

УДК 551.468.1 (571.66)

НАВОДНЕНИЕ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА 14–15 ДЕКАБРЯ 2023 г.

© 2025 г. Ю.В. Любицкий*, А.Н. Вражкин

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Владивосток, Россия***E-mail: yuvadlub@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.09.2024 г.

После доработки 16.06.2025 г.

Принята к публикации 28.07.2025 г.

Анализируются причины, условия и особенности формирования морского наводнения на побережье Камчатки в декабре 2023 г., возникшего в результате выхода на акваторию юго-западной части Берингова моря глубокого циклона. Приводятся сведения о затоплении десяти береговых населенных пунктов. Для исследования динамики процесса применялись численное гидродинамическое моделирование пространственно-временных изменений характеристик ветрового волнения (модель WAVEWATCH III), анемобарического нагона (двумерные модели совместной динамики воды и льда), методы расчета прилива и наката (метод Мазе). Установлено, что затопление населенных пунктов произошло в результате близости формирования во времени высокой полной воды прилива, максимальных значений анемобарического нагона и наката. При этом высота приливного уровня моря была близка к ее максимальному значению, возможному по астрономическим условиям. Показано, что все рассматриваемые факторы вносят значимый вклад в суммарный подъем уровня моря в береговых пунктах, что приводит к необходимости их учета в методах прогноза морских наводнений на побережье Камчатки. В ближайшие годы возможно увеличение числа и интенсивности наводнений в исследуемом районе вследствие происходящих климатических изменений и опускания побережья в результате современных вертикальных движений земной коры.

Ключевые слова: наводнение, побережье Камчатки, анемобарический нагон, прилив, накат, подъем уровня воды, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0869607125030115, EDN: LUADHQ

Введение

На побережье многих районов Мирового океана во время прохождения над водной поверхностью ураганов, тайфунов, глубоких циклонов возникают наводнения, приводящие к затоплению населенных пунктов, транспортных коммуникаций, сельскохозяйственных угодий. Эти наводнения часто вызывают гибель людей, разрушения и экономический ущерб, сопоставимые, а иногда превышающие негативные последствия других природных катастроф, например, землетрясений и цунами [10, 25, 26, 35].

Затопление береговых объектов во время наводнений обычно происходит в результате совместного воздействия прилива, повышения уровня моря, вызванного ветром и падением атмосферного давления (анемобарический нагон), волнового нагона и волнового заплеска после обрушения волн.

Хорошо известны морские наводнения в Санкт-Петербурге [7, 13, 16], для предотвращения которых построен комплекс защитных сооружений [17]. Катастро-

фические наводнения неоднократно происходили на берегах Белого и Баренцева морей [6], Азовского моря [18], на севере Каспийского моря [14, 15].

Морские наводнения возникают практически на всем российском побережье Японского, Охотского и Берингова морей. Наиболее уязвимыми объектами являются южная часть о. Сахалин [4, 20], северо-западное побережье и Сахалинский залив Охотского моря [5, 9], Анадырский залив Берингова моря [2], побережье полуострова Камчатка. Последствия этих наводнений не столь катастрофичны по сравнению со многими другими районами Мирового океана. В основном это является следствием недостаточного хозяйственного освоения берегов проблемных районов. Наиболее крупные береговые населенные пункты: Владивосток, Петропавловск-Камчатский, Магадан — расположены на возвышенных берегах, и морские наводнения оказывают негативное влияние только на сооружения и коммуникации, размещенные непосредственно в пределах узкой береговой зоны.

Тем не менее морские наводнения на побережье дальневосточных морей представляют угрозу населению и приводят к существенным материальным убыткам. Поэтому исследование природы и особенностей их формирования является актуальной задачей, решение которой необходимо для разработки объективных и научно обоснованных методов прогноза этих явлений.

В настоящей статье рассмотрены условия и причины экстраординарного наводнения на побережье полуострова Камчатка (рис. 1), возникшего в середине декабря 2023 г.

Во время наводнения происходило подтопление населенных пунктов Апука, Ильпырский, Вывенка, Тымлат, Оссора, Корф, Ивашка (северо-восточное побережье Камчатки), Крутогоровский, Устьевое, Октябрьский (юго-западное побережье Камчатки) и расположенных вблизи них объектов¹ (см. рис. 1).

В Вывенке вышла из строя система электроснабжения², вода вплотную подошла к жилым домам. Были подтоплены придомовые территории и хозяйственные постройки. Затопило несколько улиц в Оссоре, Ильпырском и Ивашке³ (рис. 2). В Корфе под водой оказалась взлетно-посадочная полоса аэропорта. Залит склад ГСМ, повреждено здание аэропорта, вышло из строя светосигнальное оборудование. В Тымлате затопило рыбокомбинат⁴ (см. рис. 2). Рассматривалась необходимость эвакуации работников организации. В Апуке морская вода переливала косу, на которой расположено село, в районе школы-интерната и детского сада.

Залита водой и размыта автодорога, проходящая вдоль берега Охотского моря между м. Левашова и поселком Октябрьский, в результате поселок оказался в транспортной блокаде⁵. Движение всех видов транспорта по дороге было закрыто до 20 декабря. В Устьевом происходило переливание береговой косы морской водой вблизи складов и электростанции. В Крутогоровском вода вышла на улицы⁶.

¹ <https://news.ru/regions/beringovo-i-ohotskoe-morya-vyshli-iz-beregov-i-nachali-zataplivat-kamchatku/> (дата обращения: 13.03.2025).

² <https://www.ntv.ru/novosti/2803916/> (дата обращения: 13.03.2025).

³ <https://www.dv.kp.ru/online/news/5588993/> (дата обращения: 13.03.2025).

⁴ <https://www.mk.ru/incident/2023/12/18/v-seti-poyavilos-video-zatoplenno-go-morskoy-vodoy-rybnogo-kombinata-na-kamchatke.html> (дата обращения: 13.03.2025).

⁵ <https://rg.ru/2023/12/15/reg-dfo/na-kamchatke-iz-za-shtorma-podtopilo-neskolko-pribrezhnyh-poselkov.html> (дата обращения: 13.03.2025).

⁶ <https://sapa.media/shtorm-na-kamchatke-vyzval-navodnenie-v-chetyreh-naselennyh-punktah-20231215/> (дата обращения: 13.03.2025).

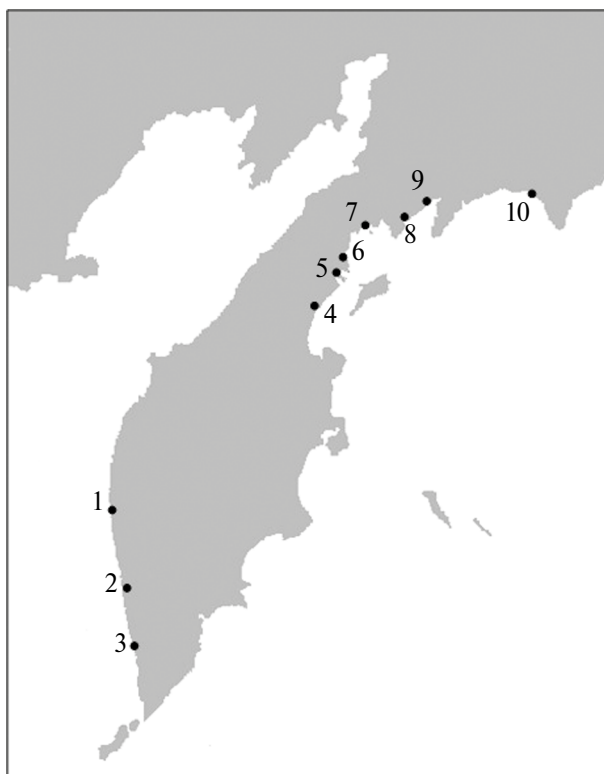


Рис. 1. Схема расположения населенных пунктов, в которых возникло наводнение. 1 — Крутогоровский, 2 — Устьевое, 3 — Октябрьский, 4 — Ивашка, 5 — Оссора, 6 — Тымлат, 7 — Ильпырский, 8 — Вывенка, 9 — Корф, 10 — Апука.

Fig. 1. Scheme of the location of the settlements where the flood occurred. 1 — Krutogorovsky, 2 — Ustyevoye, 3 — Oktyabrsky, 4 — Ivashka, 5 — Ossora, 6 — Tymlat, 7 — Ilpyrsky, 8 — Vyvenka, 9 — Korf, 10 — Apuka.

Материалы и методы

Сведения о затоплении населенных пунктов, береговых сооружений и объектов получены из оперативных сообщений гидрометеорологических станций и постов Росгидромета, материалов, опубликованных в средствах массовой информации, включая Интернет.

Характеристика синоптических условий, вызвавших наводнение, составлена на основе карт приземного анализа Японского метеорологического агентства (ЈМА), публикуемых в Интернете⁷ с дискретностью 6 часов.

Данных гидрометеорологических наблюдений, выполняемых в исследуемых районах на сети Росгидромета, недостаточно для детального исследования процессов возникновения и развития рассматриваемого явления. Во-первых, не во всех затопленных пунктах эти наблюдения выполняются. Во-вторых, наблюдения над волнением на береговых станциях и постах осуществляются визуально, следовательно, имеют недостаточно высокую точность. В-третьих, измерения уровня моря

⁷ <http://www.imocwx.com> (дата обращения: 13.03.2025).

производятся только на двух автоматизированных постах (АП) службы цунами Росгидромета — в поселке Тиличики, расположенном вблизи Корфа, и в Оссоре (см. рис. 1). К сожалению, АП в Оссоре вышел из строя в начале наводнения (в 13 часов 14 декабря), что не позволило зарегистрировать максимальный подъем уровня моря, в Тиличиках датчик измерений уровня моря работал неустойчиво, что привело к значительным пропускам в наблюдениях (9–14 часов 13 декабря, 7–9 часов 14 декабря).

Перечисленные причины привели к необходимости расчета характеристик волнения и уровня моря с помощью численных гидродинамических моделей, разработанных или адаптированных к дальневосточному региону в ФГБУ «ДВНИГМИ». Характеристики ветрового волнения на глубокой воде вычислялись с помощью дискретной модели WAVEWATCH III, в которой решается уравнение баланса энергии в спектральном виде [1, 34]. Нагонное повышение уровня моря под действием ветра и понижения приземного атмосферного давления (анемобарический нагон)



Рис. 2. Затопление береговых объектов во время наводнения. 1 — рыбокомбинат в Тымлате¹, 2 — Ильпирский².

Fig. 2. Flooding of coastal objects during a flood. 1 — fish processing plant in Tymlat, 2 — Ilpyrsky.

¹ <https://kam24.ru/news/main/20231218/102553.html#.KE5RU38a.dpuf> (дата обращения: 10.07.2024).

² <https://kamchatinfo.com/news/elements/detail/60167> (дата обращения: 10.07.2024).

рассчитывалось с помощью моделей совместной динамики воды и льда [11, 12]. Верификация численных моделей по данным наблюдений и опыт их эксплуатации в оперативной работе учреждений Росгидромета свидетельствуют о достаточно высокой точности получаемых с их помощью результатов.

Существенное влияние на затопление береговых объектов во время штормов оказывают эффекты, вызванные ветровым волнением (волновой нагон и волновой заплеск). Населенные пункты, которые затапливались во время наводнения в декабре 2023 г., расположены на песчано-галечных косах, в них практически отсутствуют гидротехнические сооружения, на которых происходит разрушение волн. Это позволяет ограничиться в расчетах волнового нагона и волнового заплеска методами, разработанными для пологих форм рельефа. Физические механизмы формирования данных эффектов различны. Волновой нагон возникает внутри зоны обрушения волн в области прибоя и представляет собой повышение среднего уровня моря вблизи берега в результате переноса масс воды и трансформации кинетической энергии волн в потенциальную энергию [8, 19, 28, 29]. Волновой заплеск имеет динамический характер — это возвратно-поступательный поток воды, набегающий на пологий берег, вызванный обрушением волн.

Проблема расчета характеристик волнового нагона и волнового заплеска является одной из самых сложных и малоизученных в динамике моря. Методы, разработанные для решения данной проблемы многочисленны и разнообразны [22, 30, 32, 33]. До настоящего времени не существует единого мнения, позволяющего отдать предпочтение одному из них. Так как целью статьи является исследование условий формирования конкретного опасного природного явления, а не сравнение и оценка качества различных методов вычисления волновых эффектов, в расчетах использовался метод Мазе, опубликованный в Руководстве по прибрежной инженерии США (Coastal Engineering Manual (ЕМ 1110-2-1100) [23]), широко применяемый в мировой практике.

Метод Мазе [23] предусматривает вычисление максимальной величины наката (run-up) — суммарного (включающего две составляющие — волновой нагон и волновой заплеск) подъема уровня воды относительно уровня моря, сформированного приливом и анемобарическим нагоном. В расчетах используются значительная (13% обеспеченности) высота волн (H_0), средняя длина (L_0) и период (T_0) волн на глубокой воде (в ближайшем к каждому береговому пункту узле сетки модели WAVEWATCH III); средний уклон рельефа местности между приблизительной глубиной начала разрушения волн, соответствующей изобате 10 м, и верхней границей берегового пляжа (β), полученный по крупномасштабным навигационным и топографическим картам. Вычисления выполняются в соответствии со следующим алгоритмом [23]:

— рассчитывается параметр подобия прибоя (число Иррибарена)

$$\xi = \operatorname{tg} \beta \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

— определяется максимальная величина наката

$$R_{\max} = 2.32 H_0 \xi^{0.77}. \quad (2)$$

Приливные колебания уровня моря в береговых пунктах рассчитывались по гармоническим постоянным восьми основных волн прилива (M2, S2, N2, K2, K1, O1,

Q1, P1), полученным по историческим материалам наблюдений в этих пунктах с помощью метода наименьших квадратов [24]. Используемый алгоритм включает расчет по дате начала рассматриваемого интервала времени комплекса астрономических параметров (средней долготы Солнца, средней долготы перигея лунной орбиты и др.), вычисление по этим параметрам астрономической части амплитуды (редукционного множителя) и фазы каждой приливной волны, расчет суммарного прилива с учетом угловых скоростей приливных волн. Для оценки максимальных возможных по астрономическим причинам высот прилива над средним уровнем моря предвычисление прилива выполнялось для периода продолжительностью 20 лет (2006—2025), при этом значения астрономических параметров пересчитывались каждые пять дней.

Результаты

Синоптические условия формирования наводнения

Наводнение было вызвано глубоким циклоном, возникшим 11 декабря над Желтым морем. Приземное атмосферное давление в его центре P_a в это время составляло 1020 гПа (рис. 3). Углубляясь ($P_a = 1008$ гПа), в 12 часов 12 декабря циклон пересек Японские острова и вышел на акваторию Тихого океана. В дальнейшем он двигался в северо-восточном направлении вдоль побережья Японии и Курильских островов (см. рис. 3).

В 12 часов 13 декабря циклон ($P_a = 990$ гПа) располагался вблизи южной оконечности полуострова Камчатка, после чего изменил направление движения — он начал перемещаться на север, продолжая углубляться. В 00 часов 14 декабря P_a составило 972 гПа (см. рис. 3), на северо-восточном побережье Камчатки скорость ветра восточного направления достигла 8–12 м/с, на юго-западном побережье полуострова ветер скоростью 3–5 м/с имел СЗ направление.

В 12 часов 14 декабря циклон вышел на акваторию юго-западной части Берингова моря и достиг максимального развития ($P_a = 952$ гПа). Это привело к резкому усилению ветра: скорость ветра восточного направления на северо-восточном побережье Камчатки достигла 25 м/с, на юго-западном побережье скорость ветра ЗСЗ—СЗ направлений при этом составляла 14–17 м/с.

Затем циклон начал перемещаться в западном направлении и пересек полуостров Камчатка (см. рис. 3). Направление и скорость ветра при этом в районах наводнения существенно не изменились. С 00 часов 15 декабря положение центра циклона практически сохранялось в течение нескольких суток, но циклон начал быстро заполняться. Например, в 00 часов 17 декабря P_a достигло значения 1002 гПа, скорость ветра в районах, где произошло наводнение, не превышала 3–7 м/с.

Факторы, вызвавшие наводнение

Прилив

В соответствии с классификацией А.И. Дуванина [3], приливы на юго-западном и северо-восточном побережьях Камчатки имеют неправильный полусуточный характер (табл. 1). Только в Апуке и Корфе они являются неправильными суточными (см. табл. 1), что объясняется искажением приливного хода уровня моря в этих пунктах по сравнению с открытым побережьем. В Апуке наблюдения, использованные для вычисления гармонических постоянных волн прилива, выполнялись в устье реки, в Корфе — в узкой протяженной мелководной бухте Скрытная.

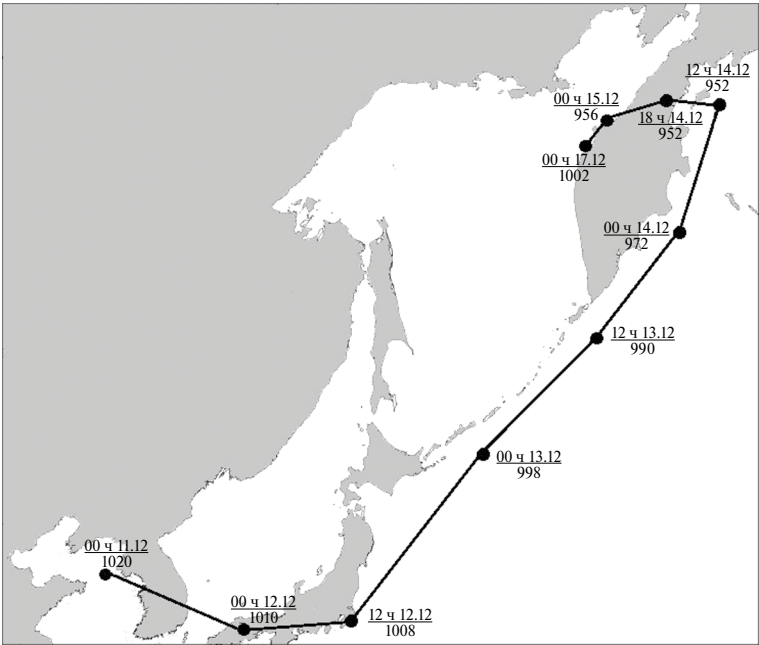


Рис. 3. Траектория движения циклона, вызвавшего наводнение. Маркерами отмечено положение центра циклона. В подписях указано камчатское время (+12 часов ВСВ) и давление в центре циклона (гПа).

Fig. 3. Track of the cyclone that caused the flood. Markers show cyclone center positions. Kamchatka time (+12 UTC) and pressure in the center of cyclone (hPa) are in the labels.

Таблица 1. Характеристики прилива в береговых пунктах

Table 1. Characteristics of the tide at coastal stations

Пункт	R	Максимальная высота прилива над средним уровнем моря, см	
		во время наводнения	возможная по астрономическим причинам
Апука	2.01	71	80
Ильпырский	1.48	59	84
Корф	2.17	57	64
Оссора	1.53	85	94
Крутогоровский	1.82	219	229
Устьевое	1.98	221	228
Октябрьский	1.96	141	146

Примечание. $R = (H_{K1} + H_{O1})/H_{M2}$ (критерий А.И. Дуванина), где H_{K1} , H_{O1} , H_{M2} — амплитуды соответствующих волн прилива. При $0.5 < R \leq 2.0$ прилив является неправильным полусуточным, при $2.0 < R \leq 4.0$ — неправильным суточным.

Наибольшей величины неправильные полусуточные приливы достигают после полнолуния или новолуния, когда действие приливообразующих сил Луны и Солнца совпадает (сизигийные приливы). Наводнение на побережье Камчатки возникло во время сизигийных приливов (новолуние было 13 декабря).

Значительное влияние на величину полусуточных приливов оказывает склонение Луны (тропическое неравенство) из-за которого наибольшие по величине приливы в течение года формируются летом и зимой. Следует также отметить, что 2023 г. близок к максимуму прилива с периодом 18,61 года, вызванного наклоном орбиты Луны к плоскости эклиптики [27, 31].

Совпадение во времени перечисленных эффектов привело к формированию на побережье Камчатки в период наводнения максимальных высот прилива, близких к предельным высотам, возможным по астрономическим условиям (см. табл. 1).

Нагонное повышение уровня моря, вызванное действием ветра и изменениями приземного атмосферного давления

Сильный ветер и падение приземного атмосферного давления 14–15 декабря вызвали подъем уровня моря в исследуемых районах (рис. 4).

В пунктах, расположенных на побережье Карагинского залива (Ильпырский, Оссора, Ивашка), анемобарический нагон достиг наибольшей величины (79–82 см) практически синхронно (в 15–18 часов 14 декабря). Эти значения близки к оценкам максимумов анемобарических нагонов, возможных в данном районе, рассчитанных с помощью численного моделирования (90–100 см). В Корфе и Апуке максимальная величина анемобарического нагона сформировалась на несколько (3–7) часов позже и равна 44–47 см (в Тиличихах по данным наблюдений АП службы цунами она составила 48 см), что заметно меньше ее возможных значений (60–80 см). Вероятно, причиной данного эффекта являются особенности полей ветра над морем во время прохождения циклона.

На юго-западном побережье Камчатки наибольшие значения анемобарического нагона сформировались в 01–10 часов 15 декабря. Нагон не был экстраординарным — величина его максимума в береговых пунктах составила 26–36 см (см. рис. 4). Более значительные анемобарические нагоны в этом районе возникают регулярно, иногда несколько раз в год. Например, максимальные величины нагонов, рассчитанные по численной модели для периода 2013–2022 гг., составляют в Крутогоровском — 86 см, в Устьевом — 75 см, в Октябрьском — 60 см. Данная особенность объясняется характером синоптического процесса. После выхода циклона на западное побережье Камчатки циклон начал заполняться, что привело к уменьшению скорости ветра и повышению приземного атмосферного давления.

Интересно, что 18 декабря возник новый анемобарический нагон, вызванный циклоном, сформировавшимся в районе Корейского полуострова 15 декабря, хорошо выраженный на охотоморском побережье Камчатки и менее заметный на берегах Берингова моря. При этом в Октябрьском величина этого нагона была больше, чем во время наводнения. Тем не менее затопления поселков, расположенных на побережье Камчатки, во время данной штормовой ситуации не было, так как максимум анемобарического нагона и высокая полная вода прилива сформировались в разное время.

Накат

Значительное ветровое волнение возникло вначале в открытой части Берингова моря — максимальная высота волн на ее акватории достигала 9 м. Вблизи северо-восточного побережья Камчатки высота волн составляла 5–6 м (рис. 5). По мере продвижения циклона на север интенсивное волнение сформировалось также в северо-восточной части Охотского моря. Зона наибольших высот волн располагалась на входе в залив Шелихова, у юго-западного побережья Камчатки максимальные высоты волн достигали 6 м (см. рис. 5).

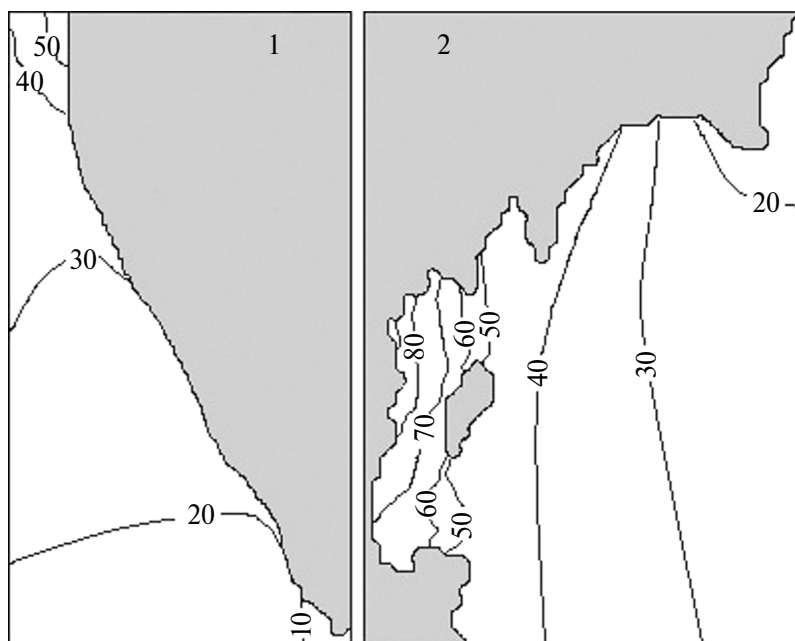


Рис. 4. Максимальные значения анемобарического нагона в районах, прилегающих к юго-западному (1) и северо-восточному (2) побережьям Камчатки во время наводнения, рассчитанные с помощью численного моделирования, см.

Fig. 4. Maximum values of anemobaric surge in areas adjacent to the southwestern (1) and northeastern (2) coasts of Kamchatka during the flood, calculated using numerical modeling, cm.

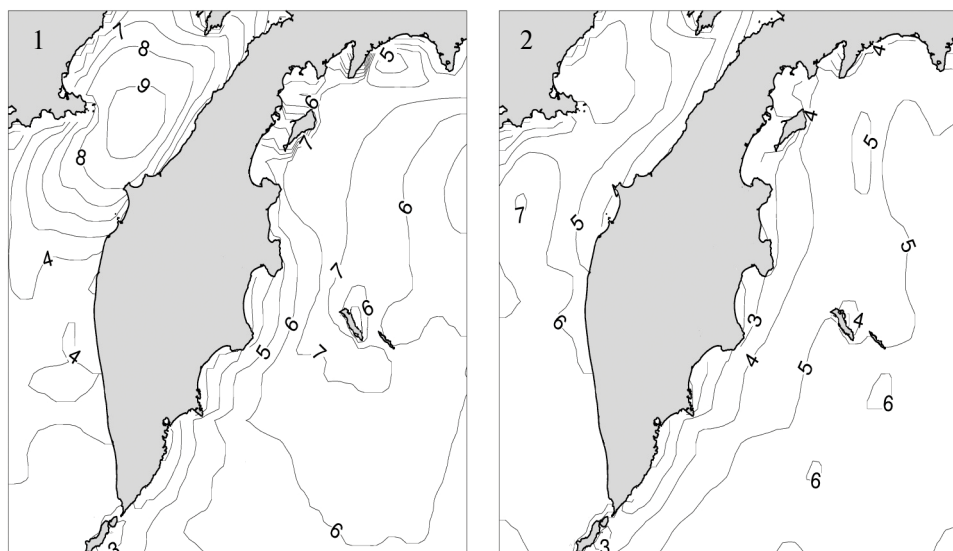


Рис. 5. Высота волн во время наводнения, рассчитанная по численной модели, м. 1 — 18 часов 14 декабря, 2 — 12 часов 15 декабря.

Fig. 5. Wave height during the flood, calculated using the numerical model, m. 1 — 18 hours on December 14, 2 — 12 hours on December 15.

На северо-восточном побережье Камчатки максимальные значения наката возникли в разное время: в Оссоре — в 12 часов 14 декабря, в Корфе, Ильпырском и Ивашке — в 18 часов 14 декабря, в Апуке — в период с 06 до 18 часов 15 декабря (рис. 6). В пунктах, расположенных на юго-западном побережье Камчатки, накат достиг максимальных значений синхронно — в 12 часов 15 декабря (см. рис. 6).

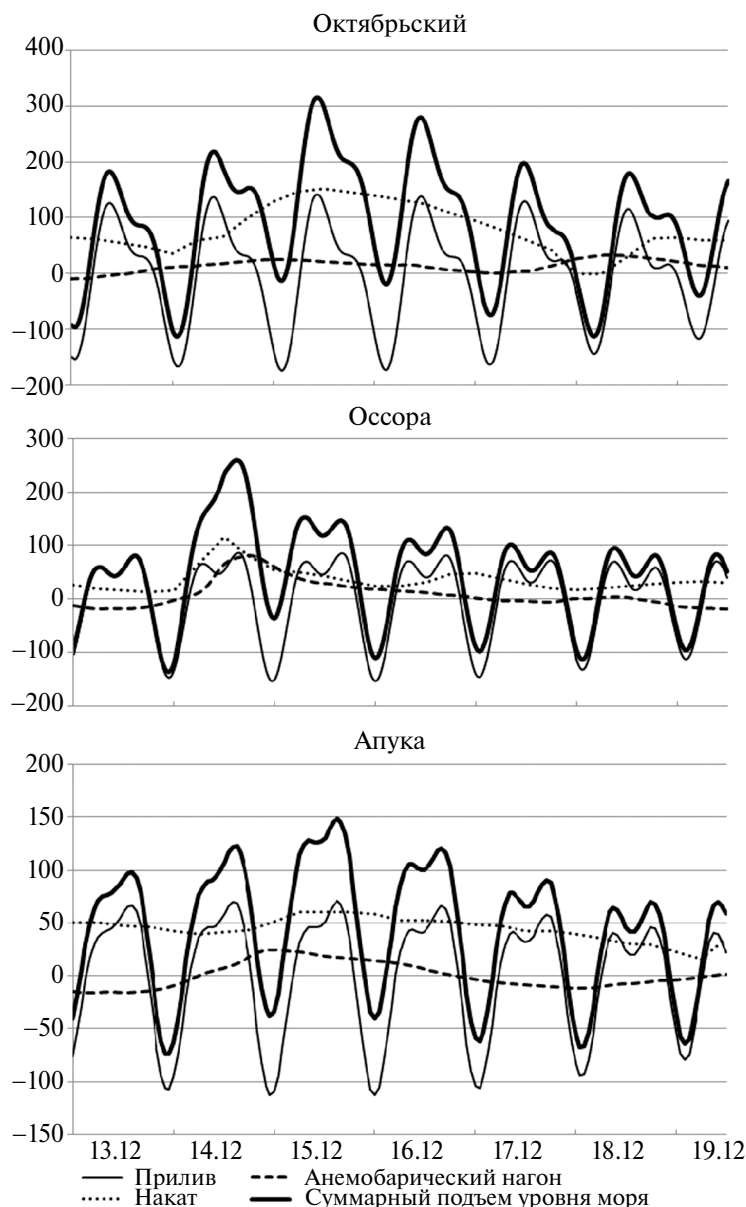


Рис. 6. Изменения суммарного подъема уровня воды и его составляющих 13–19 декабря 2023 г. относительно среднего уровня моря, см.

Fig. 6. Changes in the total water level rise and its components on December 13–19, 2023, relative to the mean sea level, cm.

Рассчитанные характеристики наката в разных береговых пунктах существенно отличаются между собой (табл. 2). Это объясняется двумя причинами. Во-первых, локальными условиями районов расположения этих пунктов, в частности ориентацией береговой черты, особенностями рельефа дна и берега (следует отметить, что величина наката из-за различия морфометрических характеристик может существенно отличаться в точках, расположенных друг от друга даже на расстоянии нескольких десятков метров). Во-вторых, погрешностями используемых в расчетах уклонов пляжа и дна в прибойной зоне — для получения надежных значений этих характеристик необходимы детальные топографические съемки и промеры глубин.

Таблица 2. Максимальные рассчитанные значения суммарного подъема уровня воды и его составляющих во время наводнения относительно среднего уровня моря, см

Table 2. Maximum calculated values of the total rise in water level and its components during a flood relative to the mean sea level, cm

Пункт	Прилив (полная вода)	Анемобари- ческий нагон	Прибли- зительная величина наката	Суммарный подъем уровня воды	
				при совпадении максимумов всех составляющих	при фактических условиях
Апука	71	24	61	156	149
Корф	57	44	130	231	209
Ильпырский	59	79	60	198	197
Оссора	85	82	116	283	260
Ивашка	85	79	250	414	403
Крутогоровский	219	36	365	620	619
Устьевое	221	29	174	424	421
Октябрьский	141	26	152	319	314

Обсуждение

Возможность затопления береговых объектов определяется сочетанием характеристик всех составляющих суммарного подъема уровня воды: прилива, анемобарического нагона и наката. Во многих ситуациях, например, когда анемобарический нагон и вызванные волнением эффекты имеют значительную величину, но они совпадают с малой водой прилива, опасные явления не возникают.

Во время наводнения 14–15 декабря 2023 г. максимальные значения составляющих суммарного подъема уровня воды в абсолютном большинстве пунктов сформировались в близкое время (см. рис. 6). Интервалы времени между высокими полными водами прилива и максимумами наката не превышают четырех часов. Промежутки времени между максимумами анемобарического нагона и высокими полными водами прилива составляют от 0 до 9 часов. При этом, поскольку продолжительность анемобарического нагона составляла несколько суток, отклонения его величины во время высокой полной воды от значения максимума невелики и не превышают 3–13 см.

Отмеченная особенность привела к возникновению значительного суммарного подъема уровня воды (см. табл. 2), который достиг максимума в Корфе, Ильпирском, Оссоре и Ивашке в 15–16 часов 14 декабря, в Крутогоровском, Устьевом и Октябрьском — в 10–12 часов 15 декабря. Полученные результаты хорошо согласуются с зарегистрированными сведениями о процессе затопления береговых объектов.

При синхронном формировании максимумов прилива, анемобарического нагона и наката оценки возможного суммарного подъема уровня воды превысили бы его фактические значения всего на 1–23 см (см. табл. 2). Это подтверждает сделанный ранее вывод, что основной причиной возникновения наводнения является крайне неблагоприятное сочетание вызвавших его факторов. Следует отметить, что все составляющие суммарного подъема уровня воды имеют значимую величину (см. табл. 2), что указывает на необходимость их комплексного учета при расчете и прогнозировании морских наводнений на побережье Камчатки. Заключение о вкладе каждой составляющей в суммарный подъем уровня воды можно сделать лишь после детального анализа других опасных ситуаций, наблюдавшихся в исследуемом районе.

Численное моделирование позволило адекватно воспроизвести аномальный по времени характер наводнения в Апуке (см. рис. 1), возникшего в 15 часов 15 декабря. Причиной этой аномалии являются особенности конфигурации береговой черты — в период наибольшего развития циклона ветер в данном районе был направлен от берега в сторону моря, что привело к некоторому понижению уровня моря.

Можно ожидать, что в ближайшие годы количество и интенсивность морских наводнений на побережье Камчатки будут увеличиваться в результате происходящих климатических изменений [21]. Не исключено, что последствия наводнений будут более разрушительными из-за повышения уровня Мирового океана, а также возможного опускания полуострова Камчатка в результате современных вертикальных движений земной коры (этот процесс прослеживается по данным многолетних наблюдений над уровнем моря в Петропавловске-Камчатском).

Заключение

Наводнение 14–15 декабря 2023 г. на побережье полуострова Камчатка, во время которого были затоплены населенные пункты и береговые объекты, возникло в результате выхода на акваторию юго-западной части Берингова моря глубокого циклона, минимальное приземное атмосферное давление в центре которого достигало значения 952 гПа. Циклон вызвал наводнение в двух районах: на северо-восточном и юго-западном побережьях Камчатки. В первом из этих районов наводнение возникло в основном 14 декабря (максимум в 15–16 часов) (в Апуке — 15 декабря), во втором — 15 декабря (максимум в 10–12 часов).

На побережье Карагинского залива наводнение имело катастрофический характер — рассчитанные значения суммарного подъема уровня воды относительно среднего уровня моря достигали величины 2–4 м (см. табл. 2). Близкие по интенсивности явления, исходя из публикаций в СМИ и информации, полученной от очевидцев, в Ильпирском, Оссоре и Ивашке возникают очень редко и были зарегистрированы только 3–4 ноября 1982 г., 14–15 января 1990 г., 15–16 декабря 2008 г.

На юго-западном побережье Камчатки наводнение не было экстраординарным, что в основном объясняется небольшой величиной анемобарического нагона. Близкие по интенсивности наводнения в данном районе возникают практически ежегодно. Более значительный ущерб причинили явления, например, 11–12 ноября 2013 г.

и 3 декабря 2021 г. (были затоплены поселки Ичинский и Крутогоровский, разрушена дорога в Октябрьском).

Причиной наводнения во всех береговых пунктах было практически синхронное формирование высокой полной воды прилива, максимальных значений анемобарического нагона и наката. При этом высота приливного уровня моря была близка к ее максимальному значению, возможному по астрономическим условиям.

Список литературы

1. Вражкин А.Н. Адаптация моделей WAVEWATCH и SWAN к акваториям дальневосточных морей // Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / Под ред. Е.С. Нестерова. М., Обнинск: Социальные науки, 2013. С. 129.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том X. Берингово море. вып. 1. Гидрометеорологические условия / Отв. ред. Ф.С. Терзиев. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. 300 с.
3. Дуванин А.И. Волновые движения в море. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 223 с.
4. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Доган Д., Ялченир Б., Ялченир А., Куркин А.А., Москвитин А.А. Численное моделирование штормового нагона 15 ноября 2019 года на юге острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. 2020. Том. 36. № 4. С. 396–406.
5. Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне острова Сахалин // Вестник Московского университета. 2015. Серия 5. География. № 3. С. 41–49.
6. Кораблина А.Д., Кондрин А.Т., Архипкин В.С. Моделирование нагонов в Белом и Баренцевом морях за период 1979–2015 гг. // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 144–158.
7. Куликов Е.А., Медведев И.П. Статистика экстремальных сгонно-нагонных явлений в Балтийском море // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 858–870.
8. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
9. Любичский Ю.В., Швецов А.Е. Штормовые нагоны на устьевом взморье Амура // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 6. С. 609–614.
10. Любичский Ю.В., Шевченко Г.В., Елисов В.В. Штормовые нагоны // Мировой океан. Том I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане / Под ред. Л.И. Лобковского. М.: Научный мир, 2013. С. 559–575.
11. Любичский Ю.В. Метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка // Тр. ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 32–68.
12. Любичский Ю.В., Романский С.О. Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря // Гидромет. иссл. и прогнозы. 2022. № 1 (383). С. 71–88.
13. Медведев И.П., Куликов Е.А. Экстремальные штормовые нагоны в Финском заливе: частотно-спектральные свойства и влияние низкочастотных колебаний уровня моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 4. С. 528–538.
14. Нестеров Е.С., Попов С.К., Лобов А.Л. Статистика и моделирование штормовых нагонов в Северном Каспии // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 53–59.
15. Павлова А.В., Архипкин В.С., Мысленков С.А. Внутри- и межгодовая изменчивость сгонно-нагонных колебаний уровня моря в Северном Каспии // Гидромет. иссл. и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 42–57.
16. Померанец К.С. Три века петербургских наводнений. СПб.: Искусство-СПб, 2005. 214 с.

17. Попов С.К., Лобов А.Л. Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учетом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 80–89.
18. Попов С.К., Лобов А.Л. Диагноз и прогноз наводнения в Таганроге по оперативной гидродинамической модели // Тр. Гидрометцентра России. 2016. Вып. 362. С. 92–108.
19. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
20. Шевченко Г.В. Статистические характеристики штормовых нагонов в южной части о. Сахалин // Изв. РГО. 1997. Т. 129. вып. 3. С. 94–107.
21. Almar R., Ranasinghe R., Bergsma E. W. J., Diaz H., Melet A., Papa F., Vousdoukas M., Athanasiou P., Dada O., Almeida L. P., Kestenare E. A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping // Nature Communications. 2021. 12, 3775. P. 1–10.
22. Atkinson A., Power H., Moura T., Hammond T., Callaghan D., Baldock T. Assessment of runup predictions by empirical models on non-truncated beaches on the south-east Australian coast // Coastal Engineering. 2017. Vol. 119. P. 15–31.
23. Coastal Engineering Manual. Part II: Coastal Hydrodynamics (EM 1110-2-1100). Washington: Books Express Publishing. 2012. 624 p.
24. Foreman M.G. G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004. 58 p.
25. Kim C.-K., Lee J. T. Numerical simulations of storm surge disaster due to typhoon Maemi in Korea // Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 2008. E-10 (406). P. 63–69.
26. Knabb R.D., Rhome J.R., Brown D.P. Hurricane Katrina 23–30 August 2005. Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. Miami: 2005. 43 p.
27. Kowalik Z., Luick J. The oceanography of tides. Fairbanks: 2013. 157 p.
28. Longuet-Higgins M.S. On wave set-up in shoaling water with a rough sea bed // J. Fluid Mech. 2005. Vol. 527. P. 217–234.
29. Mellor G. L. Wave radiation stress // Ocean Dynamics. 2011. Vol. 61. P. 563–568.
30. Newell C., Mullarkey T., Clyne M. Radiation stress due to ocean waves and the resulting currents and set-up/set-down // Ocean Dynamics. 2005. Vol. 55. P. 499–514.
31. Parker B.B. Tidal Analysis and Prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3. Silver Spring, Maryland: 2007. 378 p.
32. Stockdon H.F., Thompson D.M., Plant N.G., Long J.W. Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models // Coastal Engineering. 2014. 92, P. 1–11.
33. Shand R.D., Shand T.D., McComb P.J., Johnson D.L. Evaluation of empirical predictors of extreme run-up using field data // Proc. 20th Austral. Coast. and Ocean Eng. Conf. 28–30 Sept. 2011. Perth. Australia. 2011. P. 669–675.
34. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 /NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2019. 466 p.
35. Zong Y., Tooley M. J. A historical record of coastal floods in Britain: frequencies and associated storm tracks // Nat. Hazards. 2003. Vol. 29. P. 13–36.

Flood on the Coast of the Kamchatka Peninsula on December 14–15, 2023**Yu.V. Lyubitskiy*, A.N. Vrazhkin***Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia***E-mail: yuvadlub@gmail.com*

Received 30.09.2024

Revised 16.06.2025

Accepted 28.07.2025

The causes, conditions and features of the formation of marine flood on the coast of Kamchatka in December 2023, which arose as a result of a deep cyclone entering the waters of the southwestern part of the Bering Sea, are analyzed. Information on the flooding of coastal settlements is provided. To study the dynamics of the process, numerical hydrodynamic modeling of spatio-temporal changes in the characteristics of wind waves (WAVEWATCH III model), anemobaric surge (two-dimensional models of the combined dynamics of water and ice), methods for calculating the tide and run-up (Mase method) were used. It was found that the flooding of settlements occurred as a result of the proximity of the formation in time of higher high water, maximum values of the anemobaric surge and run-up. At the same time, tidal height was close to highest astronomical tide. It is shown that all the factors under consideration make a significant contribution to the total rise in sea level at coastal points, which leads to the need to take them into account in the methods for forecasting marine floods on the coast of Kamchatka. In the coming years, the number and intensity of floods in the study area may increase due to ongoing climate change and coastal subsidence as a result of modern vertical movements of the earth's crust.

Keywords: flood, Kamchatka coast, anemobaric surge, tide, run-up, water level rise, numerical modeling

References

1. Vrazhkin A.N. Rezhim, diaznoz i prognoz vetrovogo volneniya v okeanah i morjakh Adaptatsiya modelej WAVEWATCH i SWAN k akvatorijam dal'nevostochnyh morej. Rezhim, diaznoz i prognoz vetrovogo volneniya v okeanah i morjakh / Pod red. E.S. Nesterova. Moskva, Obninsk: Social'nye nauki, 2013. S. 129.
2. Gidrometeorologija i gidrohimija morej. Tom X. Beringovo more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie uslovija / Otv. red. F.S. Terzieva. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1999. 300 s.
3. Duvanin A.I. Volnovye dvizheniya v more. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 223 s.
4. Zajcev A.I., Pelinovskij E.N., Dogan D., Jalchenir B., Jalchenir A., Kurkin A.A., Moskvitin A.A. Chislennoe modelirovanie shtormovogo nagona 15 nojabrja 2019 goda na juge ostrova Sahalin // Morskoj gidrofizicheskij zhurnal. 2020. T. 36. № 4. S. 396–406.
5. Ivanova A.A., Arhipkin V.S., Myslenkov S.A., Shevchenko G.V. Modelirovanie shtormovyh nagonov v pribrezhnoj zone ostrova Sahalin // Vest. Mosk. Univ. Ser. 5 Geogr. 2015. № 3. S. 41–49.
6. Korablina A.D., Kondrin A.T., Arhipkin V.S. Modelirovanie nagonov v Belom i Barentevom morjah za period 1979–2015 gg. // Trudy Gidrometcentra Rossii. 2017. № 364. S. 144–158.
7. Kulikov E.A., Medvedev I.P. Statistika jekstremal'nyh sgonno-nagonnyh javlenij v Baltijskom more // Okeanologija. 2017. T. 57. № 6. S. 858–870.
8. Leont'ev I.O. Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov. Moskva: GEOS, 2001. 272 s.
9. Lyubitskiy Yu.V., Shvetsov A.E. Shtormovye nagony na ust'evom vzmor'e Amura // Vodnye resursy. 1994. T. 21, № 6. S. 609–614.

10. Lyubitskiy Yu.V., Shevchenko G.V., Elisov V.V. Shtormovye nagony // Mirovoj okean. Tom I. Geologiya i tektonika okeana. Katastroficheskie javleniya v okeane / Pod red L.I. Lobkovskogo. Moskva: Nauchnyj mir, 2013. S. 559–575.
11. Lyubitskiy Yu.V. Metod kratkosrochnogo prognoza urovnja morja na poberezh'e i akvatorii Ohotskogo i Japonskogo morej i na vostochnom poberezh'e poluostrova Kamchatka // Trudy DVNIGMI. 2017. № 155. S. 32–68.
12. Lyubitskiy Yu.V., Romanskiy S.O. Metod i tehnologija kratkosrochnogo prognoza izmenenij urovnja morja v jugo-zapadnoj chasti Beringova morja // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy. 2022. № 1 (383). S. 71–88.
13. Medvedev I.P., Kulikov E.A. Jekstremal'nye shtormovye nagony v Finskom zalive: chastotno-spektral'nye svojstva i vlijanie nizkochastotnyh kolebanij urovnja morja // Okeanologija. 2021. T. 61, № 4. S. 528–538.
14. Nesterov E.S., Popov S.K., Lobov A.L. Statistika i modelirovanie shtormovyh nagonov v Severnom Kaspii // Meteorologija i gidrologija. 2018. № 10. S. 53–59.
15. Pavlova A.V., Arhipkin V.S., Myslenkov S.A. Vnutri- i mezhgodovaja izmenchivost' sgonno-nagonnnyh kolebanij urovnja morja v Severnom Kaspii // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy. 2020. № 3 (377). S. 42–57.
16. Pomeranec K.S. Tri veka peterburgskih navodnenij. Sankt-Peterburg: Iskustvo-Sankt-Peterburg, 2005. 214 s.
17. Popov S.K., Lobov A.L. Gidrodinamicheskoe modelirovanie navodnenij v Sankt-Peterburge s uchetom rabotajushhej damby // Meteorologija i gidrologija. 2017. № 4. S. 80–89.
18. Popov S.K., Lobov A.L. Diagnostika i prognoz navodneniya v Taganroge po operativnoj gidrodinamicheskoj modeli // Trudy Gidrometcentra Rossii. 2016. № 362. S. 92–108.
19. Rabinovich A.B. Dlinnye gravitacionnye volny v okeane: zahvat, rezonans, izluchenie. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1968. 325 s.
20. Shevchenko G.V. Statisticheskie harakteristiki shtormovyh nagonov v juzhnoj chasti o. Sahalin // Izv. RGO. 1997. T. 129, № 3. S. 94–107.
21. Almar R., Ranasinghe R., Bergsma E. W. J., Diaz H., Melet A., Papa F., Vousedoukas M., Athanasiou P., Dada O., Almeida L. P., Kestenare E. A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping // Nature Communications. 2021. 12, 3775. P. 1–10.
22. Atkinson A., Power H., Moura T., Hammond T., Callaghan D., Baldock T. Assessment of runup predictions by empirical models on non-truncated beaches on the south-east Australian coast // Coastal Engineering. 2017. V. 119. P. 15–31.
23. Coastal Engineering Manual. Part II: Coastal Hydrodynamics (EM 1110-2-1100). Washington: Books Express Publishing. 2012. 624 p.
24. Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004. 58 p.
25. Kim C.-K., Lee J.T. Numerical simulations of storm surge disaster due to typhoon Maemi in Korea // Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 2008. E-10 (406). P. 63–69.
26. Knabb R.D., Rhome J.R., Brown D.P. Hurricane Katrina 23–30 August 2005. Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. Miami: 2005. 43 p.
27. Kowalik Z., Luick J. The oceanography of tides. Fairbanks: 2013. 157 p.
28. Longuet-Higgins M.S. On wave set-up in shoaling water with a rough sea bed // J. Fluid Mech. 2005. V. 527. P. 217–234.
29. Mellor G.L. Wave radiation stress // Ocean Dynamics. 2011. V. 61. P. 563–568.
30. Newell C., Mullarkey T., Clyne M. Radiation stress due to ocean waves and the resulting currents and set-up/set-down // Ocean Dynamics. 2005. V. 55. P. 499–514.

-
31. Parker B.B. Tidal Analysis and Prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3. Silver Spring, Maryland: 2007. 378 p.
 32. Stockdon H.F., Thompson D.M., Plant N.G., Long J.W. Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models // Coastal Engineering. 2014. 92, P. 1–11.
 33. Shand R.D., Shand T.D., McComb P.J., Johnson D.L. Evaluation of empirical predictors of extreme run-up using field data // Proc. 20th Austral. Coast. and Ocean Eng. Conf. 28-30 Sept. 2011. Perth. Australia. 2011. P. 669–675.
 34. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 /NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2019. 466 p.
 35. Zong Y., Tooley M.J. A historical record of coastal floods in Britain: frequencies and associated storm tracks // Nat. Hazards. 2003. V. 29. P. 13–36.