© Чубаренко Б. В., Фетисов С. В., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 3, С. 129–146

УДК: 551.466.31 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).7

ОЦЕНКА ПЕРИОДА ПРИБРЕЖНОГО ВОЛНЕНИЯ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ШУМА МОРЯ

Б. В. Чубаренко, С. В. Фетисов

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: chuboris@mail.ru

Представлен результат эксперимента по использованию дистанционного метода анализа параметров ветрового волнения на основе измерений шума моря, слышимого на берегу. Метод основан на записи и обработке звуковых сигналов, генерируемых обрушающимися волнами в прибойной зоне. Проведено сравнение результатов акустических измерений с данными по волнению, полученными расчетными методами и по измерениям датчиком давления CTD-зонда в рамках экспедиционного выезда на Балтийскую косу (Калининградская область) 05.07.2024. Период волн, определенный по записи шума моря, с приемлемой точностью совпал с оценками, полученными с помощью спектрального анализа натурных данных (5.0±0.2 с и 4.6±0.7 с), что иллюстрирует возможность применения предложенного метода для дистанционного мониторинга параметров морского волнения в прибрежной зоне в условиях, когда визуальные наблюдения или установка приборов в воде невозможны.

Ключевые слова: шум моря, ветровые волны, морское волнение, акустические измерения, CTD-зондирование, дистанционный мониторинг

Введение

Ветровые волны во все века привлекали внимание исследователей. Считается, что систематические наблюдения начали проводиться в XVIII–XIX вв., но технические ограничения позволяли получать лишь визуальные оценки. В XVIII в. для измерений начали применяться плавучие устройства, а позже анероиды (Abercromby, 1888; Froude, 1865); к середине XIX в. появились оптические волномеры и волнографы для непрерывной регистрации волн; примерно в это же время начали развиваться лабораторные исследования в бассейнах с волнопродукторами и воздушным потоком (Титов, 1969). В настоящее время для измерения параметров волнения используется множество приборов, которые можно разделить на контактные и дистанционные. К контактным относятся волновые буи, струнные или ультразвуковые волнографы и притопленные датчики давления. В частности, измерения ультразвуковым волнографом проводятся на нефтяной платформе в Калининградской области вблизи от исследуемого района (Медведева и др., 2016). Такие приборы обеспечивают высокую точность в точке установки, но уязвимы в штормовых условиях и дорогостоящие в обслуживании.

Параллельно с инструментальными измерениями развивались методы численного моделирования волнения. Например, спектральная модель SWAN (Simulating Waves Nearshore) широко применяется для ретроспективных расчетов и прогноза полей ветровых волн. В Балтийском море такие расчеты выполняются на прямоугольных и неструктурных сетках с использованием данных реанализа NCEP CFSR для атмосферного воздействия, как например, в работах (Soomere, 2023; Sokolov, Chubarenko B., 2018).

Современные задачи мониторинга ветрового волнения в значительной степени связаны с прибрежной зоной, где абразия берегов под действием ветро-волнового фактора обусловливает перемещение наносов и донных осадков, формируя специфический подвижный рельеф береговой зоны (Зенкович, Попов, 1980; Айбулатов, 1990; Кузнецова и др., 2015). Задача по измерению характеристик ветрового волнения непосредственно в зоне обрушения и наката не является рутинной. Для решения этой задачи в прибрежной зоне требуется размещение непосредственно в воде фиксирующих приборов, таких как буи или датчики (Мысленков и др., 2025). Такой подход сопряжен с рядом ограничений: высокая стоимость оборудования и его обслуживания, сложность установки в удаленных или труднодоступных районах (Shabani et al., 2014). Серьезные технические сложности связаны с наблюдением в штормовых условиях, а также с тем фактом, что развитие максимальных волновых воздействий зачастую происходит в темный период суток, когда применение оптических методов невозможно.

Альтернативой являются дистанционные методы наблюдений. Среди них активно развивается радиолокационное зондирование, которое считается одним из наиболее перспективных средств диагностики морской поверхности. Примером комплексного подхода является система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования (Ивонин и др., 2013). Преимуществом наземных радиолокационных систем является возможность установки оборудования в защищенном месте, вдали от неблагоприятных факторов морской среды.

Наряду с наземными системами, широко применяется спутниковая альтиметрия, которая обеспечивает глобальное покрытие и позволяет получать данные в удаленных районах. Однако для прибрежной зоны ее данные нередко признаются ненадежными (Passaro et al., 2021).

Также можно выделить методы, основанные на пассивных (без излучения активного звукового сигнала) акустических измерениях звукового поля, естественно возникающего в результате взаимодействия ветра, водной среды и берегового субстрата (галька, песок, скалы). Тем не менее, реализация большинства дистанционных подходов – будь то акустические системы на летательных аппаратах (Лобач, 2013) или спутниковая альтиметрия (Titchenko, Karaev, 2013) – остается дорогостоящей. В этом контексте особый интерес представляет регистрация шума моря не в толще воды, а в воздушной среде на берегу.

Понятие «шум моря» часто используется для описания акустических событий в воде и на границе вода–воздух, создающих при этом единое акустическое поле.

Составными частями этого поля являются различные акустические события – звуки определенной интенсивности с четко обозначенной областью в амплитудно-частотном спектре и выраженными резонансными (тональными) частотами (Parikh et al., 2022). В настоящей работе под «шумом моря» понимается та часть акустического сигнала, генерируемого волнами, обрушающимися в прибойной зоне, которая распространяется в воздушной среде и регистрируется на берегу. Метод, основанный на записи шума моря на берегу (т. е. в воздушном пространстве), может позволить фиксировать параметры волнения без размещения измерительных устройств в воде, что особенно важно для мониторинга в труднодоступных районах и при неблагоприятных метеоусловиях.

Однако данное направление практически не разработано на сегодняшний день. Имеется несколько современных публикаций, посвященных измерению звука обрушающейся волны именно в воздушном пространстве (Tollefsen and Byrne, 2011; Dallas et al., 2015). Например, работа Bolin и Åbom (2010), выполненная на побережье Балтийского моря. Авторы показали, что уровень звукового давления возрастает с 60 дБ при высоте волны 0.4 м до 78 дБ при высоте 2.0 м, а спектральное распределение в 1/3-октавных полосах существенно зависит от типа прибоя. В более ранних работах (Гуреев и др., 2002) отмечалось, что шум моря несет информацию о периоде набегающих волн, однако исследований по количественному восстановлению параметров волнения из акустического сигнала до настоящего времени не проводилось. Таким образом, регистрация шума моря на берегу с целью количественной оценки параметров волнения остается крайне слабо изученной темой, но, безусловно, актуальным направлением исследования.

Целью данной работы является оценка параметров (в первую очередь периода) морского волнения на основе анализа шума моря, слышимого на берегу (не в толще воды), верификация полученных результатов по натурным измерениям, а также по модельным данным реанализа Copernicus.

Материалы и методы

Исследования проводились на морском берегу Балтийской косы (Калининградская область), которая расположена в юго-восточной части Балтийского моря (рисунок 1) и отделяет Калининградский залив от акватории Балтийского моря. Точки наблюдений располагались в пределах активно размываемого участка длиной 2 километра, южнее входных молов Калининградского морского канала (рисунок 2а). На данном участке пляж имеет переменную ширину (до 40 м), сложен преимущественно среднезернистыми песками, ограничен со стороны суши дюнным валом (Boldyrev, Bobykina, 2008). Он имеет фестончатую структуру (рисунок 2а), шаг фестонов составляет 60–100 м (Бобыкина и др., 2026).

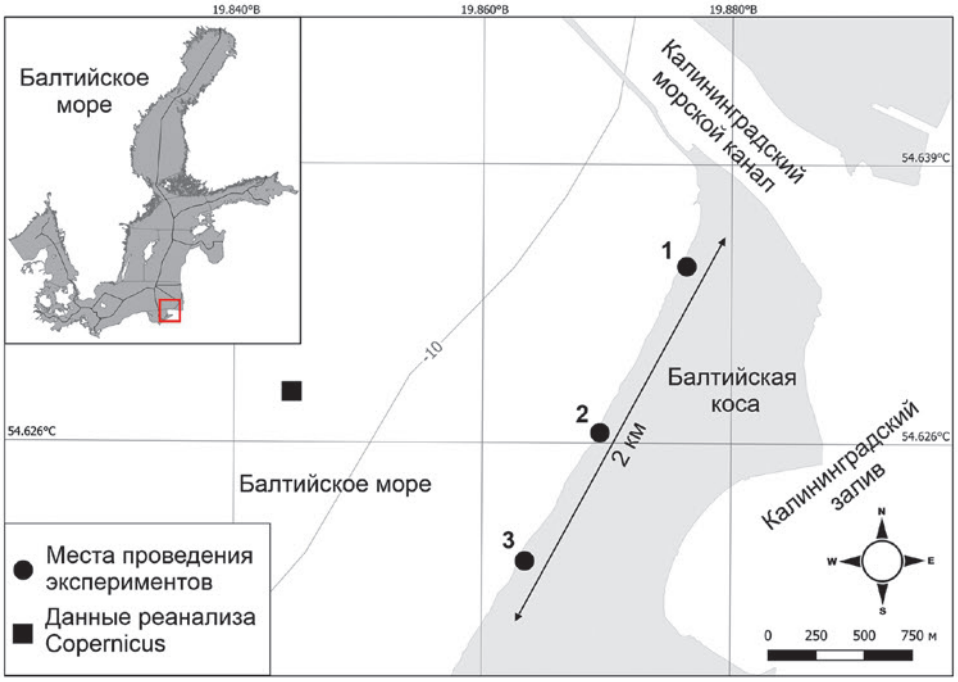


Рис. 1 – Район исследования: размываемый участок аккумулятивного песчаного берега Балтийской косы в пос. Коса (г. Балтийск, Калининградская область, Россия)

5 июля 2024 г. был проведен натурный эксперимент с одновременным использованием звукового записывающего устройства Zoom H2n и CTD-зонда Ocean Seven 316Plus. Звуковые записи проводились в трех точках на Балтийской косе, на удалении примерно 400, 1200 и 1500 м от основания южного оградительного мола Калининградского морского канала (рисунок 1), в период с 14:15 до 15:35. Точки измерения располагались в вершинах фестонов (рисунок 2б), ввиду того, что на мысах, разделяющих фестоны, волнение имело очень сложную структуру из-за рефракции, и ветровые волны в звуковой записи невозможно было надежно выделить, т. к. спектр был практически сплошным, без четко выраженных тональных составляющих. Уклон подводного склона в месте измерений составлял 1:20, а пляжевой приурезовой бермы – 1:8.

Средняя скорость ветра в период проведения эксперимента составляла 2–4 м/с (с максимальными порывами до 12 м/с), ветер был преимущественно западных и юго-западных румбов (по данным метеорологической станции в г. Балтийск, находящейся в 3 км к северо-востоку, https://rp5.ru/). Величина заплеска оценивалась рулеткой (рисунок 2в) и составляла в среднем 11 м на указанных трех точках. С учетом схожести характеристик зоны заплеска на всех трех точках, можно говорить об однородности условий ветрового волнения во время измерений.

Одновременно с записью на звуковое записывающее устройство (оператор находился на берегу в 3–5 м от зоны заплеска) (рисунок 2б) в воду погружался CTD-зонд для получения данных по давлению (рисунок 3). В точке 3 записи зондом производились на глубинах 0.7, 1.1 и 1.5 м. В остальных точках – только на глубине 0.7 м, в приурезовой ложбине, после которой происходило последнее обрушение волн и накат волны в зоне

заплеска. Переход от давления к уровню моря производился без коррекции, так как при измерениях на таких глубинах линейное затухание будет незначительным.

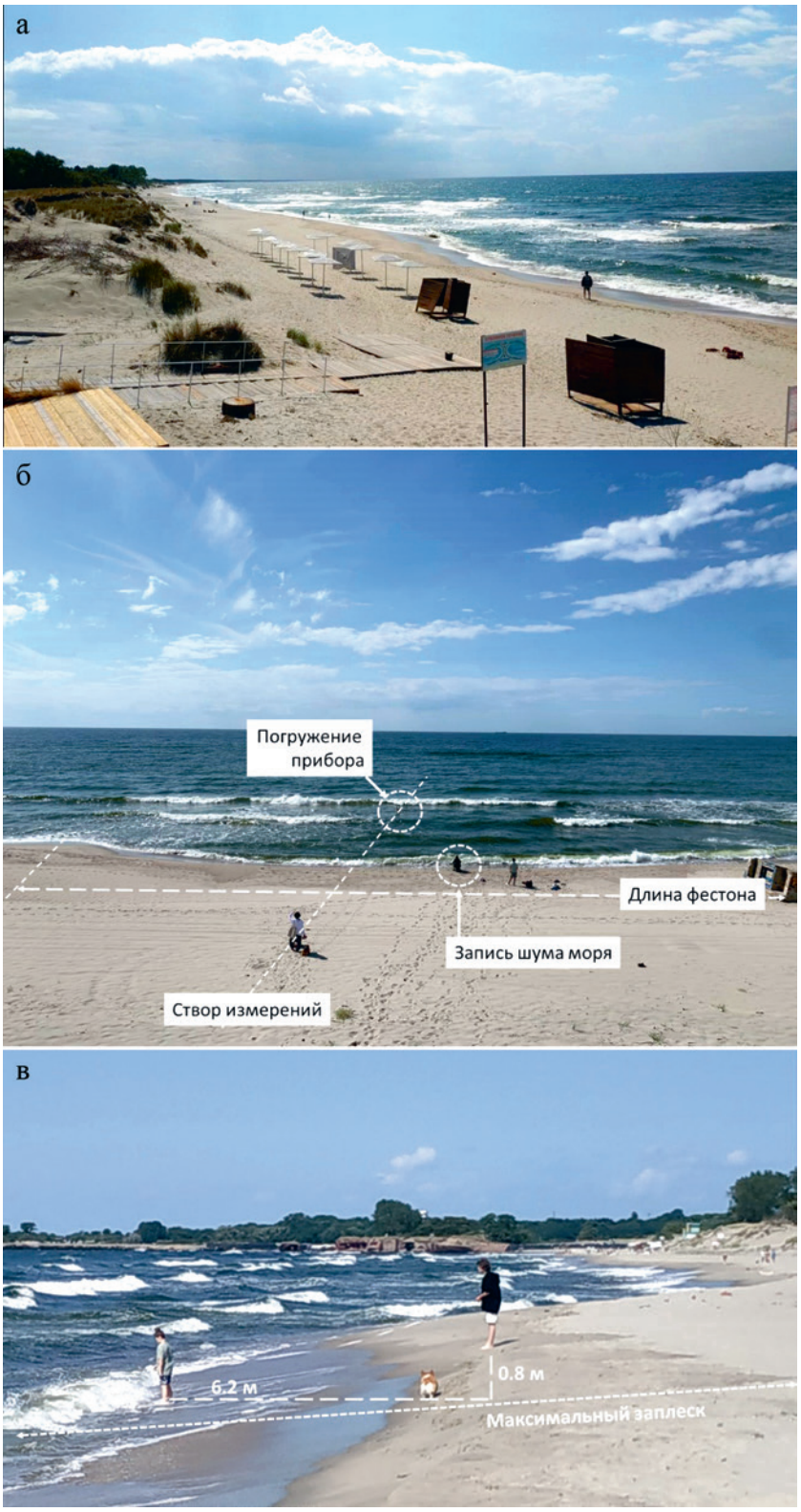


Рис. 2 – Фестончатая структура линии уреза песчаного пляжа в пос. Коса (**а**), измерения в точке № 3 в вершине фестона (**б**), измерение длины заплеска рулеткой (**в**)

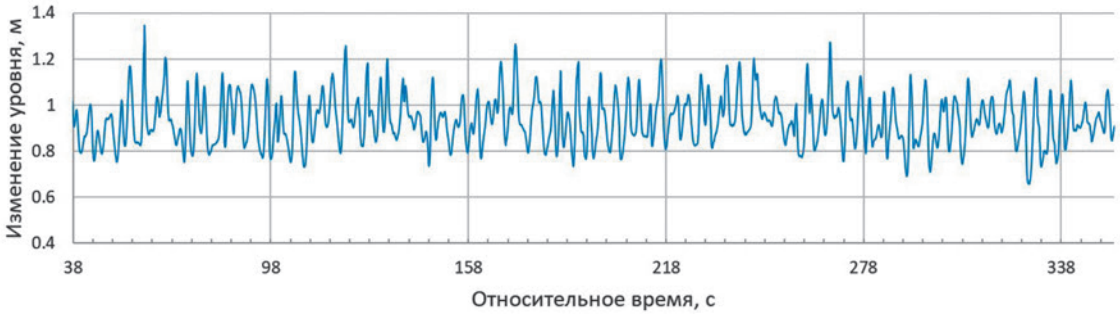


Рис. 3 – График изменения уровня воды для точки 1 (CTD-зонд Ocean Seven 316Plus)

Запись аудиофайлов шума моря производилась с помощью портативного записывающего устройства Zoom H2n с двумя X/Y микрофонами (Zoom H2n, 2024) в течение 5 минут на каждой точке (см. раздел результаты). Максимальный уровень звукового давления (Maximum SPL) встроенных микрофонов составляет 120 дБ SPL. Аналогово-цифровое преобразование выполнялось с параметрами дискретизации 24 бит / 96 кГц с сохранением несжатых данных в формате WAV. Одна такая аудиозапись представляет собой набор пучностей (рисунок 4), каждая из которых соответствует обрушению ветровой волны на мелководье (рисунок 5). Далее будем называть такие пучности звуковым пакетом.

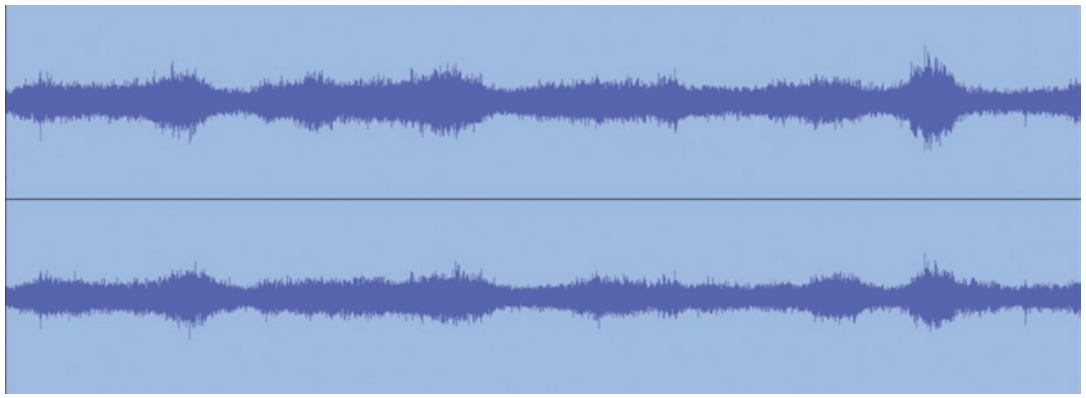


Рис. 4 – Пример аудиофайла с набором звуковых пакетов – образов разрушения волн в зоне обрушения. Это параллельные записи двумя микрофонами (X–Y микрофоны). Длительность записи 300 с



Рис. 5 – Пример трех последовательных фаз при обрушении волн на мелководье (Фаза 1 – нарастание, Фаза 2 – фаза максимума, опрокидывание гребня, Фаза 3 – затухание)

В звуковой записи отчетливо выделялись звуковые пакеты, громкость которых значимо отделялась от межпакетного фона. В ходе обработки каждый аудиофайл был проанализирован с помощью многоплатформенного аудиоредактора Audacity (Audacity, 2024), который имеет возможность полуавтоматического определения границ нарастания и затухания звука. При помощи этого инструмента и ручной корректировки аудиофайл размечался для оценки длительности каждого звукового пакета, его составляющих (нарастание, зона максимума и затухание) и интервалов между пакетами.

Показатели громкости представлены в децибелах относительно полной шкалы (dB Full Scale – dBFS). Шкала dBFS – это логарифмическая шкала, максимальная величина которой равна нулю (цифровой максимум, цифровой эталон), то есть равна пиковому значению цифровой системы. Таким образом, все значения, кроме максимального, будут отрицательными, так как они отражают то, насколько тихим является сигнал относительно цифрового максимума. Уровень межпакетного фона находится в пределах -33–(-30) dBFS.

На рисунке 6 представлена визуализация каждой из трех фаз звукового пакета: фаза нарастания – характеризуется постепенным увеличением громкости звука, что может быть интерпретировано как начало разрушения волны; фаза максимума – опрокидывание гребня (характеризуется максимальным уровнем громкости); фаза затухания – характеризуется постепенным снижением громкости, что может быть интерпретировано как образование бурунов – пузырьковых шлейфов на поверхности моря (Martins, 2017). Колебания таких пузырьков являются основным источником шума от обрушающихся волн (Deane and Stokes, 2002), причем, согласно теоретическим расчетам (Manasseh et al., 2006), шум от пузырьков, находящихся внутри шлейфа, сильно затухает, и только тонкая оболочка из пузырьков на внешней стороне шлейфа вносит вклад в шум моря.

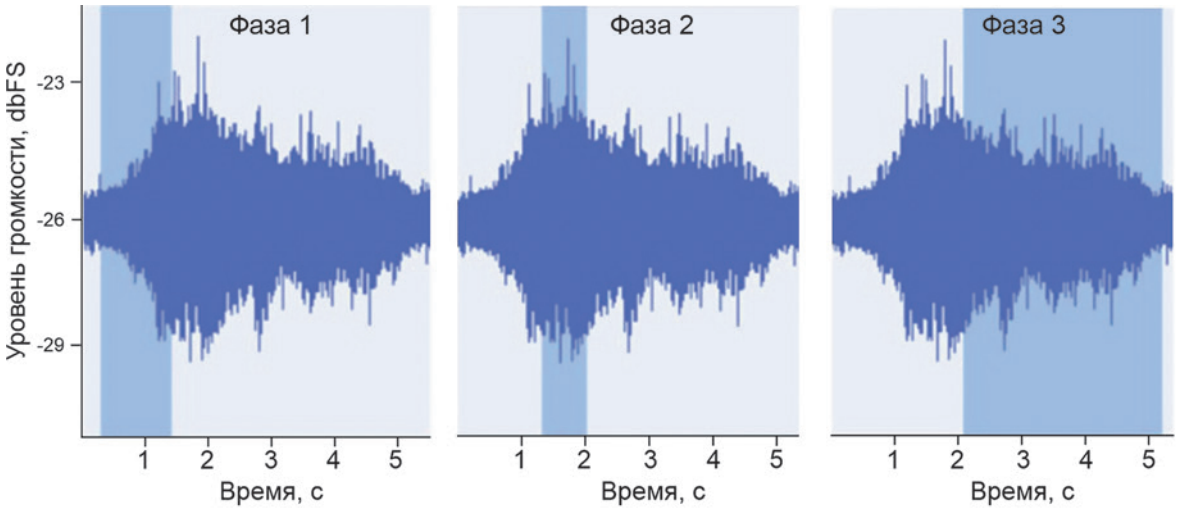


Рис. 6 – Пример выделения (затемненной полосой) фаз звукового пакета (Фаза 1 – нарастание, Фаза 2 – фаза максимума, Фаза 3 – затухание)

Характеристики волнения оценивались по данным натурных измерений с помощью CTD-зонда Ocean Seven 316Plus, установленного на дно на глубинах до 1.5 м. Частота дискретизации записи датчика давления составляет 16 Гц, а точность измерения – 0.01 %. По измерениям датчика давления был получен временной ряд x_n длины N с частотой дискретизации $F_s = \frac{1}{\Delta t}$ (частота измерений), к которому применялся метод спектрального анализа, основанный на быстром преобразовании Фурье (FFT) для оценки спектральной плотности мощности (Power Spectral Density, PSD) временного ряда. Данный метод основан на дискретном преобразовании Фурье (DFT) и включает три ключевых этапа: оконное взвешивание, вычисление периодограммы и опциональное сглаживание.

В качестве оконной функции использовалась функция Хана $w(n) = 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N-1}\right)$ (Kanasewich, 1975), где N – длина временного ряда. Оконная функция предназначена для уменьшения спектральной утечки, эффекта, при котором энергия сигнала с одних частот «растекается» на соседние частотные бины, искажая оценку спектра.

Тогда оценка PSD записывается в виде (1):

$$S(f_k) = \frac{2}{F_s \cdot \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n)} \cdot \left| X_w(k) \right|^2, f_k > 0, \quad (1)$$

где $f_k = k\frac{F_s}{N}$ – частоты, соответствующие индексам k. $X_w(k)$ – это спектр или набор комплексных чисел, представляющих амплитуды и фазы гармонических колебаний (синусоид и косинусоид), из которых состоит дискретный сигнал для каждой частоты k.

Для уменьшения дисперсии периодограммы использовался метод скользящего среднего (2):

$$\hat{S}(f_k) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=k-\frac{M-1}{2}}^{k+\frac{M-1}{2}} S(f_j), \quad (2)$$

где M – нечетное целое число (размер окна сглаживания). Такое сглаживание эквивалентно умножению автокорреляционной функции на окно во временной области (метод Блэкмана–Тьюки) (Blackman and Tukey, 1958).

Описанный метод позволяет выделить основные характеристики волнения, такие, как период волнения (пиковый и средний) и значительную высоту волны. Для этого необходимо вычислить спектральные моменты (3):

$$m_n = \int_0^\infty f^n \cdot S(f)\, df \approx \sum_k f_k^n \hat{S}(f_k) \Delta f, \quad (3)$$

где $\Delta f = \frac{F_s}{N}$ – частотное разрешение. На основании формулы (4) вычисляются основные волновые характеристики (4):

$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$ – значительная высота волны;

$T_p = \frac{1}{f_{peak}}$ – пиковый период, где f_{peak} – частота, соответствующая максимуму спектральной плотности;

$T_{0,1} = \frac{m_0}{m_1}$ – период, соответствующий средней частоте энергетического спектра; (4)

$T_{0,2} = \frac{m_0}{m_2}$ – период, соответствующий среднеквадратичному наклону волн.

Результаты и обсуждение

Спектральный анализ временных рядов, полученных по данным измерения CTD-зондом, с помощью формул (4) позволил получить на всех станциях средний пиковый период волнения T_p (4.6±0.7 с (среднее значение ± стандартное отклонение)), периоды $T_{0,1}$ (4.1±0.2 с) и $T_{0,2}$ (3.7±0.1 с), а также значительную высоту волны H_{m0} (0.5±0.1 м) (таблица 1, рисунок 7). Для сравнения были приведены данные из реанализа Copernicus (European Union-Copernicus Marine Service, 2020). Средний по всем трем станциям пиковый период, полученный с помощью спектрального анализа, оказался на 20 % меньше, чем по данным Copernicus, что, вероятно, связано с особенностями морфологии подводного склона в прибрежной зоне, а также с тем, что более длинные волны из всего набора набегающих волн (точка реанализа располагалась на удалении от уреза) уже претерпели обрушение, а вблизи уреза обрушивались более короткие волны.

Необходимо отметить, что для станции 1 пик спектра получился нечеткий (рисунок 7а). Причиной может быть близость места измерения к южному входному молу Калининградского морского канала. Это заградительное укрепление может создавать условия возникновения суперпозиции многих волн, тем самым приводя к ошибке в определении пика.

Табл. 1 – Параметры волнения, определенные с помощью спектрального анализа записей давления, полученных CTD-зондом

№ станции	T_p, с	$T_{0,1}$, с	$T_{0,2}$, с	H_{m0}, м
1	4.0	3.9	3.6	0.4
2	5.7	4.3	3.9	0.4
3.1	4.5	4.1	3.8	0.5
3.2	4.3	4.1	3.7	0.4
3.3	4.4	4.0	3.6	0.5
Среднее	4.6	4.1	3.7	0.4
Copernicus	5.7	2.2	3.2	0.8

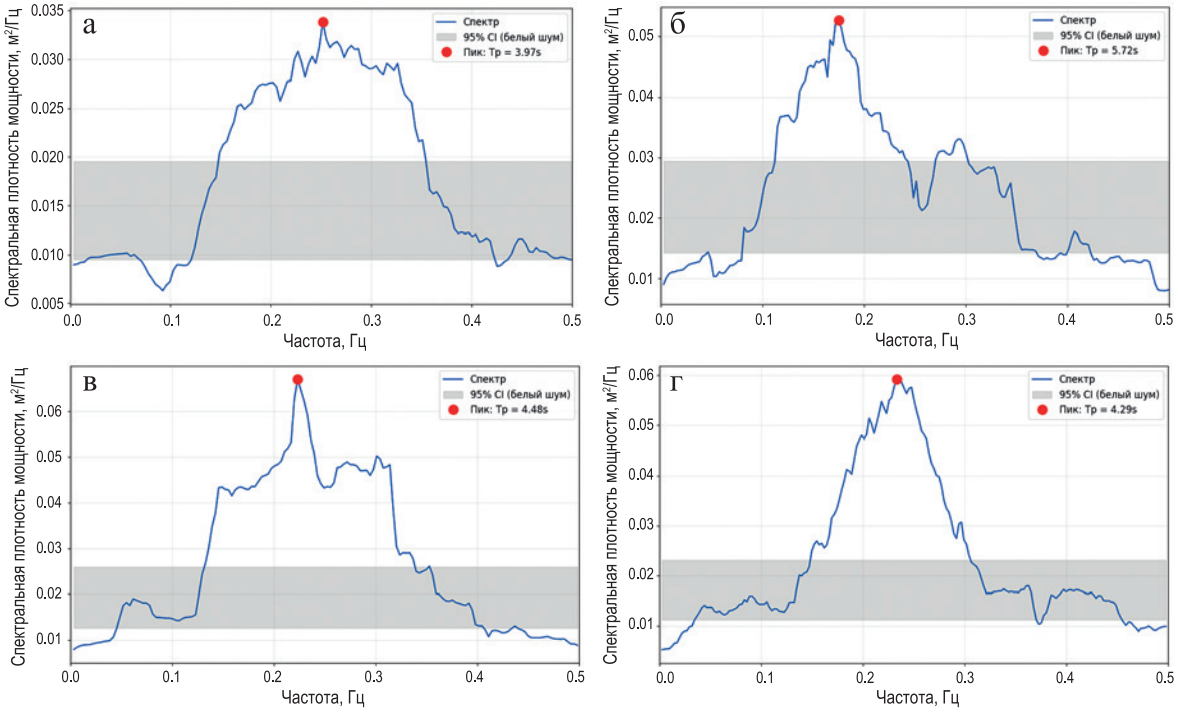


Рис. 7 – График спектральной мощности с указанием пика и доверительного интервала 95 % для белого шума: **а** – точка 1; **б** – точка 2; **в** – точка 3.1; **г** – точка 3.3

Для каждого звукового пакета на всех станциях были посчитаны длительность цикла, нарастания, обрушения и затухания волн (таблица 2). 5-минутная запись на станции 1 позволила выделить 56 звуковых пакетов, на станции 2 – 61 звуковой пакет. На станции 3 были проведены 3 записи, которые в сумме дали 182 звуковых пакета. Выбранная длина записи (5 мин) не достигает рекомендованной (Всемирной метеорологической организацией) продолжительности, что ограничивает статистическую достоверность спектральных оценок. Однако в условиях прибрежной зоны с быстро меняющимся волновым режимом увеличение интервала неизбежно нарушает стационарность поля, что негативно сказывается на разрешении пика в спектре звукового давления и, следовательно, на точности определения периода. Более короткие записи обеспечивают необходимую однородность волнового поля для сопоставимых измерений в разных точках. Отметим также, что аналогичная длительность записей применялась в пилотной работе по изучению шума моря (Bolin и Åbom, 2010), что подтверждает обоснованность выбранного подхода.

Статистический анализ проводился с использованием статистических функций scipy.stats для Python 3.11.10 (Virtanen et al., 2020). С помощью критерия Краскела-Уоллиса (*H*-критерий) было показано, что медианные значения длительности циклов, а также длительности фаз нарастания, обрушения и затухания волн внутри циклов статистически значимо не отличаются (p = 0.97–0.99, α = 0.05) в пределах записей и между записями. Это показывает однородность условий, в которых проводился эксперимент.

Табл. 2 – Параметры волнения, полученные с помощью анализа звуковых пакетов

Станция	кол-во пакетов	Период, с	Длительность цикла, с		Нарастание, с		Обрушение, с		Затухание, с	
			Среднее	SD	Среднее	SD	Среднее	SD	Среднее	SD
1	56	5.4	3.7	1.2	1.3	0.1	1.2	0.3	1.2	0.6
2	61	4.9	3.7	1.1	1.3	0.1	1.1	0.3	1.2	0.6
3.1	60	5	3.7	1.1	1.3	0.1	1.1	0.3	1.2	0.6
3.2	60	5	3.7	1.2	1.3	0.1	1.2	0.3	1.2	0.6
3.3	62	4.8	3.7	1.1	1.3	0.1	1.2	0.3	1.2	0.6

Период волнения определялся как отношение времени записи звуковых файлов на каждой точке (5 мин или 300 с) к количеству выделенных по итогам анализа звуковых пакетов. Средний период по всем точкам составил 5±0.2 с. Принимая это значение как базовое, получаем процентное отклонение +9 % от периода волны, рассчитанное с помощью спектрального анализа; и -14 % от данных Copernicus (рисунок 8).

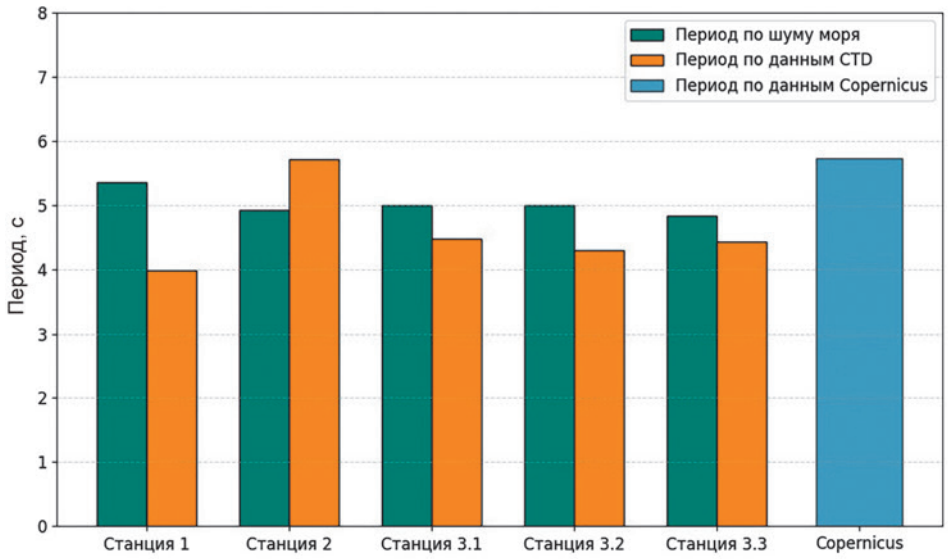


Рис. 8 – График значений периодов волн, оцененных по звуковым файлам и по изменениям уровня воды

Также был проведен статистический тест сравнения периодов волнения, рассчитанных по данным CTD и полученных экспериментальным путем по звуковым данным с помощью критерия знаковых рангов Уилкоксона (Wilcoxon, 1945). Данный критерий показал, что периоды волнения по всем станциям, где проводился эксперимент, статистически значимо не отличаются ($p = 0.44$, $\alpha = 0.05$).

В данной работе мы ограничились определением периода волнения. Это обусловлено тем, что период рассматривался как консервативный показатель работоспособности метода на пилотном этапе. Кроме того, измерение высоты в зоне

обрушения сопряжено с высокой неопределенностью из-за трансформации волн, зависящей от морфологии склона, типа дна и наличия подводных баров. В отличие от этого, период является более устойчивой характеристикой, сохраняющейся при переходе волны на мелководье. При этом период имеет самостоятельную прикладную значимость: он важен для прогноза выброса морского мусора и используется в моделях машинного обучения (Fetisov and Chubarenko I., 2021), а также позволяет определять тип обрушения, критичный для оценки эрозии, транспорта наносов и устойчивости инфраструктуры.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило возможность развития метода использования пассивной акустики для оценки параметров морского волнения. Анализ данных, полученных с помощью традиционного CTD-зонда, спектрального анализа и звукового записывающего устройства, показал высокую степень согласованности результатов. Период волны, полученный с помощью анализа звуковых пакетов, составляет 5 с. Процентное отклонение от периода, полученного по данным измерения CTD, составило +9 %, что указывает на приемлемую точность при использовании данного метода в целях изучения параметров морского волнения и для дальнейшего усовершенствования, автоматизации и включения в имеющуюся программу мониторинга береговой зоны.

Следует отметить, что представленный метод имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при его применении. Работоспособность метода в текущей реализации была проверена для ветровых волн с периодами в диапазоне 3–8 с. Его применимость для более короткопериодного (<2 с) или длиннопериодного (>10 с) волнения требует дополнительной верификации. Расстояние от микрофона до зоны обрушения, при котором возможна надежная регистрация сигнала, определяется затуханием звука в воздушной среде, а также уровнем фонового акустического шума (ветер, антропогенные источники). При увеличении дистанции сигнал может оказаться ниже порога детектирования. Тип пляжа влияет на характер обрушения и, следовательно, на спектральные характеристики генерируемого шума. Эти ограничения не снижают ценности метода как дополнительного инструмента мониторинга, но определяют направления его дальнейшего развития и совершенствования.

Описанный метод позволяет минимизировать необходимость установки фиксирующих приборов непосредственно в водной среде, что особенно важно для оперативного мониторинга в удаленных или труднодоступных районах. Такой подход может быть полезен для задач океанологического мониторинга, прогноза береговых процессов и оценки экологического состояния акваторий.

Полученные результаты подчеркивают перспективность интеграции пассивных акустических измерений с традиционными методами для решения гидрофизических

задач. В дальнейшем это позволит развивать новые подходы к изучению параметров морского волнения и связанных с ним процессов.

Благодарности. Анализ данных проведён в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Авторы искренне благодарны Горячеву Д. К., выпускнику Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (г. Калининград), за выполнение полевых работ и первичную обработку данных, и сожалеют, что по независящим от них причинам он не смог принять участие в написании данной статьи. Авторы также выражают благодарность юным добровольным помощникам, Алисе и Семену Степановым, за участие в работе по оценке заплеска волн. Авторы искренне признательны двум анонимным рецензентам, чьи замечания существенно улучшили качество представленного текста.

Список литературы

1. *Айбулатов Н. А.* Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 271 с.
2. *Бобыкина В. П., Чубаренко Б. В., Килесо А. В.* Рекреационные ресурсы Балтийской косы: от мониторинга к действию // Природа. 2026. № 7 (1331). С. 106–113. EDN: XCSOHX. https://doi.org/10.7868/S0032874X2607008X
3. *Гуреев М. Ю., Канев Н. Г., Крайнов Е. Ю.* Подводный шум прибоя в спокойном море // Акустический журнал. 2002. Т. 48. № 6. С. 836–838.
4. *Зенкович В. П., Попов Б. А.* Морская геоморфология. Терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия, определения. М.: Мысль, 1980. 280 с. https://www.geokniga.org/books/14822
5. *Ивонин Д. В., Мысленков С. А., Чернышов П. В., Архипкин В. С., Телегин В. А., Куклев С. Б., Чернышова А. Ю., Пономарев А. Ю.* Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования: первые результаты // Проблемы региональной экологии. 2013. №. 4. С. 172–183. EDN: RNETIN
6. *Кузнецова О., Сапрыкина Я., Трифонова Е.* Экспериментальные исследования влияния волнения на деформации рельефа дна береговой зоны моря // Процессы в геосредах. 2015. № 2 (4). Москва, 2015. С. 66–74. EDN: VDGWEX
7. *Лобач В. Т.* Дистанционные измерения направления распространения и степени анизотропности морского волнения в декаметровом диапазоне радиоволн // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 11 (148). С. 8–15. EDN: RLEEUN
8. *Медведева А. Ю., Мысленков С. А., Медведев И. П., Архипкин В. С., Кречик В. А., Добролюбов С. А.* Моделирование ветрового волнения в Балтийском море на прямоугольной и неструктурной сетках на основе реанализа NCEP/CFSR // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 362. С. 37–54. EDN: XBWOVN
9. *Мысленков С. А., Пищальник В. М., Кондрашов А. А., Купцова О. В., Архипкин В. С., Латковская Е. М.* Анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива (Охотское море) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 1 (395). С. 118–130. EDN: ACUVAZ. https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-118-130

10. *Титов Л. Ф.* Ветровые волны. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1969. 296 с. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-503191645.pdf
11. Zoom H2n. Портативный мини-рекордер с двумя X/Y микрофонами. https://clck.ru/3Et5v8 (дата обращения: 27.11.2024).
12. *Abercromby R.* Observations on the height, length, and velocity of ocean waves // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1888. Vol. 25. No. 155. P. 263–269. https://doi.org/10.1080/14786448808628182
13. Audacity. Multi-track audio editor and recording tool. https://www.Audacityteam.org (дата обращения: 26.11.2024).
14. *Blackman R. B. and Tukey J. W.* The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering. Part I // Bell System Technical Journal. 1958. No. 37. P. 185–282. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1958.tb03874.x
15. *Boldyrev V., Bobykina V.* The Coasts of the Vistula and Curonian Spits As Transboundary Territory In: Transboundary waters and basins in the South-Eastern Baltic / B. V. Chubarenko (Ed). Kalininhgrad: Terra Baltica, 2008. P. 226–238. https://atlantic.ocean.ru/images/publ/Transboundar.pdf?ysclid=mt19a59g1c152588711
16. *Bolin K., Åbom M.* Air-borne sound generated by sea waves // The Journal of the Acoustical Society of America. 2010. Vol. 127. No. 5. P. 2771–2779. https://doi.org/10.1121/1.3327815
17. *Dallas C., Tollefsen C.* Physical mechanisms underlying the acoustic signature of breaking waves // Canadian Acoustics. 2015. Vol. 43. No. 3. https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2779
18. *Deane G. B., Stokes M. D.* Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves // Nature. 2002. Vol. 418. P. 839–844. https://doi.org/10.1038/nature00967
19. European Union-Copernicus Marine Service. Baltic Sea Wave Analysis and Forecast. Published online 2020. https://doi.org/10.48670/moi-00011
20. *Fetisov S., Chubarenko I.* Marine Litter Stormy Wash-Outs: Developing the Neural Network to Predict Them // Pollutants. 2021. Vol. 1. P. 156–168. EDN: HESKOC. https://doi.org/10.3390/pollutants1030013
21. *Froude W.* Supplementary note by Mr. Froude to his remarks on Professor Rankinc's paper // Trans. INA. 1865. Vol. 6.
22. *Kanasewich E. R.* Time sequence analysis in geophysics (2d rev. ed.). The University of Alberta Press. 1975. P. 106–108. https://archive.org/details/timesequenceanal0000kana
23. *Manasseh R., Babanin A. V., Forbes C., Rickards K., Bobevski I., Ooi A.* Passive Acoustic Determination of Wave-Breaking Events and Their Severity across the Spectrum // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2006. Vol. 23. P. 599–618. https://www.doi.org/10.1175/JTECH1853.1
24. *Martins K.* Wave transformation in the surf-zone / University of Bath. UK. 2017. 220 p.
25. *Parikh R., Sundar H., Sun M., Wang C., Matsoukas S.* Impact of Acoustic Event Tagging on Scene Classification in a Multi-Task Learning Framework // arXiv preprint arXiv:2206.13476. 2022. https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.13476
26. *Passaro M., Hemer M. A., Quartly G. D., Schwatke C., Dettmering D., Seitz F.* Global coastal attenuation of wind-waves observed with radar altimetry // Nature Communications. 2021. Vol. 12. No. 1. EDN: XARNVA. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23982-4
27. *Sokolov A., Chubarenko B.* Numerical simulation of dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone of the south-eastern Baltic // Baltica. 2018. Vol. 31. No. 1. P. 13. EDN: BXHVTG. https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.02
28. *Soomere T.* Numerical simulations of wave climate in the Baltic Sea: a review // Oceanology. 2023. Vol. 65. No. 1. P. 117–140. EDN: KAWZNE. https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.004

29. *Titchenko Y. A., Karaev V. Y.* The method of determining the sea-wave parameters by using a modified acoustic wave gauge // Radiophysics and Quantum Electronics. 2013. Vol. 55. No. 8. P. 493–5010. EDN: RFDASB. https://doi.org/10.1007/s11141-013-9385-5
30. *Tollefsen C., Byrne B.* Dependence of airborne surf noise on wave height // Canadian Acoustics. 2011. Vol. 39. No. 3. P. 210–211. https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2485
31. *Shabani B., Nielsen P., Baldock T.* Direct measurements of wind stress over the surf zone // Journal of Geophysical Research. 2014. Vol. 119. No. 5. P. 2949–2973. https://doi.org/10.1002/2013JC009585
32. *Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., van der Walt S. J., Brett M., Wilson J., Millman K. J., Mayorov N., Nelson A. R. J., Jones E., Kern R., Larson E., Carey C. J., Polat İ., Feng Y., Moore E. W., VanderPlas J., Laxalde D., Perktold J., Cimrman R., Henriksen I., Quintero E. A., Harris C. R., Archibald A. M., Ribeiro A. H., Pedregosa F., van Mulbregt P.* SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. No. 17 (3). P. 261–272. EDN: OFXSGB. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
33. *Wilcoxon F.* Individual Comparisons by Ranking Methods // Biometrics Bulletin. 1945. Vol. 1. P. 80–83. https://doi.org/10.2307/3001968

Статья поступила в редакцию 14.05.2026, одобрена к печати 18.08.2026.
Для цитирования: *Чубаренко Б. В., Фетисов С. В.* Оценка периода прибрежного волнения по акустическим данным шума моря // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 3. С. 129–146. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).7

ANALYSIS OF THE COASTAL WAVE PERIOD BASED ON ACOUSTIC MEASUREMENTS OF SEA NOISE

B. V. Chubarenko, S. V. Fetisov

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: chuboris@mail.ru

This paper presents the results of an experimental study that tested a remote sensing method for analyzing wind wave parameters using shore sea noise measurements. This method involves recording and processing sound signals generated by breaking waves in the surf zone. The acoustic measurement results were compared with data obtained by a CTD pressure sensor during an expedition to the Baltic Spit on July 5, 2024, as well as with results from computational methods. The wave period obtained from the sea noise recording was consistent with estimates obtained through spectral analysis of in situ data (5.0 ± 0.2 sec and 4.6 ± 0.7 sec). This illustrates the feasibility of using the proposed method to remotely monitor shore sea wave parameters when visual observations or instrument installation in the water are impossible.

Keywords: sea noise, wind waves, sea waves, acoustic measurements, CTD sounding, remote monitoring

Acknowledgement: The data analyses was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme

No. FMWE-2024-0025). Authors deeply thanks to Danila Goryachev, a graduate of Immanuel Kant Baltic Federal University, for field measurements and primary processing of data. They regret that, due to reasons beyond their control, he was unable to participate in writing of this article. The authors appreciate young volunteers, Alisa and Semyon Stepanov, for their participation in assessing wave splash, and two anonymous reviewers for comments helped to considerably improve the text.

References

1. Aybulatov, N. A. 1990: *Dynamics of solid matter in the shelf zone*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 271 p.
2. Abercromby, R. 1888: *Observations on the height, length, and velocity of ocean waves*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. **25** (155), 263–269, https://doi.org/10.1080/14786448808628182
3. *Audacity*. Multi-track audio editor and recording tool. https://www.Audacityteam.org (дата обращения: 26.11.2024).
4. Blackman, R. B. and J. W. Tukey, 1958: The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering. Part I. *Bell System Technical Journal*, **37**, 185–282, https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1958.tb03874.x
5. Bobykina, V. P., B. V. Chubarenko, and A. V. Kileso, 2026: Recreational resources the baltic spit: from monitoring to action. *Priroda*, **7** (1331), 106–113, EDN: XCSOHX, https://doi.org/10.7868/S0032874X2607008X
6. Boldyrev, V. and V. Bobykina, 2008: The Coasts of the Vistula and Curonian Spits As Transboundary Territory. In: *Transboundary waters and basins in the South-Eastern Baltic*, Kalininhgrad, Terra Baltica, 226–238, https://atlantic.ocean.ru/images/publ/Transboundar.pdf?ysclid=mt19a59g1c152588711
7. Bolin, K. and M. Åbom, 2010: Air-borne sound generated by sea waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **127** (5), 2771–2779, https://doi.org/10.1121/1.3327815
8. Dallas, C. and C. Tollefsen, 2015: Physical mechanisms underlying the acoustic signature of breaking waves. *Canadian Acoustics*, **43** (3), https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2779
9. Deane, G. B. and M. D. Stokes, 2002: Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves. *Nature*, **418**, 839–844, https://doi.org/10.1038/nature00967
10. *European Union-Copernicus Marine Service. Baltic Sea Wave Analysis and Forecast*. Published online 2020. https://doi.org/10.48670/moi-00011
11. Fetisov, S. and I. Chubarenko, 2021: Marine Litter Stormy Wash-Outs: Developing the Neural Network to Predict Them. *Pollutants*, 1, 156–168, EDN: HESKOC, https://doi.org/10.3390/pollutants1030013
12. Froude, W., 1865: Supplementary note by Mr. Froude to his remarks on Professor Rankinc's paper. *Trans. INA*, **6**.
13. Gureev, M. Yu., N. G. Kanev, and E. Yu. Krainov, 2002: Shore Noise in a Calm Sea. *Acoustical Physics*, **48** (6), 836–838.
14. Ivonin, D. V. et al., 2013: Wind wave monitoring system in the coastal zone of the Black Sea based on radar, direct observations and modeling: first results. *Problems of Regional Ecology*, **4**, 172–183, EDN: RNETIN
15. Kanasewich, E. R., 1975: *Time sequence analysis in geophysics* (2nd rev. ed.). The University of Alberta Press, 106–108, https://archive.org/details/timesequenceanal0000kana

16. Kuznetsova, O., Ya. Saprykina, and E. Trifonova, 2015: Experimental studies of the effect of wave action on bottom topography deformations in the coastal zone of the sea. *Processes in Geomedia: Collection of Scientific Articles*. IPMech RAS. Moscow, 66–74, EDN: VDGWEX
17. Lobach, V. T., 2013: Remote measurements of propagation direction and anisotropy degree of sea waves in the decameter range of radio waves. *Proceedings of Southern Federal University. Technical Sciences*, **11** (148), 8–15, EDN: RLEEUN
18. Manasseh, R., A. V. Babanin, C. Forbes, K. Rickards, I. Bobevski, and A. Ooi, 2006: Passive Acoustic Determination of Wave-Breaking Events and Their Severity across the Spectrum. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 599–618, https://www.doi.org/10.1175/JTECH1853.1
19. Martins, K., 2017: *Wave transformation in the surf-zone*. University of Bath. UK, 220 p.
20. Medvedeva, A. Yu., S. A. Myslenkov, I. P. Medvedev, V. S. Arkhipkin, V. A. Krechik, and S. A. Dobrolyubov, 2016: Modeling of wind waves in the Baltic Sea on rectangular and unstructured grids based on NCEP/CFSR reanalysis. *Proceedings of the Russian Hydrometeorological Center*, 362, 37–54, EDN: XBWOVN
21. Myslenkov, S. A., V. M. Pishchalnik, and A. A. Kondrashov et al., 2025: Analysis of sea level measurements and wind wave parameters in Aniva Bay (sea of Okhotsk). *Hydrometeorological Research and Forecasting*, **1** (395), 118–130, EDN: ACUVAZ, https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-118-130
22. Parikh, R., H. Sundar, M. Sun, C. Wang, and S. Matsoukas, 2022: *Impact of Acoustic Event Tagging on Scene Classification in a Multi-Task Learning Framework*, arXiv preprint arXiv:2206.13476, https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.13476
23. Passaro, M., M. A. Hemer, G. D. Quartly, C. Schwatke, D. Dettmering, and F. Seitz, 2021: Global coastal attenuation of wind-waves observed with radar altimetry. *Nature Communications*, **12** (1), EDN: XARNVA, https://doi.org/10.1038/s41467-021-23982-4
24. Shabani, B., P. Nielsen, and T. Baldock, 2014: Direct measurements of wind stress over the surf zone. *Journal of Geophysical Research*, **119** (5), 2949–2973, https://doi.org/10.1002/2013JC009585
25. Sokolov, A. and B. Chubarenko, 2018: Numerical simulation of dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone of the south-eastern Baltic. *Baltica*, **31** (1), 13, EDN: BXHVTG, https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.02
26. Soomere, T., 2023: Numerical simulations of wave climate in the Baltic Sea: a review. *Oceanology*, **65** (1), 117–140, EDN: KAWZNE, https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.004
27. Titov, L. F., 1969: *Wind waves*. Leningrad, Hydrometeorological Publishing House, 296 p., http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-503191645.pdf
28. Titchenko, Y. A. and V. Y. Karaev, 2013: The method of determining the sea-wave parameters by using a modified acoustic wave gauge. *Radiophysics and Quantum Electronics*, **55** (8), 493–5010, EDN: RFDASB, https://doi.org/10.1007/s11141-013-9385-5
29. Tollefsen, C. and B. Byrne, 2011: *Dependence of airborne surf noise on wave height*. Canadian Acoustics. **39** (3), 210–211, https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2485
30. Virtanen, P., R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S. J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K. J. Millman, N. Mayorov, A. R. J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C. J. Carey, I. Polat, Y. Feng, E. W. Moore, J. VanderPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E. A. Quintero, C. R. Harris, A. M. Archibald, A. H. Ribeiro, F. Pedregosa, and P. van Mulbregt, 2020: SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, **17** (3), 261–272, EDN: OFXSGB, https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
31. Wilcoxon, F., 1945: Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, **1**, 80–83, https://doi.org/10.2307/3001968

32. Zenkovich, V. P. and B. A. Popov, 1980: Marine geomorphology. Terminological reference book. *Coastal zone: processes, concepts, definitions*. Moscow, Mysl', 280 p., https://www.geokniga.org/books/14822
33. *Zoom H2n*. Portativnyy mini rekorder s dvumya X/Y mikrofonami [Portable mini recorder with two X/Y microphones]: website. https://clck.ru/3Et5v8 (accessed: 27.11.2024).

Submitted 14.05.2026, accepted 18.08.2026.
For citation: Chubarenko, B. V. and S. V. Fetisov, 2026 Analysis of the coastal wave period based on acoustic measurements of sea noise. *Journal of Oceanological Research*, **54** (3), 129–146, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).7

基于海洋噪声声学数据的沿岸波浪周期估算

B. V. Chubarenko, S. V. Fetisov

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编 : *117997, Russia,*
电子邮件 : *chuboris@mail.ru*

本文介绍了利用岸边可听的海洋噪声测量来远程分析风浪参数方法的实验结果。该方法基于对破波带内破碎波浪产生的声音信号的记录与处理。将声学测量结果与2024年7月5日在波罗的海沙嘴 (加里宁格勒州) 实地考察中通过计算方法及CTD探头压力传感器测量获得的波浪数据进行了比较。由海洋噪声记录得到的波浪周期与现场数据谱分析估算值在可接受的精度范围内吻合 (5.0±0.2 s 与 4.6±0.7 s) , 这表明在无法进行目视观测或无法在水下安装仪器的条件下 , 所提出的方法可应用于沿岸带波浪参数的远程监测。

关键词 : 海洋噪声 , 风浪 , 海浪 , 声学测量 , CTD剖面 , 远程监测

致谢 : 本研究在俄罗斯联邦科学与高等教育部下达给Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences的国家任务 (课题编号 : FMWE-2024-0025) 框架内完成。作者衷心感谢康德波罗的海联邦大学 (加里宁格勒) 毕业生D. K. Goryachev在海洋噪声记录及其初步处理方面所做的工作 , 并对因非可控原因未能邀请其参与本文撰写表示遗憾。作者同时感谢青少年志愿助手Alisa和Semen Stepanov在波浪爬高评估工作中的参与。作者诚挚感谢两位匿名审稿人 , 他们的意见显著提升了本文的质量。