

АНАЛИЗ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЗАЛИВЕ АНИВА ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. А. Мысленков^{1,2,3} , В. М. Пищальник^{1,4} , В. С. Архипкин^{1,2} , Е. М. Латковская¹ 

¹ Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³ Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

⁴ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

* **Контакт:** Станислав Александрович Мысленков, stasocean@gmail.com

В Охотском море в заливе Анива расположен один из карбоновых полигонов, на котором проводятся исследования баланса парниковых газов. Ветровое волнение играет важную роль в энергетическом, вещественном и газовом обмене в системе океан-атмосфера и океан-суша, обеспечивая перенос вещества и газов между всеми биотическими и абиотическими компонентами. В данной работе представлен анализ высоты, периода и длины волн на основе базы данных моделирования волнения с 1979 по 2023 год. Анализируются карты распределения основных параметров и их статистических распределений. Представлены розы волнения для нескольких точек в разных частях залива. Средняя многолетняя высота значительных волн составляет до ~ 0,5 м в северной части залива и до ~ 1 м в южной. Максимальная высота значительных волн достигает 8,5 м в южной части залива и около ~ 4–5 м в северной. Наиболее волноопасными направлениями для залива являются юго-запад, юг и юго-восток.

Ключевые слова: залив Анива, Охотское море, ветровое волнение, моделирование волнения, карбоновый полигон.

Цитирование: Мысленков, С. А., В. М. Пищальник, В. С. Архипкин, Е. М. Латковская
Анализ ветрового волнения в заливе Анива по данным моделирования // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES3012. — DOI: 10.2205/2025es000957 — EDN: KTQGSC

1. Введение

Залив Анива расположен на юге острова Сахалин и является северной частью пролива Лаперуза в зоне взаимодействия вод Охотского и Японского морей. Залив имеет важное экономическое, транспортное и рыбохозяйственное значение, в том числе в воспроизводстве ценных видов рыб и беспозвоночных [Аминина и др., 2014; Дылдин и др., 2020; Каев и др., 2024; Низяев, 2022; Филобокова и Жданкина, 2020]. На побережье залива расположены крупные гидротехнические сооружения, такие как: морской порт Корсаков, терминал по отгрузке нефти и сжиженного природного газа в порту Пригородное, которые являются потенциальными источниками техногенного загрязнения морских вод. Также залив Анива является перспективной акваторией для развития марикультуры [Maslennikov, 2008]. Данные о ветровом волнении на акватории залива необходимы для решения различных инженерных задач, связанных с судоходством, строительством гидротехнических сооружений и прочих задач.

С 2021 года в рамках проекта Карбоновые полигоны России [Carbon ..., 2024] в Сахалинской области функционирует карбоновый полигон «Сахалин», морские площадки которого расположены в заливе Анива. Некоторые результаты по анализу гидрохимической структуры вод в заливе Анива приведены в работах [Леонов и др., 2023; Pishchalnik et al., 2024]. В заливе Анива проводятся работы по оценке фоновых значений поглощающей способности CO₂ морскими экосистемами, включая эмиссию парниковых

<https://elibrary.ru/KTQGSC>

Получено: 19 августа 2024 г.

Принято: 20 марта 2025 г.

Опубликовано: 16 июня 2025 г.



© 2025. Автор.

газов от штормовых выбросов макрофитов, в массе произрастающих в прибрежной акватории [Завьялов и др., 2023; Леонов и др., 2023]. Так, в 2022 г. общая площадь берега, занятая штормовыми выбросами морских макрофитов, составила 1,7 млн м², общий объем выбросов оценен в 172 640 м³ [Завьялов и др., 2023]. Внутри валов, высота которых достигала более 1 м, складывались анаэробные условия с выделением метана при разложении органического вещества. Ежегодные расчетные объемы эмиссии CO₂ и CH₄ на побережье зал. Анива от разложения выброшенных макрофитов в аэробных и анаэробных условиях составляют 2028 т CO₂ и 10 т CH₄ соответственно [Завьялов и др., 2023]. Результаты исследований на других карбоновых полигонах России представлены в работах [Напреенко и др., 2022; Abakumov and Polyakov, 2021; Ostrovskii et al., 2022].

Ветровое волнение во многом определяет интенсивность перемешивания верхнего слоя вод, энергетический и газовый обмен между океаном и атмосферой [Zhao et al., 2003]. Также под действием волн формируются береговые валы из морских макрофитов, поэтому данные о волновом климате залива Анива необходимы для расчетов, связанных с оценками суммарного потока парниковых газов, в том числе при использовании гидродинамических и биогеохимических моделей.

Залив Анива имеет размеры приблизительно 100 на 100 км и длину береговой линии около 230 км. Глубины в северной части залива составляют 20–50 м, в южной части до 100 м (рис. 1).

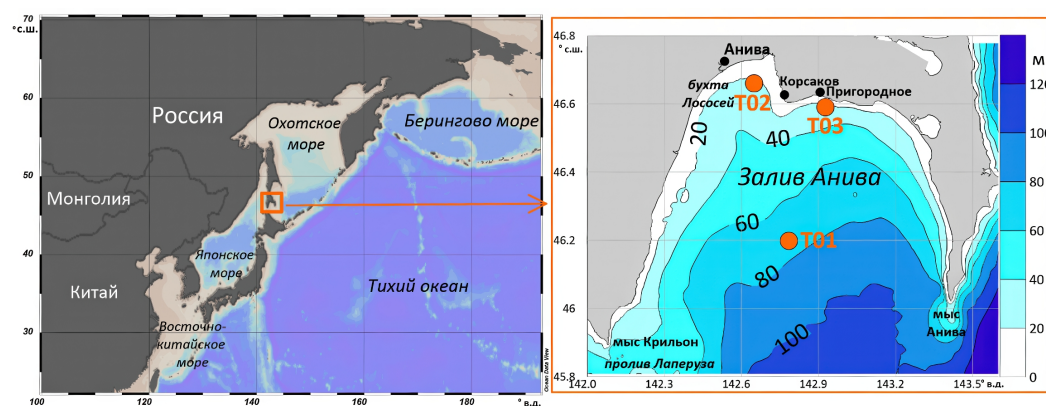


Рис. 1. Район исследований.

Для Охотского моря и острова Сахалин характерна цикличность атмосферных процессов. Наблюдается действие муссона, а также выражена интенсивная циклоническая деятельность [Гидрометеорология ..., 1998]. В конце декабря в заливе Анива начинается интенсивное ледообразование, а полное очищение залива ото льда в среднем наблюдается в первой декаде апреля [Романюк и др., 2022].

Существует ряд работ, где рассматриваются некоторые параметры ветрового волнения Охотского моря и залива Анива. Ветровое волнение в Охотском море наиболее подробно описано в работе [Справочные ..., 2003]. Статистический анализ параметров ветрового волнения выполнен в целом для южной части моря (куда попадает залив Анива), а эта часть включает в себя всю акваторию моря южнее 49° с. ш. Шаг вычислительной сетки составляет ~1,8° [Справочные ..., 2003], поэтому для залива Анива, имеющего пространственный масштаб около 100 на 100 км и закрытого практически со всех направлений, использовать данные этого справочника не представляется возможным. Подробный анализ рядов максимальных высот волн в заливе Анива по данным прибрежных станций Корсаков и Новиково приведен в работе [Хузеева и Като, 2011]. В районе Корсакова по данным ГМС в период сильных штормов высоты максимальных волн достигают порядка 3,0–4,5 м. В осенний период по данным ГМС Новиково наибольший вклад вносит волнение от северо-запада и запада, а максимальные высоты волн составляют 5,0–6,0 м. Также в работе [Хузеева и Като, 2011] представлен анализ сезонной и межгодовой изменчивости сильного волнения.

Необходимо отметить работы, посвященные исследованию особенностей ветровых волн в разных районах Сахалинской области на основе данных измерений датчиками гидростатического давления [Ковалев и др., 2019; Кузнецов и др., 2014b; Мысленков и др., 2025; Плеханов, 2015]. Часть измерений была выполнена непосредственно в заливе Анива, что позволяет оценить некоторые параметры ветрового волнения, хотя основной упор работ сделан на анализ аномальных волн [Зайцев и др., 2011; Кузнецов и др., 2014a]. Ветровое волнение также участвует в формировании штормовых нагонов в Охотском море. Анализ штормовых нагонов при помощи моделирования представлен в работах [Зайцев и др., 2020; Иванова и др., 2015; Като и др., 2011].

В последние годы исследования ветрового волнения выполняются в основном на основе спектральных волновых моделей [Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях, 2013], так как в большинстве районов мирового океана продолжительные ряды инструментальных наблюдений отсутствуют. Карты среднесуточных и максимальных значений для высоты, периода и длины волн в заливе Анива представлены в веб-атласе [Myslenkov et al., 2023b], однако, анализ пространственной изменчивости этих параметров, а также оценки межгодовой изменчивости и повторяемости волн разных направлений для залива ранее не проводились. Данные о штормовой активности в целом для Охотского моря по данным моделирования представлены в работе [Myslenkov et al., 2023a], залив Анива в контексте повторяемости штормов отдельно не рассматривался.

В данной работе выполнен подробный анализ пространственной изменчивости распределения основных параметров ветрового волнения за период с 1979 по 2023 год в заливе Анива на основе данных моделирования. Также приводятся данные о межгодовой изменчивости и оценки повторяемости волн по направлениям для нескольких точек, в том числе для портов Корсаков и Пригородное.

Материалы и методы

Для анализа параметров ветрового волнения использовалась база данных, полученная в работе [Myslenkov et al., 2023a]. База данных создана на основе волновой модели WAVEWATCH III. Сведения о ветре и концентрации льда получены из реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 [Saha et al., 2010, 2014] за период с 1979 по 2023 гг. Вычисления проводились на неструктурной сетке, включающей акваторию Японского, Охотского и Берингова морей, а также всю северную часть Тихого океана (рис. 2). В заливе Анива шаг составляет около ~ 4 км в открытой части и ~ 1 км в прибрежной зоне. Более подробное описание конфигурации модели и особенности проведения экспериментов изложены в работах [Myslenkov et al., 2023a,b]. В данной работе дополнительно были проведены расчеты параметров волн с 2020 по 2023 год по той же технологии.

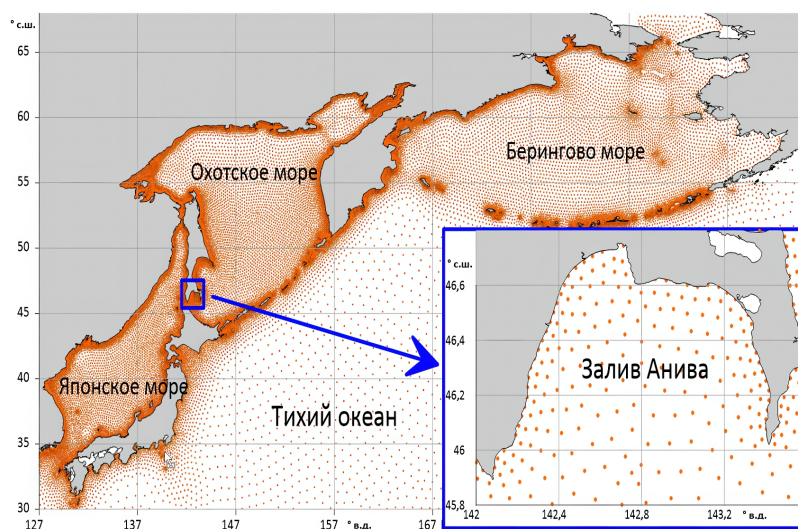


Рис. 2. Вычислительная сетка для моделирования волнения.

Методика и оценки качества моделирования для этой реализации модели приведены в работе [Myslenkov et al., 2023a]. Также были выполнены дополнительные оценки на основе данных измерений на глубине 50 м, в районе города Monbetsu (остров Хоккайдо, 44,32° с. ш., 143,61° в. д.). Данные измерений волнения были получены на сайте проекта Nationwide Ocean Wave Information Network for Ports and Harbours (https://nowphas.mlit.go.jp/pastdata_select). Для анализа был выбран период с 15.06.2018 по 19.01.2019 (рис. 3). При сопоставлении высоты значительных волн по данным прямых измерений и по результатам моделирования получены: коэффициент корреляции $\sim 0,92$, систематическая ошибка 0,09 м, среднеквадратическое отклонение 0,28 м, индекс рассеяния 0,32.

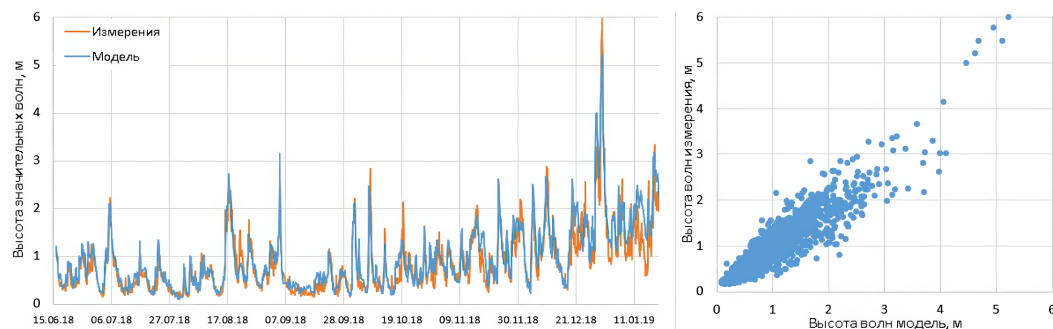


Рис. 3. Сравнение высоты значительных волн по результатам моделирования с данными измерений в районе города Monbetsu (44,32° с. ш., 143,61° в. д.).

В базе данных для каждого узла вычислительной сетки содержатся следующие характеристики ветрового волнения: высота значительных волн, среднее направление волн, период волн (t_{02}), средняя длина волн. Высота значительных волн и другие параметры в модели рассчитываются для интервалов длительностью 15 минут. Временная дискретность параметров в базе данных составляет 3 часа с 1979 по 2023 гг. (всего 45 лет). Вычисление максимальных и средних многолетних значений производилось отдельно для каждого узла сетки по всей выборке 3-х часовых значений (за исключением периода присутствия морского льда, когда параметры волнения равны 0).

Результаты

При анализе ветрового волнения довольно важно иметь статистическую информацию о скорости и направлении ветра. Поэтому на первом этапе проанализируем скорость и направление ветра в заливе Анива по данным инструментальных наблюдений на метеостанции №32156, расположенной в городе Корсаков за период 8.04.2008 по 11.10.2023 с временным шагом 3 часа [Расписание ..., 2004]. На метеостанции Корсаков максимальную повторяемость имеет северо-восточное направление (рис. 4). Также выделяются северные и южные румбы. Однако повторяемость случаев со скоростью ветра от 6 до 8 м/с максимальная для южного направления, а для скоростей более 8 м/с выделяется западное направление.

Так как для острова Сахалин и залива Анива характерна атмосферная циркуляция муссонного типа с периодическим изменением направления господствующих ветров [Гидрометеорология ..., 1998], то более корректно рассматривать розы ветров по сезонам. В работе [Ковалев и др., 2015] по данным метеостанции Корсаков отмечается, что в январе преобладают ветры северных румбов, а в апреле-июле – южных.

По данным реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 с января 1979 по декабрь 2022 с шагом 1 час были построены розы ветров для разных сезонов года для точки в центре залива Анива (координаты 46,2° с. ш. 142,8° в. д., соответствует Т01 на рис. 1). Эта точка расположена в 60 км от Корсаков и характеризует параметры ветра для открытой части залива. В период с октября по март преобладают западное и северо-западное направления (рис. 4). С апреля по сентябрь преобладает юго-западное направление, но в целом по диаграммам почти все румбы с юго-запада до востока имеют высокую

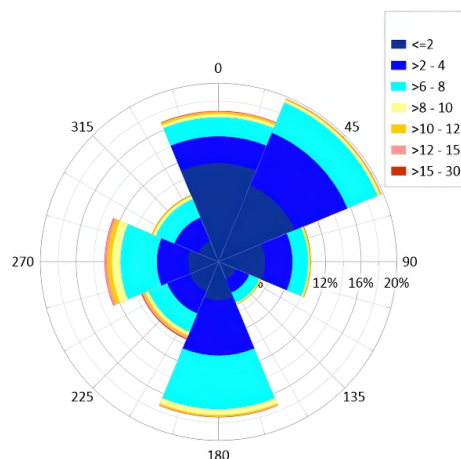


Рис. 4. Роза ветров по данным метеостанции Корсаков с апреля 2008 по апрель 2023.

повторяемость. Наибольшая повторяемость для скорости ветра более 9 м/с наблюдается в период с октября по декабрь (рис. 5). Также необходимо отметить, что по данным реанализа для точки в центре залива северный и северо-восточный румбы имеют небольшую повторяемость, тогда как на метеостанции Корсаков они преобладают.

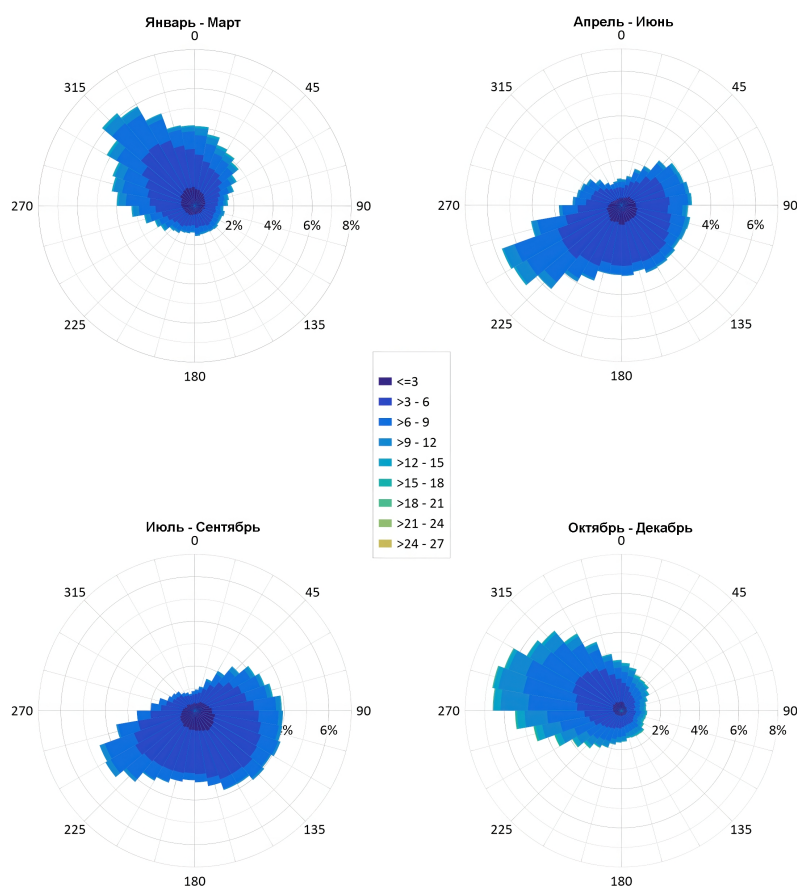


Рис. 5. Роза ветров по данным реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 в точке 46,2°с. ш. 142,8°в. д. для периодов январь–март (а), апрель–июнь (б), июль–сентябрь (в), октябрь–декабрь (г).

При моделировании ветрового волнения крайне важно учитывать ледовую обстановку, так как лед существенно ограничивает распространение волн. Подробный анализ ледовитости залива Анива представлен в работе [Романюк и др., 2022]. В среднем морской лёд в заливе Анива появляется 9 января, а среднееголетняя продолжительность

ледового периода в заливе Анива составляет 88 сут. (рис. 6). Самый продолжительный ледовый сезон длился 145 сут. (2005 г.), а самая минимальная продолжительность ледового периода зафиксирована в мягкую зиму 1991 г., когда лёд на акватории наблюдался в течении 48 сут.

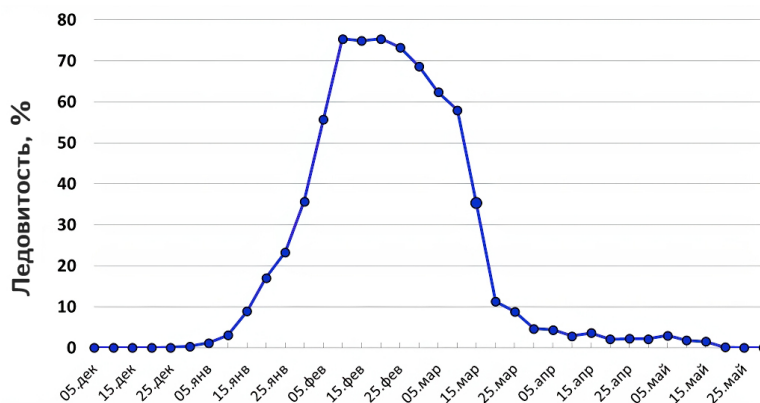


Рис. 6. Внутрисезонная изменчивость ледовитости в заливе Анива за период 1991–2020 гг [Романюк и др., 2022].

Анализ параметров ветрового волнения начнем с карт распределения средней и максимальной высоты значительных волн (рис. 7). Средняя многолетняя высота значительных волн составляет $< 0,5$ м в северной части залива и до ~ 1 м в южной. Максимальная высота значительных волн за весь период моделирования (45 лет), достигает 8,5 м в южной части залива и 4–5 м в северной. Максимальная высота волн уменьшается по мере приближения к берегу, так как при сильных штормах на глубинах 20–30 м происходит существенная диссипация волновой энергии за счет донного трения.

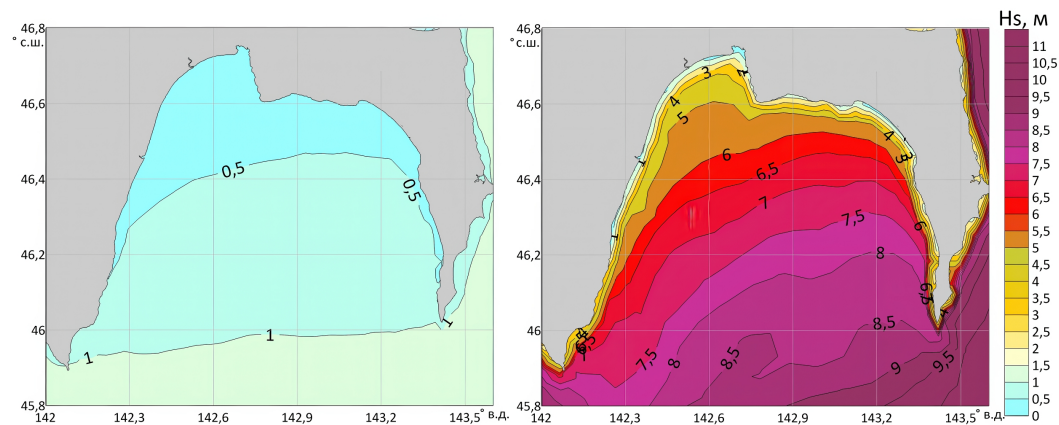


Рис. 7. Средняя многолетняя (слева) и максимальная многолетняя (справа) высота значительных волн за период 1979 по 2023 год.

Средняя длина волн составляет ~ 60 – 70 м на юге залива и уменьшается до 20–30 м в прибрежной мелководной зоне (рис. 8). Средний период составляет 4,0–4,5 с на юге и ~ 3 с на севере залива. Согласно характеру распределения максимальной высоты волн, и с учётом средней многолетней длины и периода волн можно утверждать, что наиболее высокие и длинные волны приходят с юго-востока со стороны Охотского моря. Проникновению волн с юго-запада, которые могли бы приходить от Цусимского пролива через все Японское море препятствуют острова Ребун и Рисири-Дзима, а волны, приходящие с запада, имеют ограниченный разгон. Также следует учитывать тот факт, что высота волн в Охотском море среднем в существенно больше, чем в Японском море, что в частности было показано в работе [Myslenkov et al., 2023a].

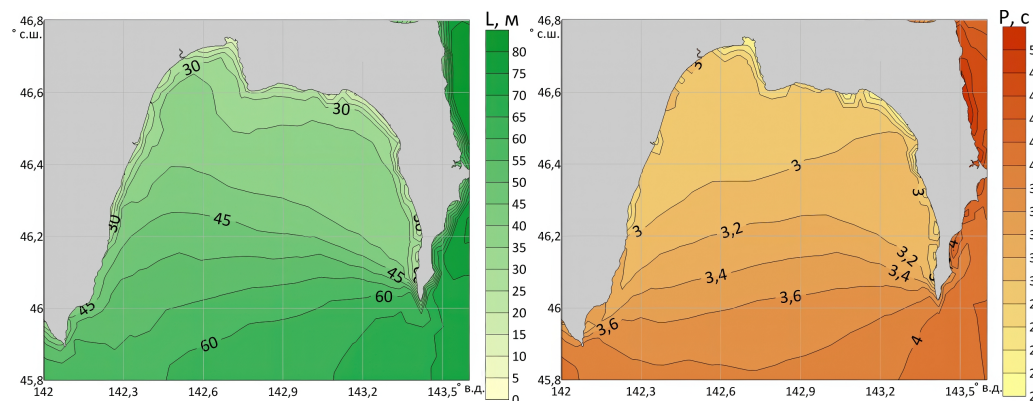


Рис. 8. Средняя многолетняя длина волн(слева) и средний многолетний период волн(справа).

Далее рассмотрим высоту волн в отдельных точках, расположенных в заливе Анива и обозначенных на рис. 1. Точка Т01 расположена в центре залива и глубина в точке составляет 71 м. Эта точка характеризует ветровое волнение на глубокой воде в закрытой с трех направлений части залива (точки южнее по своему режиму уже более соответствуют открытому Охотскому морю). Точка Т02 расположена в мелководной бухте Лососей (глубина в точке 20 м), которая является важным объектом для рыбного промысла и марикультуры. Также в бухте Лососей расположен крупный порт Корсаков. Точка Т03 расположена к югу от порта Пригородное (глубина в точке 20 м), где расположен терминал по отгрузке нефти и сжиженного природного газа.

Высота волн в точке Т01 за весь период моделирования с шагом 3 часа представлена на рис. 9. Как правило, высота волн не превышает 3–4 м, но в некоторые годы бывают шторма с высотой волн до 6–7 м. Максимальная расчетная высота волн 7,2 м отмечалась в октябре 2015 года.

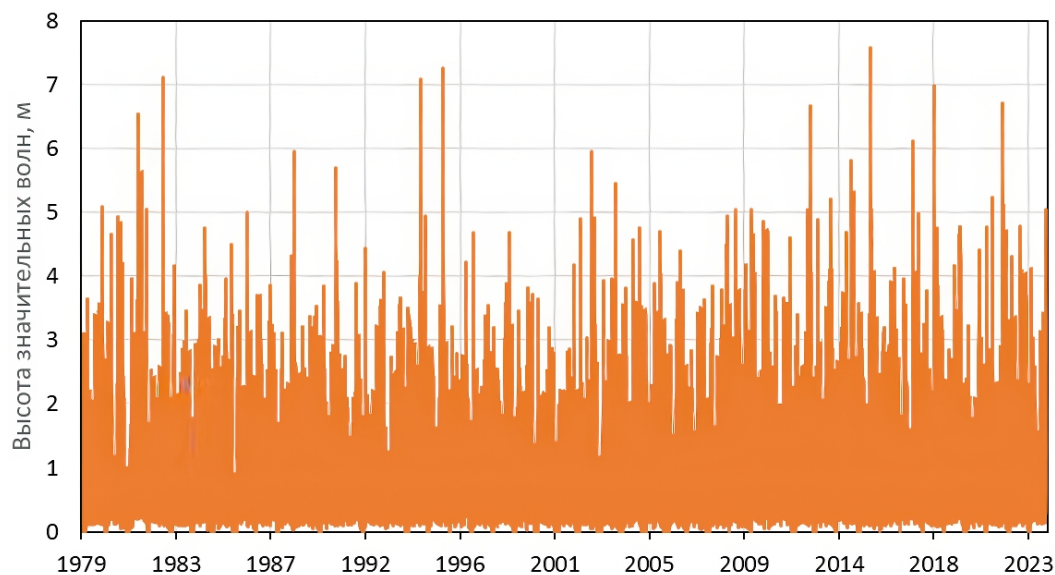


Рис. 9. Высота значительных волн в заливе Анива в точке Т01 с 1979 по 2023 год.

Диаграмма повторяемости волн по направлениям (роза волнения) показывает направления откуда приходят волны (рис. 10). Для точки Т01 в розе волнения присутствуют два основных направления это юго-запад и юго-восток. Высокие волны более 3 м приходят в основном с юго-запада (повторяемость $\sim 0,4\%$) и с юго-востока (повторяемость $0,39\%$). Суммарная по всем направлениям повторяемость высоты волн более 3 м составляет $\sim 1\%$. Намного меньше повторяемость волн с северного направления, что связано с действием муссона и присутствием морского льда. Как видно по сезонным

розам ветра (рис. 5) ветра северо-западных румбов преобладают в период наличия ледяного покрова (январе–марте), что ограничивает развитие волн северного направления. Для точек T02 и T03, расположенных близко к берегу в северной части залива, северных румбов в розе волн практически не наблюдается. В бухте Лососей в точке T02 волны в основном приходят с юга и повторяемость волн в диапазоне 0–1 м составляет 57%. В точке T03 выделяется юго-западное направление (повторяемость волн менее 1 м: 37%) и южное (повторяемость 33%).

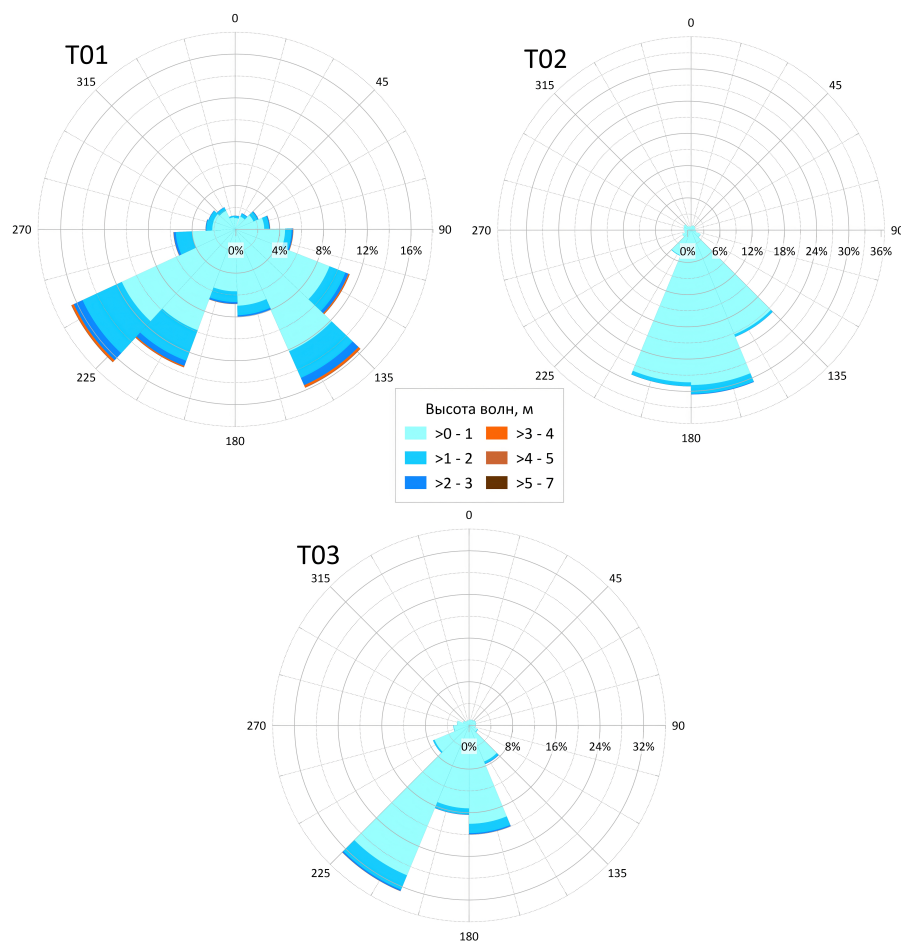


Рис. 10. Повторяемость высот волн по направлениям в трех точках залива Анива за период 1979 по 2023 год.

В таблицах 1–3 представлена статистическая информация о повторяемости высоты волн в зависимости от направления. По этим таблицам можно определить наиболее волноопасные направления для точки и вероятность появления волн определенной высоты. Такая информация, как правило, требуется при для инженерных изысканий [Свод ..., 2004; Справочные ..., 2003]. Для точки T01 наиболее волноопасными направлениями являются юго-запад и юго-восток, для точки T02 – южное, а для T03 юг и юго-восток. Точки T02 и T03 расположены вблизи изобаты 20 м, поэтому там высота значительных волн существенно меньше и повторяемость волн высотой менее 0,5 м составляет ~ 70–80%.

Выводы

На основе результатов моделирования выполнен анализ параметров ветрового волнения в заливе Анива за период с 1979 по 2019 гг. Получены данные о средней и максимальной высоте значительных волн, средней длине и периоде волн, а также рассчитана повторяемость волн по направлениям.

Таблица 1. Повторяемость (%) высоты значительных волн по 8 румбам за безледный период в точке T01

H_{13} , м	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Сумма	Обеспеченность
0–0,5	1,23	1,52	4,49	12,59	7,53	9,54	2,33	1,94	41,17	100,00
0,5–1	0,89	1,58	2,91	9,03	5,04	11,59	3,25	1,95	36,24	58,83
1–1,5	0,27	0,53	0,78	3,01	1,35	4,93	1,37	0,55	12,78	22,59
1,5–2	0,08	0,21	0,31	1,31	0,56	2,26	0,49	0,18	5,42	9,81
2–2,5	0,03	0,08	0,16	0,68	0,25	0,98	0,18	0,06	2,40	4,39
2,5–3	0,01	0,04	0,06	0,35	0,09	0,44	0,05	0,02	1,06	1,99
3–3,5	0,00	0,00	0,04	0,18	0,02	0,20	0,02	0,00	0,48	0,94
3,5–4	0,00	0,00	0,02	0,11	0,01	0,09	0,01	0,00	0,23	0,46
4–4,5	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,00	0,00	0,11	0,23
4,5–5	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,07	0,12
5–5,5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,05
5,5–6	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,03
6–6,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
6,5–7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
7–7,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	2,51	3,97	8,76	27,36	14,86	30,13	7,70	4,70	100	

Таблица 2. Повторяемость (%) высоты значительных волн по 8 румбам за безледный период в точке T02

H_{13} , м	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Сумма	Обеспеченность
0–0,5	1,37	1,63	1,58	19,89	48,01	6,21	2,48	2,27	83,44	100,00
0,5–1	0,08	0,14	0,14	2,78	9,20	0,72	0,12	0,09	13,27	16,56
1–1,5	0,00	0,01	0,01	0,40	2,00	0,09	0,01	0,00	2,54	3,29
1,5–2	0,00	0,00	0,00	0,10	0,45	0,01	0,00	0,00	0,56	0,75
2–2,5	0,00	0,00	0,00	0,02	0,11	0,00	0,00	0,00	0,13	0,19
2,5–3	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06
3–3,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Сумма	1,45	1,78	1,74	23,20	59,82	7,04	2,61	2,36	100	

Таблица 3. Повторяемость (%) высоты значительных волн по 8 румбам за безледный период в точке T03

H_{13} , м	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Сумма	Обеспеченность
0–0,5	1,67	2,05	2,06	7,02	25,87	27,59	4,33	1,88	72,48	100,00
0,5–1	0,28	0,36	0,29	1,68	7,31	8,98	0,65	0,20	19,74	27,52
1–1,5	0,03	0,05	0,06	0,39	2,12	2,52	0,09	0,03	5,31	7,78
1,5–2	0,00	0,01	0,01	0,15	0,75	0,73	0,02	0,00	1,67	2,47
2–2,5	0,00	0,00	0,00	0,06	0,22	0,21	0,00	0,00	0,50	0,80
2,5–3	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,07	0,00	0,00	0,18	0,30
3–3,5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,03	0,00	0,00	0,08	0,12
3,5–4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,04
4–4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
4,5–5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Сумма	1,98	2,47	2,43	9,34	36,44	40,14	5,09	2,12	100	

Установлено, что средняя многолетняя высота значительных волн составляет $\sim 0,5$ м в северной части залива и ~ 1 м в южной. Максимальная высота значительных волн достигает 8,5 м в южной части залива и ~ 4 –5 м в северной. Средняя длина волн на юге залива составляет ~ 60 –70 м, и прибрежной зоне уменьшается до 20–30 м в. Средний период составляет 4,0–4,5 с на юге и ~ 3 с на севере залива.

Наиболее волноопасными направлениями являются юго-запад, юг и юго-восток. Для точки Т01 в центре залива повторяемость высоты волн > 3 м составляет $\sim 1\%$. Точки Т02 и Т03 расположены вблизи изобаты 20 м, поэтому там высота значительных волн существенно меньше и повторяемость волн высотой $< 0,5$ составляет > 70 –80%.

Согласно данным о пространственном распределении параметров ветрового волнения можно утверждать, что наиболее высокие и длинные волны, обгивая мыс Анива, приходят в залив с юго-востока из южной части Охотского моря.

В непосредственной близости от точек Т02 и Т03 расположены важные объекты инфраструктуры (порты Корсаков и Пригородное), поэтому полученные данные о режимных характеристиках ветрового волнения могут быть полезны при эксплуатации имеющейся инфраструктуры и принятии решения о строительстве новых объектов в прибрежной зоне. Данные о максимальной высоте волн на акватории залива Анива могут быть приняты во внимание для расчета прочностных характеристик объектов марикультуры.

Благодарности. Работа В. М. Пищальника выполнена за счет гранта РНФ (проект №24-27-20088). Работа С. А. Мысленкова и В. С. Архипкина выполнена в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета FEFF-2024-0004». Работа Е. М. Латковской выполнена за счет средств программы Сахалинского государственного университета (ПРИОРИТЕТ-2030). Работа с данными метеостанции выполнена при поддержке темы государственного задания 125020501524-9.

Список литературы

- Аминина Н. М., Вишневская Т. И., Галанин Д. А. и др. Характеристика промысловых запасов сахарины японской в заливе Анива (Охотское море) // Известия ТИНРО. — 2014. — Т. 178, № 3. — С. 116–123. — DOI: [10.26428/1606-9919-2014-178-116-123](https://doi.org/10.26428/1606-9919-2014-178-116-123).
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 9: Охотское море. Вып. 1 / под ред. Ф. С. Терзиева. — Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1998.
- Дылдин Ю. В., Орлов А. М., Великанов А. Я. и др. Ихтиофауна залива Анива (остров Сахалин, Охотское море). — Новосибирск : Новосибирский государственный аграрный университет, 2020. — 396 с. — DOI: [10.31677/isbn978_5_94477_271_8](https://doi.org/10.31677/isbn978_5_94477_271_8).
- Завьялов Р. В., Латковская Е. М., Карамышев В. В. и др. Оценка возможных объемов штормовых выбросов макрофитов на побережье зал. Анива (Охотское море) // Уральский научный вестник. — 2023. — Т. 6, № 7. — С. 16–23.
- Зайцев А. И., Малашенко А. Е., Пелиновский Е. Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2011. — Т. 4. — С. 35–42.
- Зайцев А. И., Пелиновский Е. Н., Доган Д. и др. Численное моделирование штормового нагона 15 ноября 2019 года на юге острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. — 2020. — Т. 36, № 4. — С. 396–406. — DOI: [10.22449/0233-7584-2020-4-396-406](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-396-406).
- Иванова А. А., Архипкин В. С., Мысленков С. А. и др. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2015. — № 3. — С. 41–49. — EDN: [UJXNXV](https://www.edn.ru/ujxnxv/).
- Каев А. М., Дзен Г. Н., Игнатьев Ю. И. и др. Оценка численности покатной молоди горбуши в реках островов Сахалин и Итуруп в 2023 г. // Бюл. №18 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — 2024. — № 18. — С. 209–220. — DOI: [10.26428/losos_bull18-2024-209-220](https://doi.org/10.26428/losos_bull18-2024-209-220).
- Като Э., Любичкий Ю. В., Шевченко Г. В. Экстремальные высоты штормовых нагонов на побережье о. Сахалин // Мореходство и морские науки – 2011: избранные доклады III Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. — Южно-Сахалинск : СахГУ, 2011. — С. 177–193.

- Ковалев Д. П., Ковалев П. Д., Хузеева М. О. Особенности морского волнения у юго-восточного побережья Сахалина при перемещении циклонов над районом наблюдений // Геосистемы переходных зон. — 2019. — Т. 3, № 3. — С. 296–303. — DOI: [10.30730/2541-8912.2019.3.3.296-303](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.296-303).
- Ковалев П. Д., Ковалев Д. П., Шевченко Г. В. Возобновляемые энергетические ресурсы Сахалинской области. — Дальнаука, 2015. — 216 с.
- Кузнецов К. И., Зайцев А. И., Костенко И. С. и др. Наблюдения волн-убийц в прибрежной зоне о. Сахалин // Экологические системы и приборы. — 2014а. — № 2. — С. 33–39. — EDN: [SIWGMN](https://www.edn.ru/SIWGMN).
- Кузнецов К. И., Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. и др. Особенности характеристик ветрового волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по измерениям придонного давления // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2014б. — Т. 50, № 2. — С. 242–250. — DOI: [10.7868/S0002351514020060](https://doi.org/10.7868/S0002351514020060).
- Леонов А. В., Архипкин В. С., Пищальник В. М. и др. Моделирование динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива (Охотское море) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2023. — Т. 78, № 6. — С. 77–85. — DOI: [10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.7](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.7).
- Мысленков С. А., Пищальник В. М., Кондрашов А. А. и др. Анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива (Охотское море) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2025. — Т. 395, № 1. — С. 118–130. — DOI: [10.37162/2618-9631-2025-1-118-130](https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-118-130).
- Напреенко М. Г., Напреенко-Дорохова Т. В., Карелина В. И. и др. Мониторинг видового состава и эколого-ценотических характеристик сфагновых мхов на карбоновом полигоне «Росьянка» (Калининградская область) // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Естественные и медицинские науки. — 2022. — № 1. — С. 73–87. — EDN: [MHDSQQ](https://www.edn.ru/MHDSQQ).
- Низяев С. А. Экологические аспекты многолетнего распределения камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в заливе Анива (о. Сахалин) // Геосистемы переходных зон. — 2022. — Т. 6, № 4. — С. 388–404. — DOI: [10.30730/gtr.2022.6.4.388-404](https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404).
- ООО «Расписание погоды». Погода в 240 странах мира. — 2004. — URL: <https://rp5.ru/> (дата обр. 10.01.2024).
- Плеханов Ф. А. Пространственно-временная изменчивость характеристик волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по данным инструментальных измерений // Ученые записки Сахалинского государственного университета. — 2015. — № 1. — С. 35–38.
- Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е. С. Нестеровой. — Москва : ИГ СОЦИН, 2013. — 295 с.
- Романюк В. А., Пищальник В. М., Шумилов И. В. Особенности ледового режима зал. Анива (Охотское море) как фактор риска при планировании марикультурных хозяйств // Процессы в геосредах. — 2022. — 4(34). — С. 1821–1828. — EDN: [EELHWG](https://www.edn.ru/EELHWG).
- Свод правил по инженерным изысканиям на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. — Москва : Госстрой России, 2004. — 87 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / под ред. Л. И. Лопатухина, А. В. Бухановского, А. Б. Дегтярева и др. — Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2003.
- Филобокова Л. Ю., Жданкина А. Ю. Нефтегазовый комплекс Сахалинской области: состояние, проблемы, вектор стратегического управления // Национальная безопасность и стратегическое планирование. — 2020. — 4(32). — С. 29–35. — DOI: [10.37468/2307-1400-2021-2020-4-29-35](https://doi.org/10.37468/2307-1400-2021-2020-4-29-35).
- Хузеева М. О., Като Э. Характеристики ветрового волнения на побережье о. Сахалин по данным наблюдений береговых гидрометеорологических станций // Мореходство и морские науки – 2011: избранные доклады III Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. — Южно-Сахалинск : СахГУ, 2011. — С. 194–204.
- Abakumov E., Polyakov V. Carbon polygons and carbon offsets: Current state, key challenges and pedological aspects // Agronomy. — 2021. — Vol. 11, no. 10. — DOI: [10.3390/agronomy11102013](https://doi.org/10.3390/agronomy11102013).
- Carbon measurement test areas of Russian Federation. — 2024. — URL: <https://carbon-polygons.ru/en/> (visited on 02/20/2024).
- Maslennikov S. I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints // Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region. — Sapporo : Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008. — P. 89–125.
- Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A., et al. Number of Storms in Several Russian Seas: Trends and Connection to Large-Scale Atmospheric Indices // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023a. — Vol. 23, no. 3. — DOI: [10.2205/2023es000828](https://doi.org/10.2205/2023es000828).

- Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A., et al. Wind waves web atlas of the Russian seas // *Water*. — 2023b. — Vol. 15, no. 11. — DOI: [10.3390/w15112036](https://doi.org/10.3390/w15112036).
- Ostrovskii A. G., Emelianov M. V., Kochetov O. Y., et al. Automated Tethered Profiler for Hydrophysical and Bio-Optical Measurements in the Black Sea Carbon Observational Site // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10, no. 3. — DOI: [10.3390/jmse10030322](https://doi.org/10.3390/jmse10030322).
- Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., et al. Assessment of the Hydrochemical Characteristics of the Carbon Observational Site 'Carbon-Sakhalin' (Aniva Bay, Sea of Okhotsk) // *Sustainability*. — 2024. — Vol. 16, no. 7. — DOI: [10.3390/su16073031](https://doi.org/10.3390/su16073031).
- Saha S., Moorthi Sh., Pan H.-L., et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 2010. — Vol. 91, no. 8. — P. 1015–1058. — DOI: [10.1175/2010bams3001.1](https://doi.org/10.1175/2010bams3001.1).
- Saha S., Moorthi Sh., Wu X., et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2 // *Journal of Climate*. — 2014. — Vol. 27, no. 6. — P. 2185–2208. — DOI: [10.1175/jcli-d-12-00823.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00823.1).
- Zhao D., Toba Y., Suzuki Y., et al. Effect of wind waves on air-sea gas exchange: proposal of an overall CO₂ transfer velocity formula as a function of breaking-wave parameter // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. — 2003. — Vol. 55, no. 2. — P. 478–487. — DOI: [10.3402/tellusb.v55i2.16747](https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16747).

ANALYSIS OF WIND WAVES IN ANIVA BAY BASED ON MODEL RESULTS

S. A. Myslenkov^{1,2,3} , V. M. Pishchal'nik^{1,4} , V. S. Arkhipkin^{1,2} , and E. M. Latkovskaya¹ 

¹ Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

⁴ Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

****Correspondence to:** Stanislav Myslenkov, stasocan@gmail.com

In the Bay of Aniva (Sea of Okhotsk) there is one of the carbon polygons where greenhouse gas balance studies are conducted. Wind waves play an important role in energy, material and gas exchange in the ocean-atmosphere and ocean-land systems, ensuring the transfer of matter and gases between all biotic and abiotic components. This paper presents an analysis of the wave height, period and wavelength based on the database of wave modeling from 1979 to 2019. The maps of the main parameters and their statistical distributions are analyzed. Wind and wave roses are presented for several points in different parts of the bay. The average long-term of significant wave height is up to ~ 0.5 m in the northern part of the bay and up to ~ 1 m in the southern part. The maximum significant wave height reaches 8.5 m in the southern part of the bay and about 4–5 m in the north. The most dangerous areas for waves are the southwest, south and southeast.

Keywords: Aniva Bay, Sea of Okhotsk, wind waves, wave modeling, carbon polygon.

Citation: Myslenkov, S. A., V. M. Pishchal'nik, V. S. Arkhipkin, and E. M. Latkovskaya (2025), Analysis of Wind Waves in Aniva Bay Based on Model Results, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES3012, <https://doi.org/10.2205/2025ES000957>, EDN: KTQGSC

Received: 19 August 2024

Accepted: 20 March 2025

Published: 16 June 2025



© 2025. The Authors.

References

- Abakumov E., Polyakov V. Carbon Polygons and Carbon Offsets: Current State, Key Challenges and Pedological Aspects // *Agronomy*. — 2021. — Vol. 11, no. 10. — DOI: [10.3390/agronomy11102013](https://doi.org/10.3390/agronomy11102013).
- Aminina N. M., Vishnevskaya T. I., Galanin D. A., et al. Description of *Saccharina japonica* commercial stock in the Aniva Bay (Okhotsk Sea) // *Izvestiya TINRO*. — 2014. — Vol. 178, no. 3. — P. 116–123. — DOI: [10.26428/1606-9919-2014-178-116-123](https://doi.org/10.26428/1606-9919-2014-178-116-123). — (In Russian).
- Carbon measurement test areas of Russian Federation. — 2024. — URL: <https://carbon-polygons.ru/en/> (visited on 02/20/2024).
- Dyldin Yu. V., Orlov A. M., Velikanov A. Ya., et al. Ichthyofauna of Aniva Bay (Sakhalin Island, Sea of Okhotsk). — Novosibirsk : Novosibirsk State Agrarian University, 2020. — P. 396. — DOI: [10.31677/isbn978_5_94477_271_8](https://doi.org/10.31677/isbn978_5_94477_271_8). — (In Russian).
- Filobokova L. Y., Zhdankina A. Yu. Oil and gas complex of the Sakhalin region: state, problems, vector of strategic management // *National Security and Strategic Planning*. — 2020. — 4(32). — P. 29–35. — DOI: [10.37468/2307-1400-2021-2020-4-29-35](https://doi.org/10.37468/2307-1400-2021-2020-4-29-35). — (In Russian).
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume 9: Sea of Okhotsk. Issue 1 / ed. by F. S. Terziev. — Saint Petersburg : Gidrometeoizdat, 1998. — (In Russian).
- Ivanova A. A., Arkhipkin V. S., Myslenkov S. A., et al. Modeling of storm surges in the coastal zone of the Sakhalin island // *Lomonosov Geography Journal*. — 2015. — No. 3. — P. 41–49. — EDN: [UJXNXV](https://doi.org/10.2205/2015ES000957) ; (in Russian).
- Kaev A. M., Dzen G. N., Ignatiev Yu. I., et al. Estimation of abundance for migrating juvenile pink salmon in the rivers of Sakhalin and Iturup Islands in 2023 // *Bull. No. 18 Study of Pacific Salmon in the Far East*. — 2024. — No. 18. — P. 209–220. — DOI: [10.26428/losos_bull18-2024-209-220](https://doi.org/10.26428/losos_bull18-2024-209-220). — (In Russian).

- Kato E., Lyubitsky Yu. V., Shevchenko G. V. Extreme heights of storm surges on the coast of Sakhalin Island // Navigation and Marine Sciences - 2011: Selected Papers of the III Sakhalin Regional Marine Scientific and Technical Conference. — Yuzhno-Sakhalinsk : Sakhalin State University, 2011. — P. 177–193. — (In Russian).
- Khuzeeva M. O., Kato E. Characteristics of wind waves on the coast of Sakhalin Island according to observations of coastal meteorological stations // Navigation and Marine Sciences - 2011: Selected Papers of the III Sakhalin Regional Marine Scientific and Technical Conference. — Yuzhno-Sakhalinsk : Sakhalin State University, 2011. — P. 194–204. — (In Russian).
- Kovalev D. P., Kovalev P. D., Khuzeeva M. O. Peculiarities of sea waves near the southeastern coast of Sakhalin Island during cyclones moving above the observation area // Geosystems of Transition Zones. — 2019. — Vol. 3, no. 3. — P. 296–303. — DOI: [10.30730/2541-8912.2019.3.3.296-303](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.296-303). — (In Russian).
- Kovalev P. D., Kovalev D. P., Shevchenko G. V. Renewable energy resources of the Sakhalin region. — Dalnauka, 2015. — P. 216. — (In Russian).
- Kuznetsov K. I., Kurkin A. A., Pelinovsky E. N., et al. Features of wind waves at the southeastern coast of Sakhalin according to bottom-pressure measurements // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2014a. — Vol. 50, no. 2. — P. 213–220. — DOI: [10.1134/S0001433814020066](https://doi.org/10.1134/S0001433814020066).
- Kuznetsov K. I., Zaitsev A. I., Kostenko I. S., et al. Observations of the freak waves in the coastal zone of the Sakhalin island // Ecological Systems and Devices. — 2014b. — No. 2. — P. 33–39. — EDN: [SIWGMN](https://www.edn.ru/SIWGMN) ; (in Russian).
- Leonov A. V., Arkhipkin V. S., Pishchalnik V. M., et al. Modeling the dynamics of dissolved oxygen concentration in waters of the Aniva bay (the Sea of Okhotsk) // Lomonosov Geography Journal. — 2023. — Vol. 78, no. 6. — P. 77–85. — DOI: [10.55959/msu0579-9414.5.78.6.7](https://doi.org/10.55959/msu0579-9414.5.78.6.7). — (In Russian).
- Maslennikov S. I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints // Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region. — Sapporo : Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008. — P. 89–125.
- Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A., et al. Number of Storms in Several Russian Seas: Trends and Connection to Large-Scale Atmospheric Indices // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023a. — Vol. 23, no. 3. — ES3002. — DOI: [10.2205/2023es000828](https://doi.org/10.2205/2023es000828).
- Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A., et al. Wind waves web atlas of the Russian seas // Water. — 2023b. — Vol. 15, no. 11. — P. 2036. — DOI: [10.3390/w15112036](https://doi.org/10.3390/w15112036).
- Myslenkov S. A., Pishchalnik V. M., Kondrashov A. A., et al. Analysis of sea level measurements and wind wave parameters in Aniva bay (Sea of Okhotsk) // Hydrometeorological Research and Forecasting. — 2025. — Vol. 395, no. 1. — P. 118–130. — DOI: [10.37162/2618-9631-2025-1-118-130](https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-118-130). — (In Russian).
- Napreenko M. G., Napreenko-Dorokhova T. V., Karelina V. I., et al. Species composition and habitat ecology of sphagna: Inventory and monitoring programme on the carbon polygon "Rossyanka" (Kaliningrad region, Russia) // Vestnik IKBFU. Natural and medical sciences. — 2022. — No. 1. — P. 73–87. — (In Russian).
- Nizyaev S. A. Ecological aspects of the perennial distribution of the Red King Crab *Paralithodes camtschaticus* in Aniva Bay (Sakhalin Island) // Geosystems of Transition Zones. — 2022. — Vol. 6, no. 4. — P. 388–404. — DOI: [10.30730/gtr.2022.6.4.388-404](https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404). — (In Russian).
- Ostrovskii A. G., Emelianov M. V., Kochetov O. Y., et al. Automated Tethered Profiler for Hydrophysical and Bio-Optical Measurements in the Black Sea Carbon Observational Site // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, no. 3. — P. 322. — DOI: [10.3390/jmse10030322](https://doi.org/10.3390/jmse10030322).
- Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., et al. Assessment of the Hydrochemical Characteristics of the Carbon Observational Site 'Carbon-Sakhalin' (Aniva Bay, Sea of Okhotsk) // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, no. 7. — DOI: [10.3390/su16073031](https://doi.org/10.3390/su16073031).
- Plekhanov F. A. Spatio-temporal variability of wave characteristics off the southeastern coast of Sakhalin Island based on instrumental measurements // Proceedings of Sakhalin University. — 2015. — No. 1. — P. 35–38. — (In Russian).
- Raspisaniye Pogodi Ltd. Weather for 240 countries of the world. — 2004. — URL: <https://rp5.ru/> ; Accessed: 2024-01-10.
- Reference data on wind and wave conditions in the Barents, Okhotsk and Caspian Seas / ed. by L. I. Lopatukhin, A. V. Bukhanovsky, A. B. Degtyarev, et al. — Saint Petersburg : Russian Maritime Register of Shipping, 2003. — (In Russian).
- Regime, diagnosis and forecast of wind waves in the oceans and seas / ed. by E. S. Nesterova. — Moscow : IG SOTSIN, 2013. — P. 295. — (In Russian).
- Romanyuk V. A., Pishchalnik V. M., Shumilov I. V. Features of the ice regime of Aniva bay (sea of Okhotsk) as a risk factor in the planning of mariculture farms // Processes in geoenvironments. — 2022. — 4(34). — P. 1821–1828. — EDN: [EELHWG](https://www.edn.ru/EELHWG) ; (in Russian).

- Saha S., Moorthi Sh., Pan H.-L., et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // Bulletin of the American Meteorological Society. — 2010. — Vol. 91, no. 8. — P. 1015–1058. — DOI: [10.1175/2010bams3001.1](https://doi.org/10.1175/2010bams3001.1).
- Saha S., Moorthi Sh., Wu X., et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2 // Journal of Climate. — 2014. — Vol. 27, no. 6. — P. 2185–2208. — DOI: [10.1175/jcli-d-12-00823.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00823.1).
- SP 11-114-2004. Site investigation on the continental shelf for offshore oil and gas facilities construction. — Moscow : Gosstroy Rossii, 2004. — P. 87. — (In Russian).
- Zaitsev A. I., Malashenko A. E., Pelinovsky E. N. Abnormal Big Waves Near the Southern Coast of Sakhalin Island // Fundamental and Applied Hydrophysics. — 2011. — Vol. 4. — P. 35–42. — (In Russian).
- Zavyalov R. V., Latkovskaya E. M., Karamyshev V. V., et al. Estimation of potential volumes of storm emissions of macrophytes on the coast of Aniva Bay (Sea of Okhotsk) // Ural'skiy nauchnyy vestnik. — 2023. — Vol. 6, no. 7. — P. 16–23. — (In Russian).
- Zaytsev A. I., Pelinovsky E. N., Dogan D., et al. Numerical Simulation of the Storm Surge at the Sakhalin Island Southern Part on November 15, 2019 // Physical Oceanography. — 2020. — Vol. 27, no. 4. — P. 396–406. — DOI: [10.22449/0233-7584-2020-4-396-406](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-396-406).
- Zhao D., Toba Y., Suzuki Y., et al. Effect of wind waves on air-sea gas exchange: proposal of an overall CO₂ transfer velocity formula as a function of breaking-wave parameter // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. — 2003. — Vol. 55, no. 2. — P. 478–487. — DOI: [10.3402/tellusb.v55i2.16747](https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16747).