УДК 551.466.32

doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.124-136

Штормовое волнение на южных Курильских островах по визуальным и инструментальным данным

© 2019 Г. В. Шевченко^{*1,2}, М. О. Хузеева³, В. Е. Ячменев², А. А. Шишкин²

¹Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия ³Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: shevchenko zhora@mail.ru

Проанализированы материалы многолетних визуальных наблюдений за волнением на береговых гидрометеостанциях Южно-Курильск (о. Кунашир) и Малокурильское (о. Шикотан). Показано, что наибольшая интенсивность волнения наблюдается в период с октября по январь. Выявлено резкое увеличение числа экстремальных штормов в последнее десятилетие. Проанализированы материалы инструментальных измерений волновых процессов в бухтах о. Шикотан, включая экстремальные штормы 17–18.12.2014 и 8–9.10.2015 г. На океанской стороне острова, в бухте Димитрова, выявлено существенное различие в преобладающих периодах волнения при летних (7–9 с) и осенних (9–15 с) штормах. Отмечены вариации периода спектрального максимума при экстремальном шторме 17–18.12.2014 г. с 8–9 до 16–18 с, а затем вновь до 10 с по мере развития шторма, а также заметный вклад ветрового волнения с периодами 4–6 с, не наблюдавшийся при более слабых штормах. Обнаружены вариации спектрального максимума волнения в бухте Малокурильская, синхронные с приливом. Выявлено значиительное возрастание энергии в инфрагравитационном диапазоне (30–300 с) при сильных штормах. На диаграммах текущего спектра выделяются полосы на фиксированных частотах, отвечающие резонансным периодам бухт. На фазе наибольшего развития шторма происходит стохастизация волнового поля (спектр приобретает характер белого шума, резонансные пики не выражены).

Ключевые слова: ветровое волнение, шторм, циклон, ветер, порыв, приземное атмосферное давление, визуальные наблюдения, инструментальные измерения.

Storm waves in the South Kuril Island by visual and instrumental data

G.V. Shevchenko^{*1,2}, M.O. Khuzeeva³, V.E. Yachmenev², A.A. Shishkin²

¹Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ³Sakhalin Hydrometeorological Service of Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E mail: characharko, zhoracharail m

**E-mail:* shevchenko_zhora@mail.ru

Data materials of perennial visual wind wave observations at coastal HMS Yuzhno-Kurilsk (Kunashir Island) and Malokurilskoe (Shikotan Island) were analyzed. It has been shown that the highest wave intensity was observed in the period from October to January. A sharp increase in the number of extreme storms in the last decade was revealed. Materials of instrumental measurements of wave processes in the bays of Shikotan Island, including extreme storms of 17–18.12.2014 and 8–9.10.2015 were analyzed. A significant difference in the prevailing wave periods during the summer (7–9 s) and autumn storms (9–15 s) was revealed in Dimitrov's bay on the ocean side of the island. During the extreme storm of 17–18.12.2014 the variations of the spectral peak period of 8–9 up to 16–18 s, and then again to 10 with the development of the storm were found, as well as the significant contribution of wind waves with periods of 4–6 s, which was not observed in the Malokurilskaya Bay. There was a significant increase in wave energy infra-gravity frequency band

Работа выполнена в соответствии с государственной программой ИМГиГ ДВО РАН при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (грант № 18-1-004. Изучение фундаментальных основ взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических процессов различного масштаба в зоне перехода геосфер Дальнего Востока России и восточного сектора Арктики, раздел 2).

(periods of 30–300 s) during strong storms. Maxima in the charts of the current spectrum are allocated at fixed frequencies corresponding to the resonant periods of the bays. The wave field randomization was found during the greatest storm (the spectrum looks like the white noise spectrum, resonance peaks are not expressed). **Keywords**: wind waves, storm, cyclone, wind, gust, surface atmospheric pressure, visual observations, instrumental measurements.

Введение

Данные о ветровом волнении необходимы для решения многих практических задач, таких как обеспечение безопасности судоходства и погрузо-разгрузочных работ в портах, гидротехническое строительство на морских побережьях, изучение абразии берегов и организация берегозащиты и т.д. Характеристики волнения необходимы также для развития теории ветрового волнения применительно к конкретным условиям различных акваторий, усовершенствования методов расчета элементов волн в прибрежной зоне и прогнозирования опасных ситуаций.

На данный момент характер волнового режима в районе Курильских островов слабо изучен. Существует несколько крупных обобщений по данной тематике, например [Атлас..., 1968; Гидрометеорология..., 1998]. Как правило, в таких сводках данные о волнении в прибрежной части не освещены. А распространение волновых характеристик в открытом море на прибрежную зону не вполне корректно в связи с существенной деформацией волн на мелководье, а также из-за сложности учета морфометрических характеристик прибрежной акватории.

В данной работе предпринята попытка анализа сезонной и межгодовой изменчивости сильного волнения на основе данных визуальных наблюдений на двух береговых гидрометеорологических станциях (ГМС) В п.г.т. Южно-Курильск (о. Кунашир) и с. Малокурильское (о. Шикотан, рис. 1А). Кроме того, рассмотрены материалы инструментальных измерений ветрового волнения внутри бухт Малокурильская и Димитрова, расположенных в северной и юго-восточной частях о. Шикотан. Важной особенностью этих измерений была регистрация экстремальных штормов в декабре 2014 и октябре 2015 г.

Продолжительные измерения предоставляли возможность изучения изменчивости характеристик ветрового волнения во времени, формирования инфрагравитационных резонансных колебаний в бухтах и других особенностей, присущих конкретным акваториям. В сжатом изложении результаты этих исследований опубликованы в работах авторов [Ячменев, Хузеева, 2017; Шевченко и др., 2018], здесь они представлены более полно и развернуто.



Рис. 1. Расположение береговых ГМС Южно-Курильск и Малокурильское (А) и автономных регистраторов волновых процессов ИМГиГ ДВО РАН в бухтах Крабовая, Малокурильская, Церковная и Димитрова о. Шикотан (Б).

Материалы наблюдений

Накопленные в Сахалинском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды материалы многолетних наблюдений на прибрежных ГМС за характеристиками ветрового волнения сведены в цифровую базу данных, позволяющую проводить статистический анализ [Хузеева, 2015].

В работе использованы ежедневные данные наблюдений за волнением по двум ГМС, расположенным на побережье южной части Курильской гряды: в п.г.т. Южно-Курильск (о. Кунашир) и с. Малокурильское (о. Шикотан, рис. 1А). Измерения были начаты на первой из них в 1954 г., на второй – в 1955 г. и проводятся по настоящее время.

Наблюдения за волнением на указанных пунктах проводятся в основном визуально. Инструментальные наблюдения производились на ГМС Южно-Курильск в период 1961-1992 гг. с использованием волномераперспектрометра ГМ-12. В целом визуальные наблюдения репрезентативны только для прибрежных акваторий, где расположены пункты наблюдений, они обычно не отражают волновые условия в открытых районах моря, для которых, как правило, используют результаты численного моделирования. В свою очередь, для прибрежных акваторий расчеты ветрового волнения сопряжены с определенными сложностями, и данные береговых станций можно использовать для их корректировки.

ГМС Малокурильское расположена в северо-восточной части о. Шикотан на побережье Южно-Курильского пролива, на возвышенном мысу между бухтами Малокурильская и Хромова. Береговая черта в пункте наблюдений представляет крутой обрыв, глубина моря в месте определения элементов волнения составляет 20–30 м. Станция закрыта для прямого подхода ветровых волн большинства направлений, за исключением восточного и северо-восточного румбов.

ГМС Южно-Курильск находится на юговосточном побережье о. Кунашир, выходящем к Южно-Курильскому проливу. Наблюдения за элементами волн производятся в северной части бухты Южно-Курильская, прикрытой от прямого подхода ветровых волн одноименным мысом. Поэтому высоты волн здесь существенно меньше, чем на станции Малокурильская.

Для обеих станций считалась помесячная повторяемость (%) ветрового волнения и волн зыби и для каждого месяца отдельно формировались диаграммы распределения по градациям высоты (м) и направлениям. Основное внимание было уделено ситуациям, когда в изучаемом районе наблюдались экстремальные штормы.

На о. Шикотан Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН в течение последних нескольких лет проводит инструментальные измерения волновых процессов путем постановки в бухтах Малокурильская и Крабовая со стороны Южно-Курильского пролива и в бухтах Церковная и Димитрова на океанском побережье (рис. 1Б) автономных донных станций с измерителями придонного гидростатического давления. Эти приборы предназначены для регистрации волн цунами, и обычно данные при записи в память усреднялись с периодом 1 мин. Однако в 2014-2015 гг. в некоторых случаях использовались измерители волнения и уровня АРВ К-14 с частотой опроса 1 Гц. Это позволило определять характеристики ветрового волнения (применялась методика пересчета давления на дне к высотам поверхностных волн [Кабатченко и др., 2007]). Положение датчиков внутри сравнительно закрытых бухт еще в большей мере, чем визуальные наблюдения на береговых ГМС, определяет возможность изучения параметров волнения только внутри этих акваторий, поэтому полученные результаты отражают локальные особенности этих характеристик. В то же время измерения вблизи портовых сооружений в бухте Малокурильская позволяют использовать полученные данные для ряда прикладных задач. К тому же инструментальные измерения дают возможность рассмотреть некоторые специфические аспекты, такие как изменчивость высот и периодов волн на различных фазах развития шторма, формирование инфрагравитационных волн (в том числе вариаций интенсивности резонансных колебаний в бухтах при усилении или ослаблении волнения), и т.д. Для решения последней задачи в определенной мере пригодны и материалы наблюдений, полученные с дискретностью 1 мин.

Сезонные и межгодовые вариации параметров волнения

ГМС Малокурильское. С октября по март в районе ГМС Малокурильское преобладает волнение северо-западного румба (в декабре его доля достигает 46.8 %, в январе – 45 %). Средние высоты волн составляют 0.8–1.1 м. Повторяемость сильного волнения (1.5 м и более) в октябре – 15.5 %, в декабре–январе она увеличивается до 34.2 %. Максимальные зарегистрированные высоты волн составили от 10 до 12 м.

В апреле увеличивается доля волнения южного румба (до 22 %), но и северо-западный также вносит значительный вклад (20.5 %) в общую картину. Среднемесячная высота волны составляет 0.8 м. С апреля штормовая активность начинает ослабевать, и к маю повторяемость штормового волнения снижается до 7 %. Однако максимальная высота волны в апреле может достигать 8 м (северо-западного румба).

С мая по сентябрь преобладающим румбом остается южный (до 32 %), величины среднемесячных высот волн составляют 0.4–0.5 м. Летом прибрежная акватория в районе ГМС Малокурильское наиболее спокойная, повторяемость штормового волнения падает до 2–3 %, к сентябрю возрастает до 8.1 %. Максимальные величины в этот период находятся в диапазоне 5–8 м.

ГМС Южно-Курильск. В холодный период (декабрь-март) в районе ГМС Южно-Курильск ветровое волнение распространяется преимущественно с северо-запада (до 49 %). В апреле начинается перестройка атмосферного поля к летнему типу, и на это направление приходится уже 28.5 %, наблюдается усиление волнения южного румба (20.7 %).

Летом преобладает волнение с юга, юговостока и востока, со средними высотами 0.4 м, максимальная зарегистрированная высота волны составляет 2.5 м. В осенний период наибольший вклад вносит волнение с юга и юго-запада, только в ноябре возрастает волнение северо-западного румба. Средние высоты волн увеличиваются до 0.7 м при максимальных высотах 5 м.

Наибольшие высоты волн наблюдаются при штормах восточного направления, когда к рассматриваемому побережью подходят волны со стороны Тихого океана.

По данным ГМС Южно-Курильск, повторяемость штормового волнения в летние месяцы составляет 2–3 %, а в осенние месяцы увеличивается до 13 %.

Удобной количественной характеристикой сильного волнения является число дней с волнением в 4 балла (когда волны хорошо развиты, их высоты 1.25–2.0 м, повсеместно белые барашки, работа маломерного флота прекращается [РД..., 2017]) и более. Для каждой из рассматриваемых станций за многолетний период наблюдений было рассчитано среднее значение количества дней с таким волнением, и распределение этого показателя по месяцам дает представление о сезонной изменчивости штормового волнения (рис. 2).



Рис. 2. Внутригодовая (вверху) и межгодовая изменчивость сильного волнения по визуальным наблюдениям на береговых ГМС Южно-Курильск (о. Кунашир) и Малокурильское (о. Шикотан). По вертикали количество дней с волнением ≥ 4 балла.

Также определялось общее число таких дней за год, что дает представление о межгодовых вариациях интенсивности волнения (рис. 2).

Вариации сильного волнения на исследуемых акваториях имеют хорошо выраженный сезонный ход. Повторяемость сильного волнения по наблюдениям на станции Малокурильское наиболее велика в осеннезимний период (ноябрь–январь): в среднем 12–13 дней с сильным волнением. В более закрытом порту Южно-Курильск максимальная интенсивность волнения наблюдается в осенние месяцы, с сентября по ноябрь, 4–5 дней.

Летние месяцы (июнь–август) в этом районе наиболее спокойные, интенсивность штормового волнения резко падает по сравнению с осенне-зимним периодом в связи со слабовыраженными атмосферными процессами. Количество дней с сильным волнением в этот период снижается в среднем до 1–5 дней, но высоты волн могут достигать значительных величин (3–8 м).

На станции Южно-Курильск наблюдается резкое снижение числа дней с сильным волнением начиная с 1992 г. (рис. 2). Если за 1954–1991 гг. среднее число таких дней составляло 30.7, то за 1992–2016 гг. оно снизилось более чем в 4 раза – до 7.4. Наиболее вероятным объяснением такого резкого изменения (при относительной стабильности показателя на каждом из указанных интервалов) является прекращение на ГМС Южно-Курильск инструментальных наблюдений в 1992 г.

На станции Малокурильское показатель сильного волнения испытывал более значительные колебания (рис. 2). В конце 1950-х годов его значения были самыми высокими (в среднем 120 дней с волнением 4 балла и выше за год), затем было резкое падение в 1960 г. В 1961–1972 гг. наблюдения не производились, а в 1970-е интенсивность волнения была низкой, около 45 дней за год. В следующем десятилетии показатель сильного волнения вырос до 70 дней, а в первой половине 1990-х превысил отметку 100 дней за год. Во второй половине 1990-х число дней с сильным волнением снизилось до 29, а в нынешнем столетии возросло до 63 при сравнительно небольших вариациях.

Наиболее вероятной причиной таких значительных колебаний являются изменения направления траекторий циклонов и обусловленные этим изменения скорости и направления сильных ветров.

Экстремальные штормы на южных Курильских островах

Штормовое волнение в районе южных Курильских островов формируется под воздействием циклонов и тайфунов, образовавшихся в районе, примыкающем к юго-восточной оконечности Азии, и перемещающихся по прилегающей акватории Тихого океана. Большое влияние на формирование штормового волнения оказывают также западные континентальные циклоны, образующиеся над Северным Китаем, Маньчжурией и Забайкальем. Траектории центров этих циклонов проходят с запада на восток, они пересекают о. Сахалин в направлении Охотского и Берингова морей [Гидрометеорология..., 1998].

В последние 10–12 лет случаи прохождения циклонов и тайфунов, сопровождавшихся ураганными ветрами и мощным штормовым волнением, заметно участились. Рассмотрим наиболее опасные ситуации, при которых были отмечены повреждения гидротехнических сооружений, размывы некоторых участков побережья, полотна автомобильной дороги Южно-Курильск – Головнино и иной экономический ущерб.

Шторм 7–10 октября 2006 г. был вызван глубоким циклоном (давление в центре 964–968 гПа, диаметр барического образования около 2400 км), смещавшимся вдоль северо-западной окраины Тихого океана к южным Курильским островам (бывший тайфун «Бебинга»).

Центр циклона располагался в районе Южных Курил, после чего продолжал смещаться в северо-восточном направлении. По данным наблюдений гидрометеостанции Малокурильское, во время наиболее интенсивного шторма 7–8 октября на побережье о. Шикотан отмечался северо-восточный ветер со скоростью 30 м/с, порывы достигали 40 м/с. В Южно-Курильске (о. Кунашир) направление ветра было северо-западное. Высота волнения 7 октября со стороны Южно-Курильского пролива достигала 5 м (по данным наблюдений ГМС Малокурильское).

6-8 января 2007 г. над Южными Курилами прошел глубокий циклон с давлением в центре 950 гПа. Траектория его движения: северо-восточное побережье о. Хонсю – юго-восточное побережье о. Хоккайдо – о. Симушир – далее на восток, в Тихий океан. Максимальная высота волнения 5 м (8 января на ГМС Малокурильское), при северо-западном ветре 22 м/с, с порывами до ураганного – 33 м/с. Были размыты дороги, подтоплен пирс.

Воздействие экстремальных штормов 2006–2007 гг. на побережье о. Шикотан, в частности гибель леса от осолонения почвы в районе бухты Церковная, рассмотрено в работе [Ганзей и др., 2010]. В ней отмечено, что штормы близкой силы наблюдались на этом острове только во второй половине 1950-х годов, около 50 лет подобных событий не отмечалось.

В декабре 2008 г. глубокий циклон с давлением в центре 960 гПа образовался из двух циклонов. 24 декабря один из циклонов вышел с Желтого моря, смещался по Японскому морю и через прол. Лаперуза вышел в югозападную часть Охотского моря. В паре с ним по Тихому океану восточнее о. Хонсю смещался другой циклон, который в дальнейшем (26 декабря) также вышел в Охотское море, где 27 декабря углубился, что привело к усилению ветра над южными Курильскими островами. Медленно заполняясь, он оставался здесь по 29 декабря. Максимальная высота волнения со стороны Южно-Курильского пролива достигала 6 м (ГМС Малокурильское, 27 декабря) при северо-западном ветре со скоростью 27-33 м/с.

9–11 ноября 2010 г. циклон с давлением в центре 975 гПа вышел с Тихого океана через юг Курильских островов к юго-западной части Охотского моря. При этом ветры западной четверти в центральной части Охотского моря и северного направления усилились до 18–23 м/с, в юго-западной части до 25–34 м/с. Высота волнения 10 ноября со стороны Южно-Курильского пролива достигала 5 м (по данным наблюдений ГМС Малокурильское).

16-18 декабря 2014 г. над южными Курильскими островами наблюдался мощный циклон с давлением в центре около 950 гПа (рис. 3). В Южно-Курильске и Курильске 17 декабря ветер усилился до 35-42 м/с, а его порывы достигли 51 м/с. Ни таких низких значений приземного атмосферного давления, ни подобных скоростей ветра (на ГМС Малокурильское порывы ветра достигали 54 м/с) в изучаемом районе не наблюдалось за последние 50 лет. Сильные ветра были вначале восточного, а затем северо-восточного румбов – наиболее волноопасных направлений для Южно-Курильского пролива и расположенных на его побережье населенных пунктов. В течение дня циклон сместился к западу вдоль северо-восточного побережья Хоккайдо. В ночь на 18 декабря он совершил разворот на юго-восток и утром 18 декабря начал отходить в Тихий океан. Высота волнения в бухте Южно-Курильская 17 декабря достигала 4 м – наибольшей величины для данной бухты за весь период наблюдений.



Рис. 3. Космический снимок ИСЗ Aqua за 17 декабря 2014 г., показывающий положение циклона над южными Курильскими островами.

Порт п.г.т. Южно-Курильск и часть населенного пункта, прилегающая к устью р. Серебрянка, и мост через нее были затоплены (рис. 4, 5), на нескольких участках наблюдались размывы автомобильной дороги. Хозяйству района был нанесен существенный материальный ущерб, сравнимый с ущербом от Тохоку-цунами 11.03.2011 г. [Кайстренко и др., 2011]. По экспертной оценке, высота нагонной волны была около 1 м, что также является наибольшим значением за последние 70 лет (береговой самописец уровня моря к этому времени был закрыт). Высота нагона по наблюдениям на береговом мареографе в бухте Малокурильская составила 63 см (рис. 6), что превышало зафиксированное ранее значение за период наблюдений с 1971 по 1994 г. [Шевченко, 2017]. При этом максимум нагона пришелся на полную воду прилива, что еще в большей мере усилило воздействие штормовых волн на побережье.

Этот экстремальный шторм вызвал значительные повреждения нового пирса в порту Южно-Курильска, сданного в эксплуатацию в 2010 г. При проведении предпроектных изысканий оценки ветрового волнения основывались на расчетах по достаточно продолжительному периоду относительного затишья, до экстремальных штормов последнего десятилетия. Поэтому гидротехническое сооружение, не рассчитанное на подобные воздействия, получило значительные повреждения и требует капитального ремонта.

Шторм 8–9 октября 2015 г. в районе южных Курильских островов был вызван тайфуном «Choi-Wan», который образовался в Тихом океане, в тропических широтах, и смещался в северо-западном и северном



Рис. 4. Пирс в порту п.г.т. Южно-Курильск, затопленный во время шторма 17 декабря 2014 г. Фото К. Першина



Рис. 5. Часть п.г.т. Южно-Курильск, прилегающая к устью р. Серебрянка, и мост через нее, затопленные во время шторма 17 декабря 2014 г. *Фото К. Першина*



Рис. 6. Ежечасные значения уровня моря по наблюдением на береговом мареографе в бухте Малокурильская. Синяя линия – исходные значения, коричневая – предвычисленный прилив, красная – непериодическая составляющая.

направлении к южной части Курильской гряды. 8 октября центр циклона располагался в районе южных Курильских островов, давление в центре 955 гПА. По данным наблюдений гидрометеостанции Малокурильское, на побережье о. Шикотан наблюдался штормовой ветер северо-восточного направления со скоростью 16-24 м/с, порывами 45-48 м/с. Высота волнения со стороны Южно-Курильского пролива 8 октября достигала 4.0 м (по данным визуальных наблюдений ГМС Малокурильское). Даже при гораздо менее сильных штормах на данной станции фиксировались волны высотой 8-9 м, поэтому такое низкое значение, скорее всего, объясняется низким качеством визуальных наблюдений. Так, в декабре 2014 г. здесь была отмечена высота волны 2.5 м, существенно меньшая, чем в гораздо более закрытом для проникновения волн порту Южно-Курильска. В целом серия экстремальных штормов последнего десятилетия лишь в малой степени отражена в материалах визуальных наблюдений.

9 октября тайфун начал медленное смещение на север и через о. Итуруп вышел в Охотское море, с глубиной заполнения 970 гПа. По данным наблюдений ГМС Малокурильское, 9 октября отмечался ветер северо-восточного направления со скоростью 11–15 м/с, порывы достигали 34 м/с. Максимальная высота волны составила 2.0 м.

В целом серия экстремальных штормов последнего десятилетия лишь в малой сте-

пени отражена в материалах визуальных наблюдений, что демонстрирует существенные проблемы их качества, усугубляющегося в последние годы снижением уровня профессиональной подготовки и дисциплины наблюдателей на удаленных гидрометеорологических станциях.

Инструментальные измерения волновых процессов в бухтах о. Шикотан

В бухтах о. Шикотан были получены инструментальные записи волновых процессов при экстремальных штормах 2014–2015 гг., причем в бухте Димитрова во всех случаях, а в бухте Малокурильской только в 2015 г. измерения производились прибором APB с частотой 1 Гц. Вариации придонного давления пересчитывались в смещения свободной поверхности с учетом глубины постановки прибора по методике [Кабатченко и др., 2007] при помощи программы, любезно предоставленной И.М. Кабатченко (Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова).

Для анализа особенностей волновых процессов строились графики изменений высот волн обеспеченностью 1, 2 и 13 % (последняя соответствует значимой высоте ветровых волн, график представлен на рис. 7), а также диаграммы текущего спектра. Для построения такой диаграммы рассчитывались значения спектральной плотности по последовательным фрагментам записи длительностью 15 мин и заносились в таблицу-матрицу, по одной координате которой откладывалась частота, по другой – время. Заполненная таким образом матрица отражает изменение во времени спектральной плотности в диапазоне частот от 0.002 до 0.5 Гц (периоды от 500 до 2 с, рис. 2).

За интервал наблюдений с 26.07.2014 по 2.01.2015 г. отмечено 12 штормовых ситуаций, из которых 3 (16–17 октября, 1–3 и 16–18 декабря) можно отнести к сильным штормам, остальные были умеренными (значимая высота волны в бухте Димитрова менее 0.5 м). В летний период основной максимум в спектре приходился на периоды волн зыби (7–9 с), осенью преобладала более низкочастотная зыбь с периодами 9–15 с, роль ветрового волнения была незначительна.

При шторме 16–17.12.2014 г. значимая высота волны достигала достаточно скромной отметки 1.7 м, что, однако, вдвое больше, чем второй максимум за примерно полугодовой интервал наблюдений, зафиксированный при достаточно сильном шторме в октябре того же года. Вероятно, в данном случае сказалось положение регистратора в закрытой от прямого действия волнения части бухты. Отметим резкое возрастание данного параметра на начальной фазе шторма и сравнительно плавное его убывание в течение примерно двух суток.

Анализ диаграммы текущего спектра показал, что на начальной стадии развития шторма спектральный максимум приходился на периоды 8–9 с, затем сместился в низкочастотную



область (17–18 с), при этом возник второй максимум на периодах 4–6 с. Это была одна из немногих ситуаций, когда ветровое волнение играло существенную роль в бухте Димитрова. В диапазоне волн зыби период спектрального максимума плавно уменьшался и 18 декабря изменялся от 12 до 10 с.

Еще одной особенностью рассматриваемой штормовой ситуации было существенное возрастание энергии в диапазоне инфрагравитационных волн (30–300 с). Аналогичный, но более слабый эффект наблюдался также при сильных штормах в середине октября и первых числах декабря. На диаграммах текущего спектра выделяются устойчивые полосы на периодах 2.2, 3.3 и 4.8 мин, присутствующие как в спокойную, так и в штормовую погоду (относительная выраженность этих максимумов при сильных штормах

> уменьшается, происходит стохастизация волнового поля – спектр длинноволновых колебаний в указанном диапазоне периодов приобретает характер, близкий к спектру белого шума). Устойчивость этих максимумов указывает на их топографический характер, указанные периоды отвечают высокочастотным модам бухты [Рабинович, Левянт, 1992].

В 2015 г. измерения в бухте Димитрова проводились с 24 мая по 22 октября, за этот период отмечено 4 сильных шторма, когда значимая высота волны превышала 0.5 м (10-11 июня, 15-16 и 22-25 сентября, 8-9 октября, рис. 8). Отмечено аналогичное выявленному в 2014 г. различие спектральных максимумов волнения при штормах в летний

Рис. 7. График значимой высоты волны (А) и диаграмма текущего спектра по измерениям волнения (Б) в бухте Димитрова (океанское побережье о. Шикотан) за период с 26 июля 2014 по 2 января 2015 г.

и осенний период, что, вероятно, связано со специфическими перестройками атмосферных процессов в изучаемом районе.

Экстремальный шторм 8–9.10.2015 г. проявился несколько слабее по сравнению с рассмотренным выше событием, значимая высота волны достигла 1.4 м. Диаграмма текущего спектра показала, что, как и в декабре предшествовавшего года, наиболее интенсивные колебания вначале отмечены на периодах 8–9 с, после чего период спектрального максимума увеличивался до 17–18 с (рис. 9А). Затем, по мере ослабления шторма, период спектрального максимума возвращался к исходным значениям. Короткопериодное ветровое волнение, в отличие от декабрьского шторма, проявилось существенно слабее.

В более закрытую, расположенную на побережье Южно-Курильского пролива бухту Малокурильская волнение проникает еще более ослабленным, максимальная значимая высота волны при экстремальном шторме со-

ставила всего 0.5 м. Весьма примечательна диаграмма текущего спектра волнения, на которой выделяются две узкие полосы, отвечающие короткопериодному волнению и зыби (рис. 9Б). Для этих полос характерны существенные вариации частоты спектрального максимума, синхронные с колебаниями уровня моря (высоким значениям уровня отвечают более высокие частоты, или более короткие периоды, а низким, соответственно, более низкочастотные волны). Период спектрального максимума волнения изменялся преимущественно от 5 до 7 с, а зыби – от 9 до 15 с. Сложно объяснить причину этого интересного явления. Вероятнее всего, трансформация волнения на фазах прилива и отлива

происходит в узкой горловине бухты. Аналогичная картина наблюдалась в бухте Димитрова только один раз, после экстремального шторма 8–9 октября 2015 г.

Как и в бухте Димитрова, на диаграмме текущего спектра в бухте Малокурильская выделяются устойчивые полосы на периодах около 1.9, 3 и 4.8 мин. Два последних упоминались в работе [Рабинович, Левянт, 1992] как резонансные периоды высокочастотных мод бухты, а самая короткопериодная не могла быть определена по измерениям с дискретностью 1 мин. В отличие от рассмотренного выше бассейна, в Малокурильской бухте не наблюдалось стохастизации волнового процесса и существенного возрастания энергии в высокочастотной части спектра при максимальном развитии шторма. Вероятно, это обусловлено топографическими особенностями бассейна, более защищенного от проникновения волнения.

В бухтах Крабовая и Церковная были получены записи длинноволновых процессов



Рис. 8. График значимой высоты волны (вверху) и диаграмма текущего спектра волнения, рассчитанного по последовательным 15-минутным измерениям волнения в бухте Димитрова за период с 24 мая по 22 октября 2015 г.

с дискретностью 1 мин, что позволило изучить вариации их спектральных характеристик на различных стадиях развития шторма. Расчет спектров производился по отрезкам суточной продолжительности, по интервалам продолжительностью 6 ч с половинными сдвигами, число степеней свободы равно 13.

В бухте Крабовая в спокойную погоду и на начальной фазе шторма (расчет за 7 и 8 октября 2015 г.) в высокочастотной области спектра выделялись сравнительно слабые пики на периодах около 3, 4.5, 6 и 7.7 мин. При максимальном его развитии и на фазе ослабления (расчеты по отрезкам записи за 9 и 10 октября) на периодах менее 7 мин уровень энергии снизился, что довольно необычно, заметное его возрастание отмечено на периодах 7 и 7.8 мин.

В бухте Церковная перед штормом (расчет по отрезку за 7 октября 2015 г.) выделялся хорошо выраженный пик на периоде 7.5 мин, который при возрастании интенсивности волнения исчез (расчет за 9 октября, рис. 10). Отмечены стохастизация волнового поля, выраженная в выполаживании графика спектральной плотности на периодах до 10 мин, который стал близок к спектру белого шума, и появление на периоде 3 мин пика, отсутствовавшего ранее.

С усилением этих короткопериодных колебаний инфрагравитационной природы может быть связано явление тягуна – интенсивных течений, изменяющих свое направление



Рис. 9. Диаграммы текущего спектра по измерениям волнения в бухтах Димитрова (А) и Малокурильская (Б) за период 1–10 октября 2015 г.



Рис. 10. Графики спектральной плотности, рассчитанные по суточным отрезкам записи 7 октября (сравнительно спокойная погода) и 9 октября 2015 г. (сильный шторм) в бухте Церковная.

каждые 1.5 мин. Эти течения могут представлять опасность для заходящих в бухту промысловых судов или иных транспортных средств, использующих ее как убежище во время шторма. Аналогичные проблемы может создавать сейша с периодом около 4 мин в бухте Крабовая, где имеется действующий порт.

Заключение

За последние 10 лет экстремальные штормы на южных Курильских островах, имевшие негативные последствия для объектов и транспортных коммуникаций, расположенных в прибрежной зоне, заметно участились. В то же время анализ данных визуальных наблюдений за ветровым волнением на береговых ГМС не выявил отражения этого факта в такой характеристике, как число дней с сильным волнением (4 балла и выше) за год. Этот показатель снизился на ГМС Южно-Курильск начиная с 1992 г. примерно в 4 раза по сравнению с предшествующим периодом, что, вероятно, можно объяснить прекращением на этой станции инструментальных наблюдений за волнением. На ГМС Малокурильское число дней с сильным волнением испытывало значительные межгодовые вариации, наибольшая интенсивность волнения отмечена во второй половине 1950-х и первой половине 1990-х годов.

Повторяемость сильного волнения имеет выраженный годовой ход: она наиболее высока в осенне-зимний период (октябрь–январь), летом интенсивность волнения падает, что связано с особенностями атмосферных процессов в изучаемом районе. Данный результат согласуется с сезонной изменчивостью интенсивности волнения, характерной для всего Охотоморского региона [Гидрометеорология..., 1998].

В результате постановок автономных донных станций в 2014–2015 гг. в бухтах о. Шикотан были получены продолжительные инструментальные записи волнения и колебаний уровня моря. При анализе этих записей выявлен ряд аномальных ситуаций, наблюдавшихся при прохождении над южными Курильскими островами глубоких циклонов и тайфунов, включая экстремальные штормы 17–18.12.2014 г. и 8–9.10.2015 г.

В бухте Димитрова на океанской стороне острова выявлено существенное различие в преобладающих периодах волнения при летних (7–9 с) и осенних (9–15 с) штормах. Отмечены вариации периода спектрального максимума при экстремальном шторме 17–18.12.2014 г. с 8–9 до 16–18 с, а затем вновь до 10 с по мере развития шторма, а также заметный вклад ветрового волнения с периодами 4–6 с, не наблюдавшийся при более слабых штормах.

В бухте Малокурильская при экстремальном шторме 8–9.10.2015 г., а также при обычных погодных условиях обнаружены вариации спектрального максимума волнения, синхронные с приливом. В бухте Димитрова подобные вариации выражены существенно слабее.

Выявлено значительное возрастание энергии в инфрагравитационном диапазоне (30–300 с) при сильных штормах. На диаграммах текущего спектра выделяются полосы на фиксированных частотах (в бухте Димитрова – на периодах 2.2 и 3.3 мин, в бухте Малокурильская – на периодах 1.9, 3 и 4.8 мин), отвечающие короткопериодным резонансным модам этих бассейнов. На фазе наибольшего развития шторма происходит стохастизация волнового поля (спектр приобретает характер белого шума, резонансные пики не выражены).

При прохождении глубокого циклона 17–18.12.2014 г. на береговом мареографе в бухте Малокурильская зафиксирован экстремальный штормовой нагон высотой 63 см, пришедшийся к тому же на полную воду прилива. Вместе с наибольшими за период наблюдений высотами ветровых волн, это совпадение привело к значительному материальному ущербу в Южно-Курильском районе.

Полученные результаты могут быть использованы для обеспечения безопасности мореплавания в прибрежных водах южных Курильских островов и оценки воздействия экстремальных штормов на берега. Авторы выражают благодарность жителю Южно-Курильска Кириллу Першину, любезно предоставившему свои фотографии, сделанные во время шторма 17–18 декабря 2014 г.

Список литературы

1. Атлас волнения и ветра Тихого океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 125 с.

2. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Харламов А.А., Ивельская Т.Н. Экстремальные шторма 2006–2007 гг. на о. Шикотан: воздействие на прибрежный рельеф и осадки // Океанология. 2010. Т. 50, № 3. С. 458–467. [Ganzei L.A., Razzhigaeva N.G., Harlamov A.A., Ivel'skaya T.N. Extreme storms in 2006–2007 on Shikotan Island and their impact on the coastal relief and deposits. Oceanology, 2010, 50(3): 425-434. https://doi. org/10.1134/s0001437010030112]

3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 342 с.

4. Кабатченко И.М., Косьян Р.Д., Красицкий В.П., Серых В.Я., Шехватов Б.В. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 // Океанология. 2007. Т. 47, № 1. С. 150–155. [Kabatchenko I.M., Kos'yan R.D., Krasitskii V.P., Serykh V.Ya., Shekhvatov B.V. Operating experience with a BM-04 wave-tide gauge. Oceanology, 2007, 47(1): 135-140. https://doi.org/10.1134/s0001437 00701016x]

5. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. на Тихоокеанском побережье России // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, № 1. С. 41–64. 6. Рабинович А.Б., Левянт А.С. Влияние сейшевых колебаний на формирование спектра длинных волн у побережья Южных Курил // Океанология. 1992. Т. 32, № 1. С. 29–38.

7. РД 52.10.842-2017 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на береговых станциях и постах. М.: ИТРК, 2017. 375 с.

8. Хузеева М.О. Повторяемость штормового волнения в прибрежной части Южной Курильской гряды по данным наблюдений береговых гидрометеорологических станций // *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска*: сб. ст. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 381–385.

9. Шевченко Г.В. О влиянии прилива на формирование опасных подъемов уровня на побережье Охотского моря и прилегающих районов при цунами и штормовых нагонах // Океанология. 2017. Т. 57, № 5. С. 690–701. doi:10.7868/S0030157417050033 [Shevchenko G.V. How the tide influences dangerous level rises on the coast of the Sea of Okhotsk and adjacent areas in cases of tsunami and storm surges. Oceanology, 2017, 57(5). С. 621–631. https://doi.org/10.1134/s0001437017050150]

10. Шевченко Г.В., Хузеева М.О., Ячменев В.Е., Шишкин А.А. Экстремальные штормы вблизи Курильских островов по данным визуальных и инструментальных измерений // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 8. С. 100–106.

11. Ячменев В.Е., Хузеева М.О. Повторяемость штормового волнения на Южных Курильских островах по данным визуальных наблюдений и инструментальных измерений // Вестник ДВО РАН. 2017. № 1.

Сведения об авторах

ШЕВЧЕНКО Георгий Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник – лаборатория океанографии, Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск; ХУЗЕЕВА Марина Олеговна, начальник отдела гидрологии моря, Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Южно-Сахалинск; ЯЧМЕНЁВ Виталий Евгеньевич, инженер-исследователь, ШИШКИН Александр Алексеевич, научный сотрудник – лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.