan, Miner, 2020; Rutenko et al., 2022; Huang L-F et al., 2023), нередко является одним из основных факторов влияния на морских млекопитающих в ходе строительства (Richardson et al., 1995; Huang L-F et al., 2023).

В 2025 г. в поселке Соловецкий на о. Соловецкий в Белом море началось строительство причальных сооружений, в частности – этап погружения свай в грунт для создания фундаментов технологического и пассажирского причалов. Подобные операции приводят к шумовому загрязнению звукового ландшафта акватории строительства (Nedwell, Howell, 2004; Dahl et al., 2015a; Herbert-Read et al., 2017; Branstetter et al., 2018; Guan, Miner, 2020; Huang L-F et al., 2023), что может оказать негативное воздействие (Richardson et al., 1995) на встречающихся в этом районе морских млекопитающих.

В водах Соловецкого архипелага летом обитает три вида морских млекопитающих: кольчатая нерпа (*Pusa hispida*), морской заяц (*Erignathus barbatus*) и белуха (*Delphinapterus leucas*). Все три вида встречаются в Соловецком заливе, на акватории которого ведется строительство причалов (Лукин и др., 2006; Чернецкий, 2021). Белухи ранее регистрировались в южной и северной части залива; при этом северная часть – «участок Варлаама» – рассматривалась как основная зона потенциального воздействия на белух при неблагоприятном сценарии распространения шума (Беликов и др., 2025). В 10 км от участка строительства, у м. Белужий о. Соловецкий, ежегодно формируется и активно функционирует с начала июня до середины августа соловецкое летнее прибрежное репродуктивное скопление (РС) белух. Соловецкое РС – уникальный природный феномен, имеющий важное значение для поддержания благополучия беломорской популяции белухи (Белькович и др., 2002; Chernetsky, Krasnova, 2018; Krasnova et al., 2020; Чернецкий, 2021).

С учетом близости одного из ключевых критических местообитаний беломорской белухи – соловецкого РС – и отсутствия точных данных о планируемых способах погружения свай, а также однозначных экспертных оценок степени возможного влияния шума, строительство причалов, исходя из предосторожного подхода, остро поставило вопрос о проведении оценки воздействия подводного строительного шума на белух за пределами РС – на участке строительства и прилегающей акватории Соловецкого залива (Беликов и др., 2025). Для этого был начат подводный акустический мониторинг (ПАМ) антропогенного шума и акустического присутствия белух, а также проведено предварительное численное моделирование распространения сваебойного шума по изучаемому району.

В настоящей работе, исходя из имеющейся информации о типе работ и параметрах среды распространения, выполняется детальное численное моделирование ожидаемых уровней шума в исследуемой акватории с учетом ее геоакустической модели для определения границ безопасных для морских млекопитающих зон (Richardson et al., 1995), где уровень строительного шума не превышает заданный порог в 120 дБ и 160 дБ. Приводятся шумовые характеристики звуков погружения свай вибропогружателем, полученные по литературным данным и в ходе экспериментальных записей, проведенных летом 2025 г. Строится трехмерная геоакустическая модель акватории с учетом сложной батиметрии в виде наличия мелей и небольших островов. Описывается методика и результаты численного моделирования, приводятся оценки границы безопасной зоны для белух и ластоногих в акватории Соловецкого залива. В заключении обсуждается степень возможного влияния шума погружения свай на морских млекопитающих, обитающих в районе исследования.

Моделирование распространения подводного шума при погружении свай по акватории Соловецкого залива

Характеристика шумового источника

Литературные данные. Характеристики шумового источника при погружении свай вибрационным способом содержатся в работе (Dahl et al., 2015b). Размеры рассмотренного в ней погружаемого объекта в наибольшей степени соответствуют тем сваям, которые используются при строительстве причала в Соловецком заливе. В указанной работе был экспериментально измерен шум при вибропогружении сваи длиной 17 м и диаметром 0.8 м при толщине водного слоя 7.5 м. Спектральные уровни шума представлены на рисунке 1. Размер сваи при строительстве причала в Соловецком заливе: длина – 25 м, диаметр – 1.0 м, при толщине водного слоя до 7 м.

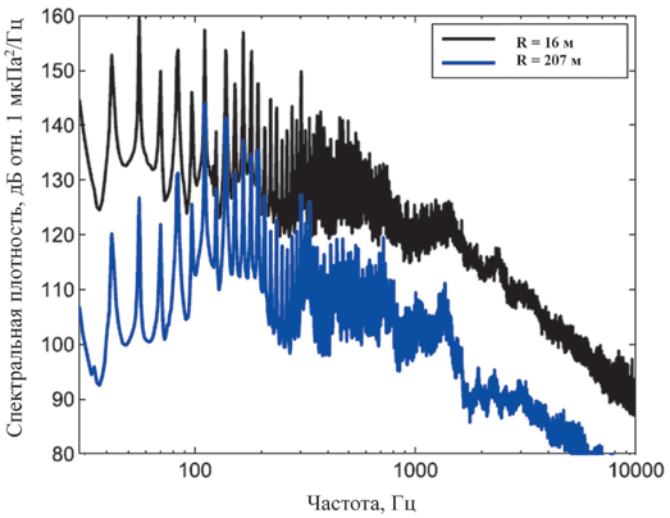


Рис. 1 – Спектральная плотность шума на расстоянии 16 м и 207 м от места вибропогружения сваи (Dahl et al., 2015b)

Важными с точки зрения биоакустики пороговыми уровнями звукового давления для непрерывного источника являются значения 120 дБ отн. 1 мкПа RMS, для импульсного – 160 дБ отн. 1 мкПа (Richardson et al., 1995; Southall et al., 2019).

Экспериментальные данные из Соловецкого залива. Записанные в ходе ПАМ и прямых натурных измерений шумы в процессе вибропогружения свай при строительстве причалов в пос. Соловецкий по своим характеристикам были близки к известным из литературы (Dahl et al., 2015b). На рисунке 2а представлен пример экспериментальной спектрограммы шума от погружения сваи вибрационным методом в Соловецком заливе летом 2025 г.; пример мгновенного спектра шума показан на рисунке 2в, а динамика уровня звукового давления *SPL* (sound pressure level) – на рисунке 2б. Можно отметить схожесть спектров на рисунке 1 и рисунке 2в – наличие выраженных пиков с фиксированным шагом по частоте, который равен обратному периоду ударов вибромолотом. Для работ в Соловецком заливе шаг по частоте составлял 11 Гц, период – 0.9 с.

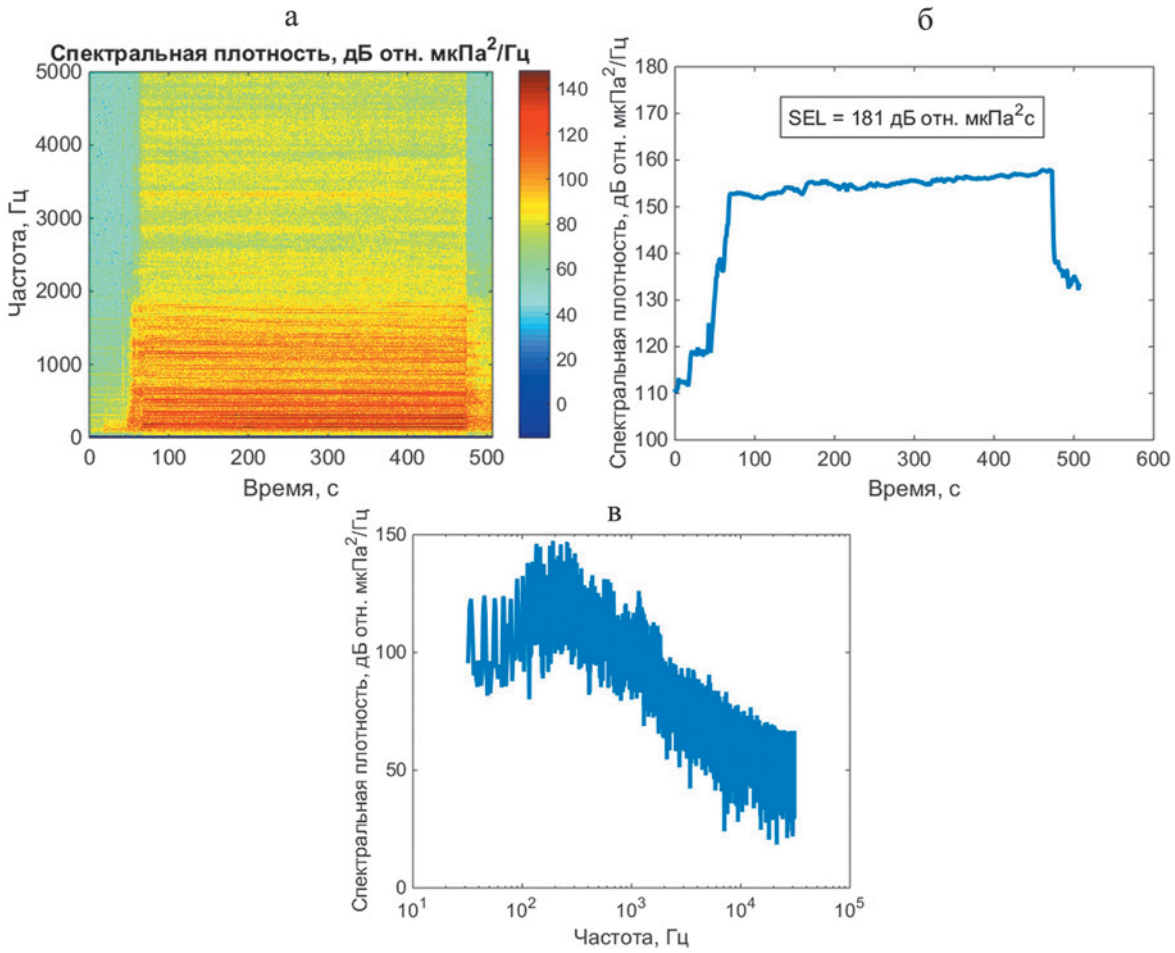


Рис. 2 – Подводный шум вибропогружения сваи в Соловецком заливе, записанный 1 августа 2025 г. на расстоянии 100 м от места погружения сваи: **а** – спектрограмма шума, **б** – динамика уровня звукового давления SPL с указанием значения SEL, **в** – мгновенный спектр шума

Геоакустическая модель Соловецкого залива

Батиметрия

Акватория Соловецкого залива в прибрежной области характеризуется сложным рельефом дна с обилием мелей и небольших островов (рисунок 3), которые препятствуют распространению звука в водном слое на большие расстояния. Место строительных работ отмечено красным кружком. Путем, по которому шум погружения свай может выходить в более глубокую часть залива, является судовой ход, средняя ширина которого составляет около 150 м при длине 2 км.

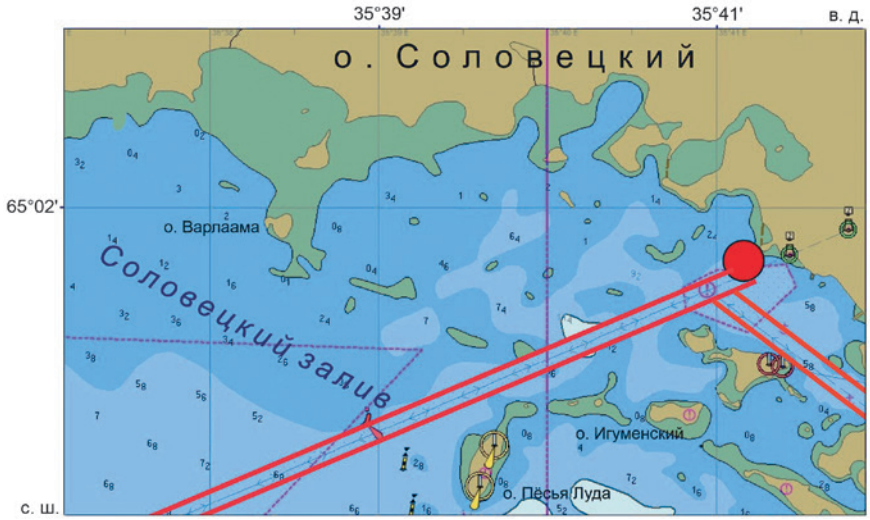


Рис. 3 – Карта батиметрии в Соловецком заливе. Красный круг – место установки свай. Бордовой линией отмечены границы судового хода. Цифрами отмечены значения глубины: целые – первое число, десятые – нижний индекс

Для проведения численного моделирования распространения шума в различных направлениях от места погружения свай была проведена оцифровка карты на рисунке 3 (автоматически найдены координаты каждой отметки глубины) и получена зависимость толщины водного слоя от горизонтальных координат в указанной области на равномерной сетке (рисунок 4).

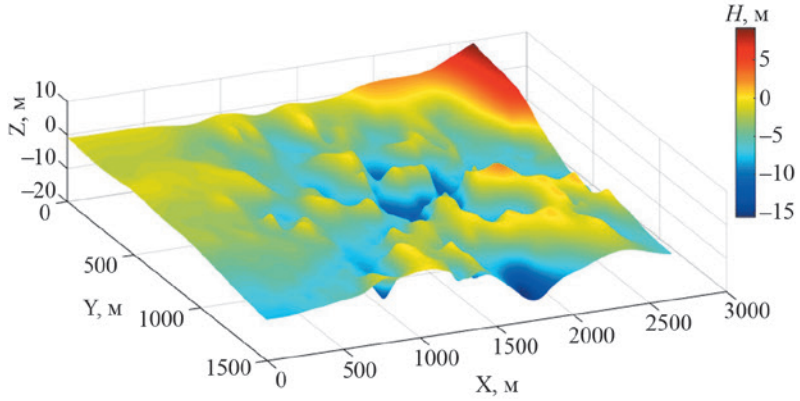


Рис. 4 – Результат оцифровки карты батиметрии, показанной на рисунке 3

Скорость звука в водном слое

Вода в мелководном Соловецком заливе хорошо перемешивается, поэтому температуру и соленость, а следовательно, и скорость звука в водном слое можно считать не зависящей от глубины и горизонтальных координат.

Были выбраны следующие значения физических параметров воды, характерных для теплого времени года (август–сентябрь):

• Температура 10 °C

• Соленость 28 ‰

Пользуясь формулой UNESCO (формула Чена-Миллеро-Ли) для заданных значений скорости звука и температуры, солености и глубины, было получено значение:

• Скорость звука c = 1481 м/с.

Плотность воды принималась равной ρ = 1000 кг/м$^{3.}$

Эффективные параметры дна

Информация об акустических параметрах дна в Соловецком заливе в литературе отсутствует. Однако некоторые выводы об акустических характеристиках его верхнего слоя в этой области можно сделать на основе геологических данных, согласно которым дно является каменистым.

В качестве первого приближения верхний слой дна акватории считался состоящим из моренных отложений, акустические характеристики которых (Jensen et al., 2011):

• Плотность ρ_b = 2100 кг/м$^{3;}$

• Скорость продольных волн c_l = 1950 м/с;

• Скорость поперечных волн c_t = 600 м/с;

• Коэффициент затухания продольных волн β_l = 0.4 дБ/λ,

• Коэффициент затухания поперечных волн β_t = 1 дБ/λ.

Предполагалось, что скорость звука и плотность линейно растут с глубиной. Значения акустических параметров дна на узловых глубинах приведены в таблице 1. Затухание 5 дБ/λ введено для исключения ложных отражений от нижней границы расчетной области.

Табл. 1 – Значения акустических параметров дна на узловых глубинах

Глубина, м	**ρ_b, кг/м^3**	**c_l, м/с**	**c_t, м/с**	**β_l, дБ/λ**	**β_t, дБ/λ**
0	2100	1950	600	0.4	1.0
50	2500	2000	650	0.5	1.0
400	3500	3000	650	5	5

Численное моделирование шумового поля

Для моделирования шума при вибропогружении свай использовался подход, описанный в работе (Dahl et al., 2015b). Погружаемая свая, как генератор шума, приближенно представлялась в виде точечного источника, находящегося в центре водного

слоя (рисунок 5). Глубина источника z_s задавалась равной 2.3 м. Представление сваи в виде суперпозиции точечных источников, распределенных по вертикали, не давало существенно отличающийся результат оценки шума.

Для расчетов выбиралась цилиндрическая система координат (r, φ, z), где z – вертикальная ось, направленная под углом 90° к поверхности воды, φ – азимутальный угол (в горизонтальной плоскости). Начало системы координат находилось на верхней границе водного слоя непосредственно в месте погружения сваи. Для вычисления амплитуды звукового поля $p(r, z, \varphi)$ в различных точках акватории использовалось приближение несвязанных азимутов (N×2D приближение), когда каждый вертикальный разрез (рисунок 5) рассчитывается независимо и не учитывается горизонтальная рефракция. Также предполагалось, что поле обратного рассеяния пренебрежимо мало по сравнению с прямым полем.

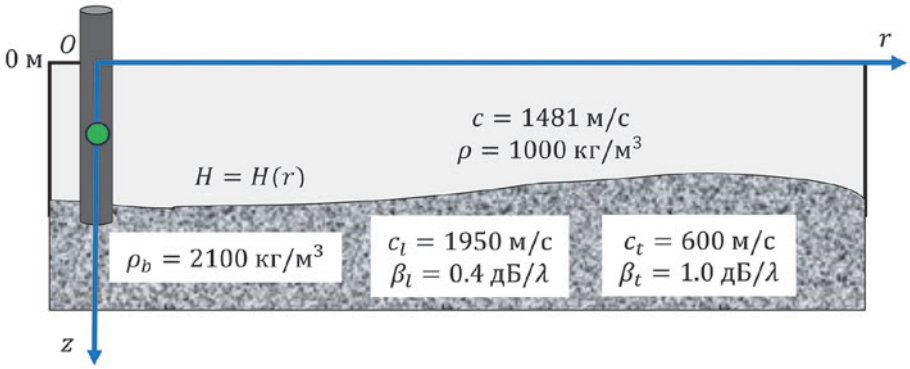


Рис. 5 – Схема вертикального разреза акустического волновода

В таблице 2 приведены характерные третьоктавные уровни шума при вибропогружении сваи. Для сравнения в таблице 3 приводятся аналогичные уровни, но в случае забивки свай молотом. Основная энергия шума (более 99 % при вибропогружении и более 85 % при забивке молотом) сосредоточена в полосе от 63 до 2000 Гц, поэтому вычисления выполнялись только для этого диапазона.

Табл. 2 – Третьоктавные уровни шума на расстоянии 16 м от места вибропогружения сваи

Частота, Гц	63	80	100	125	160	200	250	315
Уровень, дБ	145	153	156	158	158	158	152	151
Частота, Гц	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Уровень, дБ	148	151	149	147	145	145	144	141

Табл. 3 – Третьоктавные уровни шума на расстоянии 16 м от места забивки сваи молотом

Частота, Гц	63	80	100	125	160	200	250	315
Уровень, дБ	154	159	162	164	166	171	175	174
Частота, Гц	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Уровень, дБ	173	171	173	171	171	172	168	165

Метод широкоугольного параболического уравнения для расчета распространения звука в волноводе

Звуковое давление $p(r, z, \varphi; \omega_k)$ в волноводе на каждой центральной частоте третьоктавного диапазона ω_k рассчитывалось методом широкоугольного параболического уравнения с учетом продольной и сдвиговой упругости в дне. Этот метод реализован в программном коде RAMs (range-dependent acoustic model + shear waves) (Parabolic equation models, 2026). Следует отметить, что при расчетах с помощью программы RAMs помимо продольных волн автоматически учитываются сдвиговые волны в дне и поверхностные волны Шольте на границе вода–дно (виброакустические волны). Для работы программы RAMs требуется наличие водного слоя по всей трассе. В тех местах, где толщина водного слоя была менее 0.1 м или слой вовсе отсутствовал, вводился фиктивный водный слой толщиной 0.1 м (Rutenko et al., 2013).

На рисунке 6 показаны вертикальные разрезы поля звукового давления $p(r, z, \varphi; \omega_k)$ для двух частот вдоль одного из направлений. Уровень приведен в дБ, нормированных на значение поля на расстоянии 1 м от источника. Обращает на себя внимание результат на частоте 200 Гц: в области мели акустические волны могут проникать из водного слоя в дно и обратно, что обусловлено рефракцией звука в донной толще.

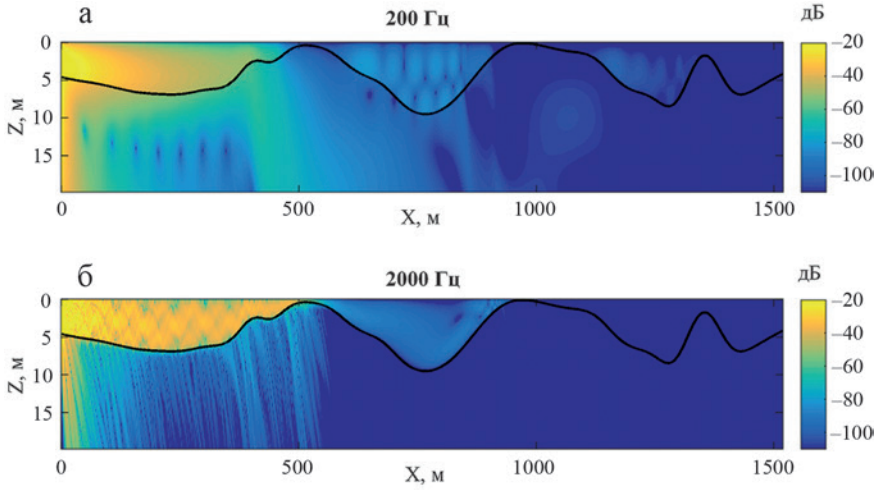


Рис. 6 – Вертикальные разрезы поля звукового давления на частоте 200 Гц (**а**) и 2000 Гц (**б**). Черной линией отмечена граница дна. Уровень приведен в дБ, нормированных на значение поля на расстоянии 1 м от источника

После вычисления $p(r, z, \varphi; \omega_k)$ проводилось усреднение квадрата модуля звукового давления по толщине водного слоя $H(r, \varphi)$ и результат представлялся в логарифмическом масштабе [дБ отн. 1 мкПа]:

$$SPL_k\left(r,\varphi\right)=10\lg\left(\frac{H\left(r,\varphi\right)^{-1}\int_0^{H(r,\varphi)}\left|p\left(r,z,\varphi;\omega_k\right)\right|^2 dz}{A_k\cdot 10^{-12}}\right).$$

Уровни $SPL_k(r, \varphi)$ дополнительно нормировались (вводились коэффициенты A_k), чтобы на заданном расстоянии r спектральный уровень шума соответствовал экспериментальным данным, приведенным в таблицах 2 и 3.

Суммарный уровень звукового давления *SPL* (sound pressure level) [дБ отн. 1 мкПа] во всей рассматриваемой частотной полосе находился как

$$SPL(r,\varphi) = 10\lg\left(\sum_{k=1}^{16} 10^{\frac{SPL_k(r,\varphi)}{10}}\right).$$

Модельные карты уровней шума в акватории Соловецкого залива

В рамках геоакустической модели акватории Соловецкого залива были выполнены расчеты и построены карты уровней звукового давления *SPL*(*r*, φ).

Вибропогружение сваи

Опасные уровни *SPL* выше 160 дБ достигаются только в непосредственной близости, до расстояния 30 м вокруг сваи (рисунок 7). Уровень 120 дБ, при котором возможно появление поведенческих реакций, наблюдается на максимальном удалении, немного превышающем 1 км вдоль судового хода. Вдоль других направлений беспрепятственное распространение звука невозможно, и этот уровень будет достигаться на существенно более близких расстояниях. Результаты, касающиеся судового хода, согласуются с результатами, полученными на этапе 2024 г. в рамках упрощенной модели, когда неоднородности рельефа дна не учитывались.

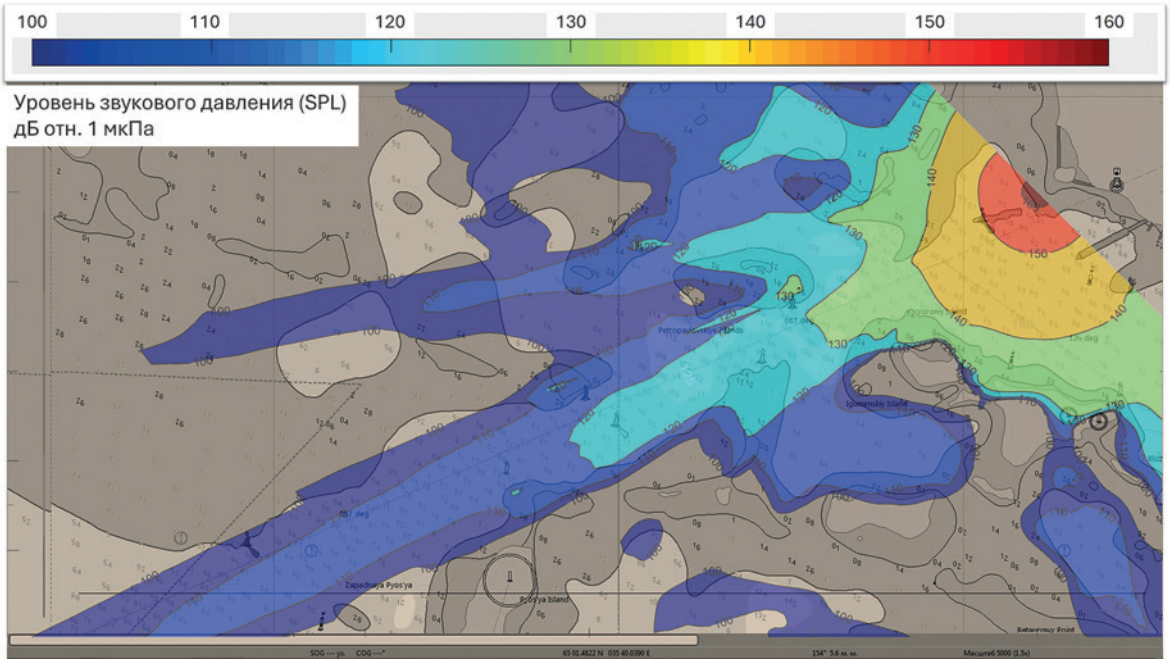


Рис. 7 – Карта уровней звукового давления *SPL* при вибропогружении сваи

Отметим также, что модельная оценка 178 дБ отн. 1 мкПа$^2\cdot$с уровня звукового воздействия *SEL* для точки на расстоянии 100 м в северо-западном направлении от места погружения удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением 181 дБ отн. 1 мкПа$^2\cdot$с указанным на рисунке 2б.

Забивка сваи молотом

На рисунке 8 можно видеть, что нормативный для забивки свай уровень *SPL* 160 дБ достигается на расстоянии около 900 м вдоль судового хода. Очевидно, что с точки зрения уровней звукового давления, вибропогружение свай является значительно более щадящим способом по сравнению с забивкой молотом.

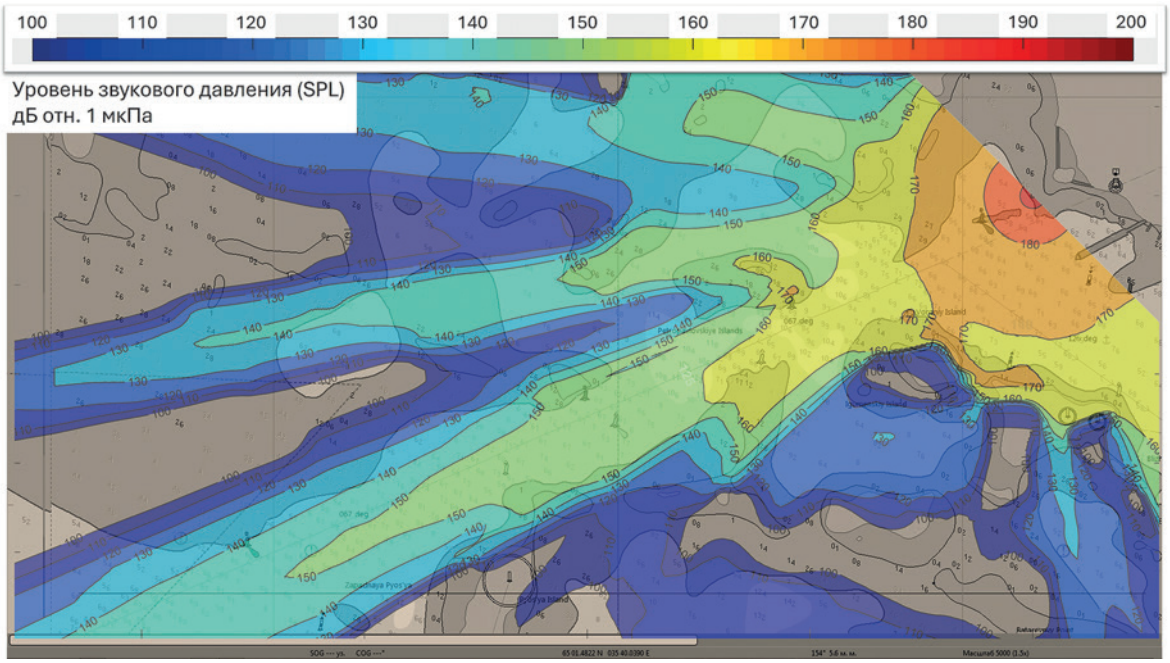


Рис. 8 – Карта уровней звукового давления *SPL* при забивке сваи молотом

Возможное проявление горизонтальной рефракции

При расчете уровней шума использовалось приближение несвязанных азимутов (*N*×2*D* приближение), когда не учитывается горизонтальная рефракция волн. Возможное влияние горизонтальной рефракции на получаемые уровни было изучено с использованием модовых параболических уравнений. Для этого была рассмотрена одна частотная составляющая поля – 1000 Гц. При глубинах в несколько метров можно считать, что звуковое поле в основном формировалось первой волноводной модой. Ее комплексная постоянная распространения $\xi_1 = q_1 + i\gamma_1/2$ зависела от горизонтальных координат (x, y), ввиду неоднородностей батиметрии. Амплитуда моды вычислялась исходя из дифференциального уравнения:

$$\Delta_{xy} A_1(x,y) + \xi_1^2(x,y) A_1(x,y) = 0.$$

Для получения решения это уравнение сводилось к параболическому путем учета рассеяния только вперед и использования аппроксимации Паде для оператора квадратного корня (Collins, 1994).

Сравним рассчитанную в горизонтальной плоскости амплитуду первой моды $A_1(x, y)$ (рисунок 9а) с результатом расчетов без учета горизонтальной рефракции (рисунок 9б). Сопоставляя эти рисунки, можно сделать вывод, что горизонтальная рефракция проявляется при распространении звука в судоходном канале в виде дополнительных флуктуаций уровня в среднем на ±5 дБ. Однако при усреднении в широком диапазоне частот, этот эффект нивелируется, что говорит об адекватности приближения несвязанных азимутов (N×2D приближение) при заданных условиях.

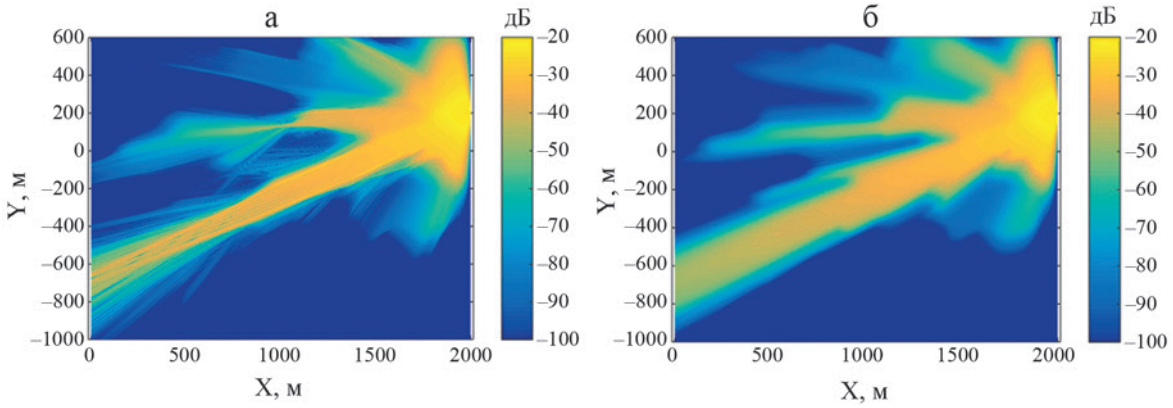


Рис. 9 – Амплитуда первой волноводной моды в дБ: **а** – с учетом горизонтальной рефракции; **б** – без учета горизонтальной рефракции

Оценка влияния шумов погружения свай на белух

Возможное косвенное воздействие строительства причалов на жизнедеятельность соловецкого репродуктивного скопления обусловило особую важность оценки влияния сваебойного шума на белух в водах Соловецкого залива.

Влияние шума сваебойного молота. Ближайший посещаемый белухами участок акватории (участок «Варлаама»), который мог бы, по предварительным экспертным оценкам (Беликов и др., 2025), быть подвержен влиянию подводного строительного шума, находится приблизительно в 2 км от строящихся причалов. Согласно результатам моделирования, при использовании сваебойного молота зона влияния шума с пороговым уровнем в 160 дБ отн. 1 мкПа, способным вызвать изменения в поведении, распространяется до 1 км вдоль судового хода. В других направлениях этот уровень достигается значительно раньше из-за наличия мелей и островов (Urick, 1983), благодаря чему образуется практически узконаправленная структура с распространением шума по большинству направлений на дистанции не более 350 м (рисунок 10). Акустическое загрязнение подобной, достаточно большой по площади, акватории могло бы привести к высокому риску возникновения негативных поведенческих реакций у белух (Richardson et al., 1995). Опасные уровни, ведущие к изменениям слуха и травмам

при забивке свай молотом, ограничены небольшой зоной с максимальной дальностью в несколько десятков метров вокруг сваи. Однако белухи, согласно имеющимся данным, в этих зонах – выше 160 дБ отн. 1 мкПа, не встречаются, что полностью исключает соответствующие риски.

С учетом повышенной чувствительности белух ряда популяций к антропогенному шуму, акустическое воздействие с уровнем более 120 дБ отн. 1 мкПа, возможно, способно вызвать у белух ответные поведенческие реакции. Шум, превышающий данный ненормативный для импульсных звуков порог в 120 дБ отн. 1 мкПа, охватывает гораздо большую по площади акваторию, имея характерную «многолучевую» структуру с наиболее дальним, около 16 км, распространением, ограниченным областью судового хода, севернее которого «лучи» либо не доходят до местообитания белух, либо заходят на него на незначительное расстояние (рисунок 10). Таким образом, даже при использовании наименее экологичного метода погружения свай – забивки молотом – и наиболее предосторожного порога в 120 дБ, воздействие шума на соловецких белух было бы маловероятным и ограничивалось редкими случаями изменения поведенческих реакций: скорости и направления движения, покидание акватории и т. п. Причем под влияние шума забивки свай белухи могли попасть, только зайдя в весьма узкую зону у южной границы участка «Варлаама», где расположены судовой ход и полоса акватории перед ним. Эта зона и без вклада строительного шума находится под сильным антропогенным прессом из-за частых проходов различных судов и, соответственно, сильной загрязненности судовым шумом (Беликов и др., 2025). Последний, вероятно, в отдельные моменты времени снижал бы воздействие сваебойного шума, маскируя его (Erbe et al., 2016).

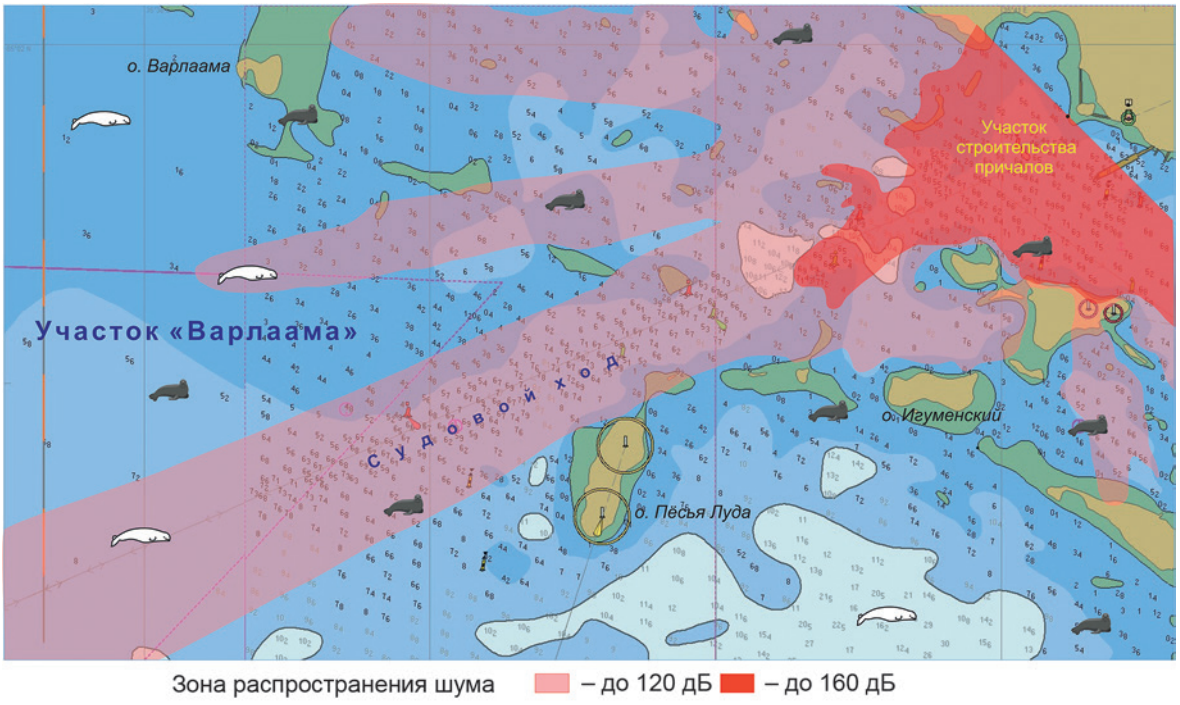


Рис. 10 – Карта распространения шума при забивке сваи молотом с уровнями звукового давления *SPL* до 120 и 160 дБ и распределение морских млекопитающих

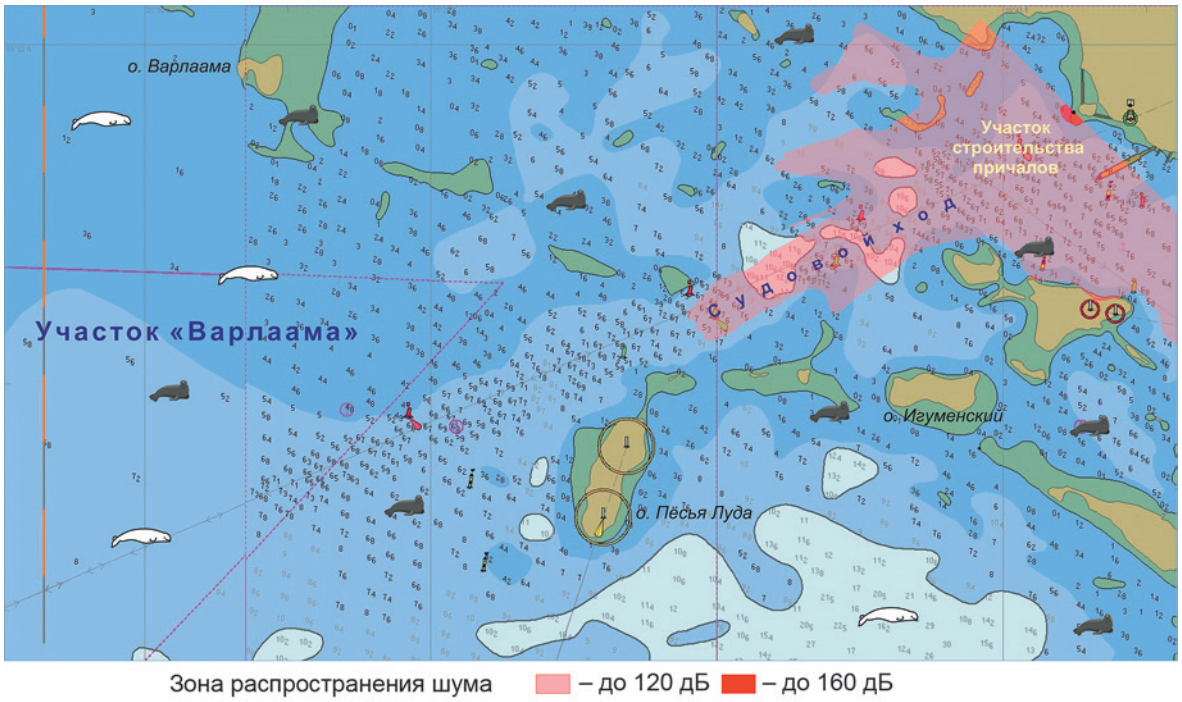


Рис. 11 – Карта распространения шума при вибропогружении сваи с уровнями звукового давления *SPL* до 120 и 160 дБ и распределение морских млекопитающих

Влияние шума вибропогружения свай. Подчеркнем, что погружение свай в грунт в период проводимого акустического мониторинга летом 2025 г. осуществлялось исключительно методом вибропогружения. Вибропогружение является щадящим по отношению к морским животным способом установки свай с точки зрения шумовых уровней: пиковые уровни шума при вибропогружении на десятки децибел ниже, чем при использовании молота. Согласно результатам моделирования, нормативный для непрерывных звуков уровень 120 дБ отн. 1 мкПа, при котором возможно появление поведенческих реакций, наблюдается на максимальном удалении, немного превышающем 1 км вдоль судового хода. Вдоль других направлений беспрепятственное распространение звука невозможно, и этот уровень будет достигаться на существенно более близких расстояниях (рисунок 11). Картина распространения шума вибропогружения по уровню в 120 дБ отн. 1 мкПа, напоминает таковую для шума молота при уровне в 160 дБ отн. 1 мкПа, характеризуясь при этом большей выраженностью и длиной отдельных «лучей». Несмотря на относительно небольшую дальность и неравномерность распространения шума по разным направлениям, акустическое загрязнение охватывает при вибропогружении достаточно большой участок акватории. Однако сила шумового воздействия в этом случае невелика и может привести только к изменениям в поведении животных. При этом относительно высокие уровни *SPL* – выше 160 дБ отн. 1 мкПа достигаются только в непосредственной близости от точки вибропогружения сваи – в радиусе до 30 м от нее. Опасные же уровни шума, способные вызвать изменения слуха и травмы при вибропогружении, отсутствуют. Таким образом, с учетом того, что белухи не посещают зону возможного воздействия виброшума – кутовую, наиболее

закрытую часть Соловецкого залива, где ведется строительство, можно констатировать отсутствие влияния шумов вибропогружения свай на соловецких белух в ходе строительства причалов летом 2025 г.

Влияние шумов погружения свай на ластоногих

В водах Соловецкого залива в летний период обитает два вида настоящих тюлений: кольчатая нерпа и морской заяц. Характер распределения этих ластоногих принципиально отличается от такового у белухи тем, что они регулярно встречаются во внутренней, граничащей с Бухтой Благополучия, части залива, т. е. на акватории, которая, согласно результатам моделирования, подвержена загрязнению шумом погружения свай (рисунки 10 и 11). Это обстоятельство делает возможное влияние шума при строительстве причалов на ластоногих намного более существенным, чем на белух.

Влияние шума сваебойного молота. Несмотря на большую разницу в площади подверженных шуму участков обитания, разница во влиянии шума молота на уровне 120 дБ отн. 1 мкПа на тюленей и белух, вероятно, относительно невелика. В зоне воздействия оказывается внешняя периферийная часть акватории к востоку от о. Варлаама (рисунок 10). Однако, с учетом небольшой силы воздействия (ниже нормативной для импульсных звуков), зашумление акватории подобной, относительно большой площади, вероятно, не является для тюленей значимым.

Иная ситуация связана с зоной, ограниченной нормативным уровнем в 160 дБ отн. 1 мкПа. Несмотря на неравномерность распространения, в зоне относительно сильного воздействия сваебойного шума, при использовании молота, оказывается акватория достаточно большой площади (рисунок 10), пребывание на которой может вызвать у животных негативные поведенческие реакции, а ее покидание требует определенного времени. По всей видимости, полноценная жизнедеятельность тюленей в этом районе во время строительства причалов была бы невозможна. Риски, связанные с воздействием на тюленей шума с высоким уровнем *SPL*, потребовали бы мер по минимизации воздействия: прежде всего, осуществления производственного экологического мониторинга, предполагающего проведение работ только при отсутствии животных в опасной зоне и остановку забивки свай при их появлении (Richardson et al., 1995). Помимо этого, необходимо было бы использовать дополнительные средства минимизации воздействия, такие как, например, процедура «мягкого старта» работы сваебойного молота.

Однако, несмотря на неблагоприятный прогноз, реакция тюленей может быть и менее выраженной. Соловецкие ластоногие хорошо адаптированы к различным видам антропогенного воздействия, включая шумовое загрязнение. Кроме того, известны случаи высокой толерантности тюленей других популяций к шуму погружения свай, когда животные могли плавать в непосредственной близости от места погружения (Blackwell et al., 2004). Тюлени высокомобильны и амфибийны (Kastak, Schusterman, 1998; Sills et al., 2015): могут временно покинуть район воздействия, переместиться за острова или мели, снизив уровень шума, поднять голову над водой (Kastelein et al., 2025), а также переместиться на берег (см. Richardson et al., 1995; Mikkelsen et al., 2019). Примечательно,

что наибольшее воздействие сваебойного шума наблюдалось бы в зоне, которая была сильно загрязнена акустически еще до начала строительства (Беликов и др., 2025). Однако импульсный шум при забивке свай молотом не только являлся бы для тюленей, вероятно, новым фактором воздействия, что могло бы усилить реакцию, но и отличался бы достаточно высокой интенсивностью, что делало бы его воздействие весьма опасным.

Влияние шума вибропогружения свай. Принимая во внимание высокую степень потенциального негативного воздействия шума сваебойного молота на соловецких тюленей, отрадно отметить, что при возведении причалов использовался исключительно метод вибропогружения свай. Высокие уровни шума – выше 160 дБ отн. 1 мкПа при вибропогружении охватывают крайне небольшую площадь, в радиусе 30 м (рисунок 11), сводя к минимуму возможность воздействия. Особенно, если учесть малую вероятность появления животных непосредственно на участке строительства, на акватории с изначально высокой фоновой антропогенной нагрузкой.

Зона распространения шума вибропогружения с уровнем в 120 дБ отн. 1 мкПа, способным вызвать поведенческие реакции, имеет относительно большую площадь, но она расположена во внутренней, наиболее подверженной антропогенному влиянию, части залива (рисунок 11). Причем, значительная часть этой зоны еще до начала строительства находилась под сильным антропогенным прессом, не связанным со строительством причалов; прежде всего, под влиянием судоходства и портовых работ. Поэтому загрязнение этой зоны шумом вибропогружения свай, вероятно, не оказывает на ластоногих существенного влияния. Неизвестны степень привязанности животных к этому району и точный характер его использования. Учитывая потенциально высокую степень толерантности соловецких тюленей к антропогенному беспокойству, возможность применения ими различных адаптационных стратегий по уменьшению влияния шума (Kastelein et al., 2025), их амфибийность (Kastak, Schusterman, 1998; Sills et al., 2015), а также относительно небольшой размер зоны влияния по сравнению с возможными размерами участков обитания, можно предположить, что шумы вибропогружения свай не оказывали летом 2025 г. на ластоногих существенного влияния. Особенно, если принимать во внимание отсутствие в данном районе критически важных для тюленей местообитаний и относительно низкую встречаемость и численность этих животных на исследуемой акватории.

Дополнительным фактором уменьшения влияния шумов при погружении свай при реализации проекта строительства причалов в п. Соловецкий являлась относительно низкая интенсивность проведения сваебойных работ. Использовался всего один самоходный кран с вибропогружателем. В графике работ возникали значительные перерывы. Все это обуславливало невысокую силу воздействия строительных шумов и их малую долю в бюджете времени. В ходе строительства отмечены встречи морских зайцев на расстоянии 200–300 м от свайного поля уже через сутки после окончания очередного этапа погружения свай.

Вибропогружение свай в грунт с твердыми включениями. Относительно низкая скорость возведения свайного поля причалов связана, во многом, со сложными условиями погружения свай в Соловецком заливе, обусловленными особенностями грунта

в месте строительства. В этой связи отдельно стоит отметить феномен значительного повышения уровня шума при вибропогружении свай в грунт, содержащий включения валунов, гравийного и галечного материала. Данное явление при проведении свайных работ на сложных грунтах (с твердыми включениями) может значительно менять уровень шумового загрязнения акватории, делая метод вибропогружения свай значительно менее, чем это приято считать, безопасным для морских млекопитающих, что требует особого внимания при планировании работ и проведении их экологического производственного мониторинга (Graham et al., 2017). Уровни звукового давления при столкновении с твердыми включениями могут повышаться на десятки децибел. Картина звукового влияния в плане распространения шума в этом случае должна больше напоминать таковую при использовании молота (Graham et al., 2017). При этом непрерывность шума вибропогружения с его высокой частотой вращения вибромолота делает уровень звукового воздействия, *SEL*, весьма высоким. Однако, подводный акустический мониторинг (ПАМ) района строительства свидетельствует об относительно низкой степени распространения данного феномена в ходе реализации работ по вибропогружению свай летом 2025 г.

Обсуждение

Точность результатов моделирования уровней шума определяется с одной стороны самой расчетной схемой, с другой стороны – теми параметрами среды, которые вводятся в модель. Наибольшая неопределенность связана с выбором параметров дна и их пространственной изменчивостью, поэтому предложенную геоакустическую модель Соловецкого залива стоит считать предварительной. В то же время в этой модели параметры среды выбирались насколько это возможно соответствующими рассматриваемой акватории. Карта глубин задавалась в отдельных точках с точностью до десятой доли метра, потом проводилась интерполяция этих данных. Именно особенности рельефа дна обуславливают сильные пространственные вариации уровня шума. Параметры дна брались, исходя из геологического строения и состава верхнего слоя грунта, однако их пространственная изменчивость не учитывалась ввиду отсутствия таких данных. Оценка точности параметров геоакустической модели может быть проведена путем сравнения модельных расчетов с экспериментальными данными. Для этого на следующем этапе работы планируется запись шума от вибропогружения свай вдоль всего судоходного канала.

Важность проводимого исследования обусловлена относительной близостью к месту строительства уникального природного объекта – соловецкого репродуктивного скопления белух (Белькович и др., 2002; Chernetsky, Krasnova, 2018; Krasnova et al., 2020; Чернецкий, 2021). Дистанция до скопления по прямой порядка 10 км, его экранирование береговой линией о. Соловецкий, а также мелководность и сложная батиметрия прибрежной акватории, делают прямое воздействия шума погружения свай при строительстве причалов на соловецкое репродуктивное скопление белух невозможным. Тем не менее, шум при погружении свай, особенно при интенсивном использовании сваебойного молота, считается одним из главных факторов воздействия на морских

млекопитающих при реализации строительных проектов, связанных с береговой инфраструктурой (Nedwell, Howell, 2004; Richardson et al., 1995; Herbert-Read et al., 2017; Branstetter et al., 2018; Guan, Miner, 2020; Huang L-F et al., 2023). Известно множество случаев распространения шумов при забивке свай на многие километры или даже первые десятки километров. В таких ситуациях шум обычно распространяется по открытым акваториям с достаточной глубиной и относительно плоским дном. Интересно, что и при исследовании белух наблюдались случаи дальнего распространения шума при забивке свай на дистанциях, по крайней мере, в 6 км и 18 км, на которых белухи могли слышать эти шумы, а вероятные зоны физиологического воздействия и поведенческого беспокойства имели значительные радиусы (Širovic, Kendall, 2009; Castellote et al., 2019).

Высокая чувствительность белух ряда популяций к антропогенному шуму (Finley et al., 1990; Cosens, Dueck, 1993; Martin et al., 2023a), возможность воспринимать звуки низкой частоты (Awbrey et al., 1988; Johnson et al., 1989), отрицательная реакция на строительный и сваебойный шум (Cornick et al, 2011; Kendall et al., 2013; Kendall, Cornick, 2015), наряду с плохой предсказуемостью ответной реакции соловецких животных к новому фактору антропогенного воздействия (Беликов и др., 2025), потребовали проведения специальных исследований, направленных на минимизацию потенциального косвенного влияния строительного шума на функционирование соловецкого репродуктивного скопления белух. Действительно, при других условиях распространения под воздействием сваебойного шума могла оказаться значительная площадь акватории Соловецкого залива, прежде всего, его северная часть – участок «Варлаама», который до начала строительства рассматривался, как основная зона потенциального воздействия шума на белух (Беликов и др., 2025). Однако численное моделирование и прямые измерения в ходе пассивного акустического мониторинга, по всей видимости, свидетельствуют об отсутствии влияния шумов погружения свай на соловецких белух в летнем сезоне 2025 г.

Настоящие тюлени обладают хорошо развитым амфибийным слухом (Kastak, Schusterman, 1998; Sills et al., 2015), приспособленным для восприятия звука в двух средах – на воздухе и в воде. Несмотря на то, что максимумы чувствительности слуха тюленей, особенно в водной среде, находятся на более высоких частотах (Sills et al., 2015; Sills et al., 2020), чем максимумы энергии сваебойных шумов, тюлени способны воспринимать звуки на достаточно низких частотах (Kastak, Schusterman, 1998; Ruser et al., 2025), что делает их, вкупе с прибрежным образом жизни, весьма уязвимыми к влиянию антропогенного шума (Prawirasasraa et al., 2022; Martin et al., 2023b), включая шум при погружении свай (Russell et al., 2016). Однако, в ряде случаев тюлени, обитающие в районах с высокой хозяйственной активностью, демонстрировали высокую толерантность к техногенному шуму, в том числе к строительному и сваебойному (Moulton et al., 2003; Blackwell et al., 2004). Кольчатые нерпы и морские зайцы, обитающие в водах Соловецкого архипелага, вероятно, достаточно хорошо адаптированы к антропогенным шумам, что может значительно снизить их реакцию на шум при возведении свайного поля причалов.

Заключение

Вибропогружение является щадящим по отношению к морским животным способом установки свай с точки зрения шумовых уровней. Результаты численного моделирования методом широкоугольного параболического уравнения (RAMs) для первичной геоакустической модели Соловецкого залива с учетом неровностей рельефа дна показали, что уровень шума *SPL* от установки свай методом вибропогружения сравнивается с нормативным для непрерывных звуков уровнем, вызывающим изменения в поведении – 120 дБ отн. 1 мкПа уже на расстоянии немного большем 1 км вдоль судового хода. В других направлениях этот уровень достигается значительно раньше из-за наличия мелей и островов. Превышение уровня 160 дБ отн. 1 мкПа при вибропогружении возможно только на расстоянии до 30 м от места установки. В то же время нужно отметить, что при использовании гидравлического молота пиковые уровни шума возрастают на десятки децибел. Превышение уровня в 160 дБ отн. 1 мкПа будет наблюдаться до расстояния около 1 км, т. е. до середины судового хода, однако для импульсных звуков превышение данного порога не столь критично, т. к. оно способно вызвать только изменения в поведении животных.

Степень влияния строительного шума на белух и тюленей сильно отличается, что связано с характером их распределения на исследуемой акватории. Участки обитания белух, даже при наиболее неблагоприятном сценарии – при использовании молота, находятся, преимущественно, за пределами влияния шума погружения свай. Они перекрываются с зоной возможного поведенческого беспокойства лишь при использовании заниженного, предосторожного для импульсного звука порога в 120 дБ и только в узкой полосе вдоль судового хода на юге участка «Варлаама». При вибропогружении свай, согласно общепринятым порогам, влияние шума на соловецких белух летом 2025 г. должно было отсутствовать.

Влияние строительного шума на соловецких тюленей существенно сильнее, однако также, вероятно, ограничивается лишь возможными изменениями в поведении животных. При использовании вибропогружателя опасное с точки зрения физиологических реакций и травм воздействие шума на тюленей невозможно, из-за низкого уровня излучения, характерного для данного метода. При использовании молота опасная зона, пребывание в которой могло вызвать физиологические реакции у тюленей, также была бы ограничена небольшой площадью, которую животные могли легко покинуть. Тем не менее, возможные риски потребовали бы при использовании молота мер по минимизации негативного воздействия. При обоих рассматриваемых методах погружения свай тюлени могли страдать от вызванных шумом поведенческих нарушений. Однако, низкая встречаемость, отсутствие важных местообитаний в зоне воздействия, возможная адаптированность тюленей к антропогенным звукам, а также высокая степень акустического загрязнения акватории до начала строительства, вероятно, могли значительно снизить потенциальное влияние строительных шумов на соловецких ластоногих.

Таким образом, тяжелые локальные условия распространения строительного шума на мелководье со сложной батиметрией, вкупе с характером распределения и

встречаемости морских млекопитающих на акватории Соловецкого залива, а также применение щадящего метода вибропогружения, обусловили низкую, особенно для белух, степень воздействия сваебойных шумов на морских млекопитающих летом 2025 г. Примечательно, что, если бы строительство проходило в другом районе, например, – на юго-восточном берегу пос. Соловецкий, степень влияния была бы существенно больше из-за беспрепятственного распространения шума по открытой, относительно глубоководной акватории, на которой регулярно встречаются белухи, вероятно, использующие это местообитание как кормовые участки. Это говорит о большой важности учета локальных условий при оценке потенциального влияния строительства на морских млекопитающих.

Отсутствие влияния на соловецких белух строительного шума при возведении свайных полей причалов не исключает возможности влияния на них других факторов, связанных с реализацией строительных работ: таких, как увеличение трафика грузовых крупно- и среднетоннажных судов, времени их пребывания на рейде, загрязненности звуковых ландшафтов судовым шумом, свал грунта при дноуглублении и др. Но в настоящий момент гораздо бо́льшую тревогу вызывает не потенциальное влияние строительства причалов на белух, встречающихся в Соловецком заливе и прилегающей акватории, а все возрастающий антропогенный прессинг на белух в их сезонном критическом местообитании – летнем репродуктивном скоплении у м. Белужий о. Соловецкий. Высокий уровень воздействия, его постоянный рост, появление новых факторов антропогенного влияния на скопление белух требуют придания данной акватории особого природоохранного статуса с принятием соответствующих мер по регламентации и регулированию его посещения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки России № FMWE 2024-0031.

Список литературы

1. *Беликов Р. А., Краснова В. В., Шатравин А. В., Панова Е. М., Чернецкий А. Д., Белякова Е. А., Крюкова Н. В., Таганова М. М., Гебрук А. В.* Результаты исследований белух *Delphinapterus leucas* в водах Соловецкого архипелага и оценка звуковых ландшафтов их местообитаний в летнем сезоне 2024 г. // Океанологические исследования. 2025. Т. 53. № 1. С. 87–118. EDN: OOMRNX. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).5
2. *Белькович В. М., Чернецкий А. Д., Кириллова О. И.* Биология белух *(Delphinapterus leucas)* южной части Белого моря // Морские млекопитающие (результаты исследований, проведенных в 1995 – 1998 гг.). М., 2002. С. 53–78.
3. *Лукин Л. Р., Огнетов Г. Н., Бойко Н. С.* Экология кольчатой нерпы в Белом море. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 164, [1] с.: ил., табл., цв. ил. ISBN 5-7691-1700-1. EDN: OTXXMP
4. *Соловей Н. А., Жигульский В. А., Княженко Е. В.* Экологические аспекты оценки и нормирования шума при проектировании портов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 152. EDN: OXCEGP
5. *Таровик В. И., Савченко О. В., Кутаева Н. Г.* Техногенный подводный шум как фактор экологической безопасности морской транспортной и промышленной деятельности в Арктике // Арктика экология и экономика. 2022. Т. 12. № 1. С. 99–110. EDN: ACBNEN. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-99-110

6. *Чернецкий А. Д.* Соловецкое репродуктивное скопление как структура единица беломорской популяции белухи *(Delphinapterus leucas)*. Диссертация на соискание ученой степени канд. биолог. наук 1.5.16. М.: ИО РАН, 2021. 137 с. EDN: IWWEZY
7. *Awbrey F. T., Thomas J. A., Kastelein R. A.* Low-frequency underwater hearing sensitivity in belugas, *Delphinapterus leucas* // The Journal of the Acoustical Society of America. 1988. Vol. 84. P. 2273–2275. https://doi.org/10.1121/1.397022
8. *Blackwell S. B., Lawson J. W., Williams M. T.* Tolerance by ringed seals *(Phoca hispida)* to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island // The Journal of the Acoustical Society of America. 2004. Vol. 115. Iss. 5. P. 2346–2357. https://doi.org/10.1121/1.1701899
9. *Branstetter B. K., Bowman V. F., Houser D. S., Tormey M., Banks P., Finneran J. J., Jenkins K.* Effects of vibratory pile driver noise on echolocation and vigilance in bottlenose dolphins *(Tursiops truncatus)* // The Journal of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 143. Iss. 1. P. 429–439. EDN: LFBLXG. https://doi.org/10.1121/1.5021555
10. *Castellote M., Thayre B., Mahoney M., Mondragon J., Lammers M. O., Small R. J.* Anthropogenic noise and the endangered Cook Inlet beluga whale, *Delphinapterus leucas*: Acoustic considerations for management // Marine Fisheries Review. 2019. Vol. 80. Iss. 3. P. 63–88. https://doi.org/10.7755/MFR.80.3.3
11. *Chernetsky A. D., Krasnova V. V.* The structure of the reproductive gathering of beluga whales, *Delphinapterus leucas* (Pallas, 1776), off Solovetsky Island (White Sea) as inferred from results of photo identification in 2007–2013 // Russian Journal of Marine Biology. 2018. Vol. 44. No. 5. P. 394–403. EDN: EETLYX. https://doi.org/10.1134/S1063074018050048
12. *Collins M. D.* Generalization of the split-step Padé solution // The Journal of the Acoustical Society of America. 1994. Vol. 96. No. 1. P. 382–385. https://doi.org/10.1121/1.410488
13. *Cornick L., Love S., Pinney L., Smith C., Zartler Z.* Distribution, habitat use and behavior of Cook Inlet beluga whales and other marine mammals at the Port of Anchorage marine terminal redevelopment project, June–November 2011 // Sci. Mar. Mammal Monitoring Prog. 2011. Annual Rep. Alaska Pacific Univ., Dep. Environ. Sci. 55 p. (Avail. online at https://alaskafisheries.noaa.gov/sites/default/files/2011poammannualrpt.pdf)
14. *Cosens S. E., Dueck L. P.* Icebreaker noise in Lancaster Sound, NWT, Canada: Implications for marine mammal behavior // Marine Mammal Science. 1993. Vol. 9. Iss. 3. P. 285–300. https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1993.tb00456.x
15. *Dahl P. H., de Jong C. A. F., Popper A. N.* The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life // Acous. Today. 2015a. Vol. 11. Iss. 2. P. 18–25.
16. *Dahl P. H., Dall'Osto D. R., Farrell D. M.* The underwater sound field from vibratory pile driving // The Journal of the Acoustical Society of America. 2015b. Vol. 137. Iss. 6. P. 3544–3554. https://doi.org/10.1121/1.4921288
17. *Erbe C., Reichmuth C., Cunningham K., Lucke K., Dooling R.* Communication masking in marine mammals: A review and research strategy // Marine Pollution Bulletin. 2016. Vol. 103. No. 1–2. P. 15–38. EDN: WPVZTH. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.007
18. *Finley K. J.* Reactions of Beluga *(Delphinapterus leucas)* and narwhals *(Monodon monoceros)* to ice-breaking ships in the Canadian High Artic // Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences. 1990. Vol. 224. P. 97–117. https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/119072.pdf
19. *Graham I. M., Pirotta E., Merchant N. D., Farcas A., Barton T. R., Cheney B., Hastie G. D., and Thompson P. M.* Responses of bottlenose dolphins and harbor porpoises to impact and vibration piling noise during harbor construction // Ecosphere. 2017. Vol. 8. Iss. 5. P. e01793. https://doi.org/10.1002/ecs2.1793
20. *Guan S., Miner R.* Underwater noise characterization of down-the-hole pile driving activities off Biorka island, Alaska // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 160. Iss. 4. Art. 111664. EDN: KLIWZI. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111664

21. *Herbert-Read J. E., Kremer L., Bruintjes R., Radford A. N., Ioannou C. C.* Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals // Proceedings of the Royal Society B. 2017. Vol. 284. Iss. 1863. P. 20171627. https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1627
22. *Huang L-F., Xu X-M., Yang L-L., Huang S-Q., Zhang X-H., Zhou Y-L.* Underwater noise characteristics of offshore exploratory drilling and its impact on marine mammals // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. P. 1097701. EDN: LBELGW. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1097701
23. *Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H.* Computational Ocean acoustics. New York: Springer, 2011. 794 p. [Таблица 1.3 на стр. 39]. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-8678-8
24. *Johnson C. S., McManus M. W., Skaar D.* Masked tonal hearing thresholds in the beluga whale // The Journal of the Acoustical Society of America. 1989. Vol. 85. Iss. 6. P. 2651–2654. https://doi.org/10.1121/1.397759
25. *Kastak D., Schusterman R. J.* Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: Methods, measurements, noise, and ecology // Journal of the Acoustal Society of America. 1998. Vol. 103. Iss. 4. P. 2216–2228. EDN: YCQFCH. https://doi.org/10.1121/1.421367
26. *Kastelein R. A., Helder-Hoek L., Van Acoleyen L., Terhune J. M., Van Renterghem T., Botteldooren D.* By lifting their heads above water, harbor seals (*Phoca vitulina*) can reduce their exposure to ynderwater sounds below 8 kHz // Aquatic Mammals. 2025. Vol. 51. Iss. 6. P. 421–437. EDN: TCUMXV. https://doi.org/10.1578/am.51.6.2025.421
27. *Kendall L. S., Cornick L. A.* Behavior and distribution of Cook Inlet beluga whales, *Delphinapterus leucas*, before and during pile driving activity // Marine Fisheries Review. 2015. Vol. 77. Iss. 2. P. 106–114. https://doi.org/10.7755/MFR.77.2.6
28. *Kendall L. S., Širovic A., Roth E. H.* Effects of construction noise on the Cook Inlet beluga whale (Delphinapterus leucas) vocal behavior // Canadian Acoustics. 2013. Vol. 41. Iss. 3. P. 1–13. EDN: SONVWV
29. *Krasnova V. V., Prasolova E. A., Belikov R. A., Chernetsky A. D., Panova E. M.* Influence of boat tourism on the behaviour of Solovetskiy beluga whales *(Delphinapterus leucas)* in Onega Bay, the White Sea // Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. 2020. Vol. 30. Iss. 10. P. 1922–1933. EDN: NOZKKP. https://doi.org/10.1002/aqc.3369
30. *Martin M. J., Halliday W. D., Storrie L., Citta J. J., Dawson J., Hussey N. E., Juanes F., Loseto L. L., MacPhee S. A., Moore L., Nicoll A., O'Corry-Crowe G., Insley S. J.* Exposure and behavioral responses of tagged beluga whales *(Delphinapterus leucas)* to ships in the Pacific Arctic // Marine Mammal Science. 2023a. Vol. 39. Iss. 2. P. 387–421. EDN: EVALSA. https://doi.org/10.1111/mms.12978
31. *Martin M., Gridley T., Elwen S., Charrier I.* Inter-site variability in the Cape fur seal's behavioural response to boat noise exposure // Marine Pollution Bulletin. 2023b. Vol. 196. P. 115589. EDN: VTTKJH. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115589
32. *Mikkelsen L., Johnson M., Wisniewska D. M., van Neer A., Siebert U., Madsen P. T., Teilmann J.* Long-term sound and movement recording tags to study natural behavior and reaction to ship noise of seals // Ecology and Evolution. 2019. Vol. 9. Iss. 5. P. 2588–2601. EDN: WOLITZ. https://doi.org/10.1002/ece3.4923
33. *Moulton V. D., Richardson W. J., Williams M. T., Blackwell S. B.* Ringed seal densities and noise near an icebound artificial island with construction and drilling // ARLO. 2003. Vol. 4. Iss. 4. P. 112–117. https://doi.org/10.1121/1.1605091
34. *Nedwell J., Howell D.* A review of offshore windfarm related underwater noise sources // Cowrie Report. 2004. No. 544. 57 p. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Nedwell-Howell-2004.pdf
35. Parabolic equation models – https://oalib-acoustics.org/website_resources/PE/archive/ (дата обращения 15.01.2026).

36. *Prawirasasraa M. S., Jüssib M., Mustonena M., Klausona A.* Underwater noise impact of a ferry route on dive patterns of transiting Baltic ringed seals // Estonian Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 71. Iss. 4. P. 201–213. EDN: OEIWCU. https://doi.org/10.3176/earth.2022.14
37. *Richardson W. J., Greene C. R., Malme Jr. C. I., Thomson D. H.* Marine Mammals and Noise. San Diego: Academic Press, 1995. 576 p. EDN: YHLOTO. https://doi.org/10.1016/C2009-0-02253-3
38. *Ruser A., Anderson Hansen K., Wahlberg M., Schaffeld T., Siebert U.* Underwater audiogram of the grey seal (Halichoerus grypus) // Biology Open. 2025. Vol. 14. Iss. 8. P. bio062059. EDN: JUAWKF. https://doi.org/10.1242/bio.062059
39. *Russell D. J. F., Hastie G. D., Thompson D., Janik V. M., Hammond P. S., Scott-Hayward L. A. S., Matthiopoulos J., Jones E. L., McConnell B. J.* Avoidance of wind farms by harbour seals is limited to pile driving activities // Journal of Applied Ecology. 2016. Vol. 53. Iss. 6. P. 1642–1652. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12678
40. *Rutenko A. N., Manul'chev D. S., Solov'ev A. A.* Study of low-frequency-acoustic-and seismic-wave energy propagation on the shelf // Acoustical Physics. 2013. Vol. 59. Iss. 3. P. 319–332. EDN: RFHERJ. https://doi.org/10.1134/S1063771013030111
41. *Rutenko A. N., Zykov M. M., Gritsenko V. A., Fershalov M. Yu., Jenkerson M. R., Manulchev D. S., Racca R., Nechayuk V. E.* Acoustic monitoring and analyses of air gun, pile driving, vessel, and ambient sounds during the 2015 seismic surveys on the Sakhalin shelf // Environmental Monitoring and Assessment. 2022. Vol. 194 (Suppl 1). No. 744. EDN: JMTUPO. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10021-y
42. *Sills J. M., Southall B. L. and Reichmuth C.* Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // Journal of Experimental Biology. 2015. Vol. 218. Iss. 14. P. 2250–2259. https://doi.org/10.1242/jeb.120972
43. *Sills J. M., Reichmuth C., Southall B. L., Whiting A., Goodwin J.* Auditory biology of bearded seals (*Erignathus barbatus*) // Polar Biology. 2020. Vol. 43. P. 1681–1691. EDN: SIGGRI. https://doi.org/10.1007/s00300-020-02736-w
44. *Širovic A., Kendall L. S.* Passive acoustic monitoring of Cook Inlet beluga whales // Analysis report. Prep. by AK Pacific University for Port of Anchorage. Dec. 2009. 73 p. (avail. online at www.nmfs.noaa.gov/pr/pdfs/permits/poa_acoustic_report.pdf).
45. *Southall B. L. Finneran J. J., Reichmuth C., Nachtigall P. E., Ketten D. R., Bowles A. E., Ellison W. T., Nowacek D. P., Tyack P. L.* Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects // Aquatic Mammals. 2019. Vol. 45. Iss. 2. P. 125–232. EDN: KCKPFI. https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125
46. *Urick R. J.* Principles of underwater sound. 3rd edition. Los Atlos, California: Peninsula Publising. 1983. 423 p. https://inquietlq.firebaseapp.com/aa543/principles-of-underwater-sound-3rd-edition-by-robert-j-urick-0932146627.pdf
47. *Wang Z., Wu Y., Duan G., Cao H., Liu J., Wang K., Wang D.* Assessing the underwater acoustics of the world's largest vibration hammer (OCTA-KONG) and its potential effects on the Indo-Pacific humpbacked dolphin (*Sousa chinensis*) // PLoS One. 2014. Vol. 9 Iss. 10. P. e110590. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110590

Статья поступила в редакцию 22.10.2025, одобрена к печати 15.06.2026.
Для цитирования: *Луньков А. А., Беликов Р. А., Шатравин А. В., Чернецкий А. Д., Белико-ва Е. А., Кочетов О. Ю., Овчинников О. Б.* Оценка влияния на морских млекопитающих подводного строительного шума при погружении свай на акватории Соловецкого залива в Белом море: численное моделирование распространения шума и его прямые измерения // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 2. С. 104–130. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).7

ASSESSMENT OF UNDERWATER CONSTRUCTION NOISE IMPACT FROM PILE DRIVING ON MARINE MAMMALS IN THE SOLOVETSKY BAY, THE WHITE SEA: NUMERICAL SIMULATIONS OF NOISE PROPAGATION AND ITS DIRECT MEASUREMENTS

A. A. Lunkov[1,2], R. A. Belikov[1], A. V. Shatravin[1], A. D. Chernetsky[1], E. A. Belikova[1], O. Yu. Kochetov[1], O. B. Ovchinnikov[1,3]

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: mirounga76@mail.ru;
[2] Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
38, Vavilova str., Moscow, 119991, Russia,
e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru;
[3] Andreev Institute of Acoustics,
4, Shvernik str., Moscow, 117449, Russia,
e-mail: ovchi@akin.ru

In connection with the start of construction of the technological and passenger berths in the settlement of Solovetsky, an assessment of the potential impact of underwater noise during pile driving on marine mammals was conducted. Using the wide-angle parabolic equation method, taking into account the complex bathymetry, numerical simulations were performed to determine the propagation of underwater noise across the waters of the Solovetsky Bay. The noise was generated during pile driving with a hydraulic hammer and a vibratory driver. According to the simulation results, when using a hammer, an excess of the hazardous level of 160 dB re 1 μPa will be observed up to a distance of about 1 km along the shipping channel, and with vibratory driving, only at a distance of up to 30 m from the pile installation site. Noise exceeding the level of 120 dB re 1 μPa, which could cause behavioral disturbances, could propagate to a distance of slightly more than 1 km during vibration piling, and to a distance of about 16 km during impact hammer pile driving. However, the most favorable conditions for noise propagation are observed along the shipping lane; in other directions, noise propagation is significantly hindered by the presence of shallows and islands. Due to the difficulty of noise propagation in shallow waters with complex bathymetry, the impact of noise on marine mammals during pile driving is estimated to be local and insignificant. Noise during vibratory pile driving had, likely, no effect on belugas in the Solovetsky Bay. The impact on bearded seals and ringed seals would have been significant if a hammer had been used, but for vibratory pile driving, given the low occurrence of seals in the study area and their possible tolerance to anthropogenic noise, the impact was assessed as insignificant. The importance of local noise propagation conditions and the biological and ecological characteristics of marine mammal species for accurately assessing the potential impact of anthropogenic noise are demonstrated.

Keywords: numerical modeling, noise propagation, anthropogenic noise impact, construction noise, impact pile driving, vibratory pile driving, beluga whale, ringed seal, bearded seal, the White Sea

Acknowledgement: The work was carried out within the framework of State Assignment of Minobrnauki of Russia No. FMWE 2024-0031.

References

1. Awbrey, F. T., J. A. Thomas, and R. A. Kastelein, 1988: Low-frequency underwater hearing sensitivity in belugas, *Delphinapterus leucas*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **84**, 2273–2275, https://doi.org/10.1121/1.397022
2. Belikov, R. A., V. V. Krasnova, A. V. Shatravin, E. M. Panova, A. D. Chernetsky, E. A. Belikova, N. V. Kryukova, M. M. Taganova, and A. V. Gebruk, 2025: Results of studies of beluga whales, *Delphinapterus leucas*, in the waters of the Solovetsky archipelago and assessment of soundscapes of their habitats in summer 2024. *Journal of oceanological research*, **53** (1), 87–118, EDN: OOMRNX, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).5
3. Bel'kovich, V. M., A. D. Cherneckij, and O. I. Kirillova, 2002: *Biologiya belukh (Delphinapterus leucas) yuzhnoj chasti Belogo morya (Biology of Beluga Whales (Delphinapterus leucas) in the Southern Part of the White Sea).* Morskie mlekopitayushchie: rezul'taty issledovanij, provedennyh v 1995–1998 gg. (Marine mammals: results of research conducted in 1995–1998), Moscow, 53–78.
4. Blackwell, S. B., J. W. Lawson, and M. T. Williams, 2004: Tolerance by ringed seals *(Phoca hispida)* to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **115** (5), 2346–2357, https://doi.org/10.1121/1.1701899
5. Branstetter, B. K., V. F. Bowman, D. S. Houser, M. Tormey, P. Banks, J. J. Finneran, and K. Jenkins, 2018: Effects of vibratory pile driver noise on echolocation and vigilance in bottlenose dolphins *(Tursiops truncatus). The Journal of the Acoustical Society of America*, **143** (1), 429–439, EDN: LFBLXG, https://doi.org/10.1121/1.5021555
6. Castellote, M., B. Thayre, M. Mahoney, J. Mondragon, M. O. Lammers, and R. J. Small, 2019: Anthropogenic noise and the endangered Cook Inlet beluga whale, *Delphinapterus leucas*: Acoustic considerations for management. *Mar. Fish. Rev.,* **80**, 63–88, https://doi.org/10.7755/MFR.80.3.3
7. Chernetskij, A. D., 2021: *Solovetskoe reproduktivnoe skoplenie kak struktura edinitsa belomorskoj populyatsii belukhi* (*Delphinapterus leucas*). Diss. kand. biolog. nauk (Solovetsky reproductive gathering as a structural unit of the White Sea beluga's population. Cand. biolog. sci. thesis), Moscow, IO RAS, 137 p., EDN: IWWEZY
8. Chernetsky, A. D. and V. V. Krasnova, 2018: The structure of the reproductive gathering of beluga whales, *Delphinapterus leucas* (Pallas, 1776), off Solovetsky Island (White Sea) as inferred from results of photo identification in 2007–2013. *Russ. J. Mar. Biol.*, **44** (5), 394–403, EDN: EETLYX, https://doi.org/10.1134/S1063074018050048
9. Collins, M. D., 1994: Generalization of the split-step Padé solution. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **96** (1), 382–385, https://doi.org/10.1121/1.410488
10. Cornick, L., S. Love, L. Pinney, C. Smith, and Z. Zartler, 2011: Distribution, habitat use and behavior of Cook Inlet beluga whales and other marine mammals at the Port of Anchorage marine terminal redevelopment project, June–November 2011. *Sci. Mar. Mammal Monitoring Prog.*, Annual Rep. Alaska Pacific Univ., Dep. Environ. Sci., 55 p. (Avail. online at https://alaskafisheries.noaa.gov/sites/default/files/2011poammannualrpt.pdf).
11. Cosens, S. E. and L. P. Dueck, 1993: Icebreaker noise in lancaster sound, N.W.T., Canada: implications for marine mammal behavior. *Mar. Mamm. Sci.*, **9** (3), 285–300, https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1993.tb00456.x
12. Dahl, P. H., C. A. F. de Jong, and A. N. Popper, 2015a: The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life. *Acous. Today*, **11** (2), 18–25.
13. Dahl, P. H., D. R. Dall'Osto, and D. M. Farrell, 2015b: The underwater sound field from vibratory pile driving. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **137** (6), 3544–3554, https://doi.org/10.1121/1.4921288
14. Erbe, C., C. Reichmuth, K. Cunningham, K. Lucke, and R. Dooling, 2016: Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Mar. Pollut. Bull.*, **103**, 15–38, EDN: WPVZTH, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.007

15. Finley, K. J., 1990: Reactions of beluga *(Delphinapterus leucas)* and narwhals *(Monodon monoceros)* to ice-breaking ships in the Canadian High Artic. *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences*, **224**, 97–117, https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/119072.pdf
16. Graham, I. M., E. Pirotta, N. D. Merchant, A. Farcas, T. R. Barton, B. Cheney, G. D. Hastie, and P. M. Thompson, 2017: Responses of bottlenose dolphins and harbor porpoises to impact and vibration piling noise during harbor construction. *Ecosphere*, **8** (5), p. e01793, https://doi.org/10.1002/ecs2.1793
17. Guan, S. and R. Miner, 2020: Underwater noise characterization of down-the-hole pile driving activities off Biorka island, Alaska. *Marine Pollution Bulletin*, **160** (4), p. 111664, EDN: KLIWZI, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111664
18. Herbert-Read, J. E., L. Kremer, R. Bruintjes, A. N. Radford, and C. C. Ioannou, 2017: Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals *Proc. R. Soc B*, **284** (1863), p. 20171627, https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1627
19. Huang, L-F., X-M. Xu, L-L. Yang, S-Q. Huang, X-H. Zhang, and Y-L. Zhou, 2023: Underwater noise characteristics of offshore exploratory drilling and its impact on marine mammals. *Front. Mar. Sci.*, **10**, p. 1097701, EDN: LBELGW, https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1097701
20. Jensen, F. B., W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, 2011: Computational Ocean acoustics. New York, Springer, 794 p., [tabl. 1.3 on p. 39], https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-8678-8
21. Johnson, C. S., M. W. McManus, and D. Skaar, 1989: Masked tonal hearing thresholds in the beluga whale. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **85** (6), 2651–2654, https://doi.org/10.1121/1.397759
22. Kastak, D. and R. J. Schusterman, 1998: Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: Methods, measurements, noise, and ecology. *Journal of the Acoustal Society of America*, **103** (4), 2216–2228, EDN: YCQFCH, https://doi.org/10.1121/1.421367
23. Kastelein, R. A., L. Helder-Hoek, L. Van Acoleyen, J. M. Terhune, T. Van Renterghem, and D. Botteldooren, 2025: By lifting their heads above water, harbor seals (*Phoca vitulina*) can reduce their exposure to underwater sounds below 8 kHz. *Aquatic Mammals*, **51** (6), 421–437, EDN: TCUMXV, https://doi.org/10.1578/am.51.6.2025.421
24. Kendall, L. S. and L. A. Cornick, 2015: Behavior and distribution of Cook Inlet beluga whales, *Delphinapterus leucas*, before and during pile driving activity. *Marine Fisheries Review*, **77** (2), 106–114, https://doi.org/10.7755/MFR.77.2.6
25. Kendall, L. S., A. *Širovic*, and E. H. Roth, 2013: Effects of construction noise on the Cook Inlet beluga whale *(Delphinapterus leucas)* vocal behavior. *Can. Acoust.*, **41** (3), 1–13, EDN: SONVWV
26. Krasnova, V. V., E. A. Prasolova, R. A. Belikov, A. D. Chernetsky, and E. M. Panova, 2020: Influence of boat tourism on the behaviour of Solovetskiy beluga whales *(Delphinapterus leucas)* in Onega Bay, the White Sea. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **30** (10), 1922–1933, EDN: NOZKKP, https://doi.org/10.1002/aqc.3369
27. Lukin, L. R., G. N. Ognetov, and N. S. Boyko, 2006*: Ehkologiya kol'chatoj nerpy v Belom more. (Ecology of the Ringed Seal in the White Sea).* Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 164, [1] p.: ill., tables, color ill., ISBN 5-7691-1700-1, EDN: OTXXMP
28. Martin, M. J., W. D. Halliday, L. Storrie, J. J. Citta, J. Dawson, N. E. Hussey, F. Juanes, L. L. Loseto, S. A. MacPhee, L. Moore, A. Nicoll, G. O'Corry-Crowe, and S. J. Insley, 2023a: Exposure and behavioral responses of tagged beluga whales *(Delphinapterus leucas)* to ships in the Pacific Arctic. *Marine Mammal Science*, **39** (2), 387–421, EDN: EVALSA, https://doi.org/10.1111/mms.12978
29. Martin, M., T. Gridley, S. Elwen, and I. Charrier, 2023b: Inter-site variability in the Cape fur seal's behavioural response to boat noise exposure. *Mar. Pollut. Bull.*, **196**, p. 115589, EDN: VTTKJH, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115589
30. Mikkelsen, L., M. Johnson, D. M. Wisniewska, A. van Neer, U. Siebert, P. T. Madsen, and J. Teilmann, 2019: Long-term sound and movement recording tags to study natural behavior and

reaction to ship noise of seals. *Ecol. Evol.*, **9**, 2588–2601, EDN: WOLITZ, https://doi.org/10.1002/ece3.4923
31. Moulton, V. D., W. J. Richardson, M. T. Williams, and S. B. Blackwell, 2003: Ringed seal densities and noise near an icebound artificial island with construction and drilling. *ARLO*, **4**, 112–117, https://doi.org/10.1121/1.1605091
32. Nedwell, J. and D. Howell, 2004: A review of offshore windfarm related underwater noise sources. *Cowrie Rep.*, **544**, 57 p., https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Nedwell-Howell-2004.pdf
33. Parabolic equation models – https://oalib-acoustics.org/website_resources/PE/archive/ (дата обращения 15.01.2026)
34. Prawirasasraa, M. S., M. Jüssib, M. Mustonena, and A. Klausona, 2022: Underwater noise impact of a ferry route on dive patterns of transiting Baltic ringed seals. *Estonian Journal of Earth Sciences*, **71** (4), 201–213, EDN: OEIWCU, https://doi.org/10.3176/earth.2022.14
35. Richardson, W. J., C. R. Greene, Jr. C. I. Malme, and D. H. Thomson, 1995: Marine Mammals and Noise. San Diego, Academic Press, 576 p., EDN: YHLOTO, https://doi.org/10.1016/C2009-0-02253-3
36. Ruser, A., K. Anderson Hansen, M. Wahlberg, T. Schaffeld, and U. Siebert, 2025: Underwater audiogram of the grey seal (*Halichoerus grypus*). *Biology Open*, **14** (8), p. bio062059, EDN: JUAWKF, https://doi.org/10.1242/bio.062059
37. Russell, D. J. F., G. D. Hastie, D. Thompson, V. M. Janik, P. S. Hammond, L. A. S. Scott-Hayward, J. Matthiopoulos, E. L. Jones, and B. J. McConnell, 2016: Avoidance of wind farms by harbour seals is limited to pile driving activities. *J. Appl. Ecol.*, **53** (6), 1642–1652, https://doi.org/10.1111/1365-2664.12678
38. Rutenko, A. N., D. S. Manul'chev, and A. A. Solov'ev, 2013: Study of low-frequency-acoustic- and seismic-wave energy propagation on the shelf. *Acoustical Physics*, **59**, 319–332, EDN: RFHERJ, https://doi.org/10.1134/S1063771013030111
39. Rutenko, A. N., M. M. Zykov, V. A. Gritsenko, M. Yu. Fershalov, M. R. Jenkerson, D. S. Manul-chev, R. Racca, and V. E. Nechayuk, 2022: Acoustic monitoring and analyses of air gun, pile driving, vessel, and ambient sounds during the 2015 seismic surveys on the Sakhalin shelf. *Environmental Monitoring and Assessment*, **194** (744), EDN: JMTUPO, https://doi.org/10.1007/s10661-022-10021-y
40. Sills, J. M., B. L. Southall, and C. Reichmuth, 2015: Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. *J. Exp. Biol.*, **218** (14), 2250–2259, https://doi.org/10.1242/jeb.120972
41. Sills, J. M., C. Reichmuth, B. L. Southall, A. Whiting, and J. Goodwin, 2020: Auditory biology of bearded seals (*Erignathus barbatus*). *Polar Biol.*, **43**, 1681–1691, EDN: SIGGRI, https://doi.org/10.1007/s00300-020-02736-w
42. Širovic, A. and L. S. Kendall, 2009: Passive acoustic monitoring of Cook Inlet beluga whales. Analysis report. Prep. by AK Pacific University for Port of Anchorage, Dec. 2009, 73 p. (avail. online at www.nmfs.noaa.gov/pr/pdfs/permits/poa_acoustic_report.pdf).
43. Solovej, N. A., V. A. Zhigul'skij, and E. V. Knyazhenko, 2012: Ekologicheskie aspekty otsenki i normirovaniya shuma pri proektirovanii portov (Environmental aspects of noise assessment and rationing in port design). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. (Modern problems of science and education),* **1**, 152, EDN: OXCEGP
44. Southall, B. L., J. J. Finneran, C. Reichmuth, P. E. Nachtigall, D. R. Ketten, A. E. Bowles, W. T. Ellison, D. P. Nowacek, and P. L. Tyack, 2019: Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, **45** (2), 125–232, EDN: KCKPFI, https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125
45. Tarovik, V. I., O. V. Savchenko, and N. G. Kutaeva, 2022: Technogenic underwater noise as a factor in the environmental safety of maritime transport and industrial activities in the Arctic. *Arktika ekologiya i ekonomika (Arctic ecology and economics)*, **12** (1), 99–110, EDN: ACBNEN, https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-99-110

46. Urick, R. J., 1983: Principles of underwater sound. 3rd edition, Los Atlos, California, Peninsula Publishing, 423 p., https://inquietlq.firebaseapp.com/aa543/principles-of-underwater-sound-3rd-edition-by-robert-j-urick-0932146627.pdf
47. Wang, Z., Y. Wu, G. Duan, H. Cao, J. Liu, K. Wang, and D. Wang, 2014: Assessing the underwater acoustics of the world's largest vibration hammer (OCTA-KONG) and its potential effects on the Indo-Pacific humpbacked dolphin (*Sousa chinensis*). *PLoS One,* **9** (10), p. e110590, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110590

Submitted 22.10.2025, accepted 15.06.2026.
For citation: Lunkov, A. A., R. A. Belikov, A. V. Shatravin, A. D. Chernetsky, E. A. Belikova, O. Yu. Kochetov, and O. B. Ovchinnikov, 2026: Assessment of underwater construction noise impact from pile driving on marine mammals in the Solovetsky Bay, the White Sea: numerical simulations of noise propagation and its direct measurements. *Journal of Oceanological Research*, **54** (2), 104–130, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).7

白海索洛韦茨基湾水域打桩水下施工噪声对海洋哺乳动物影响的评估：噪声传播数值模拟与直接测量

A. A. Lunkov[1,2], R. A. Belikov[1], A. V. Shatravin[1], A. D. Chernetsky[1], E. A. Belikova[1], O. Yu. Kochetov[1], O. B. Ovchinnikov[1,3]

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编：*117997, Russia,*
电子邮箱: *mirounga76@mail.ru;*
[2] Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
38, Vavilova str., Moscow, 邮编：*119991, Russia,*
电子邮箱: *lunkov@kapella.gpi.ru;*
[3] Andreev Institute of Acoustics,
4, Shvernik str., Moscow, 邮编：*117449, Russia,*
电子邮箱: *ovchi@akin.ru*

鉴于索洛韦茨基镇技术客运码头建设项目的启动，对打桩水下噪声对海洋哺乳动物的潜在影响程度进行了评估。初步建立了索洛韦茨基湾水域的地声模型，考虑了海底地形起伏，但假设海底性质均匀。采用广角抛物方程法对振动打桩机打设金属桩产生的水下噪声传播进行了数值模拟，并对液压锤的噪声水平进行了补充估算。根据考虑海底地形起伏的模拟结果，使用液压锤时，超过160 dB re 1 μPa危险阈值的噪声将传播至航道沿线约1 km的距离，而振动打桩时则为桩位约30 m以内。超过120 dB re 1 μPa阈值的噪声（可能引起动物行为改变）在振动打桩时可传播至略大于1 km，在液压锤打桩时可传播至约16 km。适合噪声传播的条件仅出现在航道沿线；其他方向上由于浅滩和岛屿的存在，传播受到极大限制。由于浅水区域复杂水深条件下声传播损失较大，打桩施工对海洋哺乳动物的潜在噪声影响被评定为轻微。2025年夏季索洛韦茨基湾振动打桩施工对白鲸的影响可能不存在。若使用液压锤，对髯海豹和环斑海豹的影响将是显著的；但考虑到研究区域海豹数量稀少及其对人为噪声的可能耐受性，振动打桩施工的影响被评定为轻微。研究结果表明，为正确评估人为噪声对海洋哺乳动物的潜在影响，需充分考虑局部噪声传播条件及不同物种的生物学和生态学特征。

关键词： 数值模拟，噪声传播，人为影响，施工噪声，液压锤打桩，振动打桩，白鲸，环斑海豹，髯海豹，白海

致谢： 本研究在俄罗斯联邦科学与高等教育部国家任务（编号：FMWE-2024-0031）框架内完成。