

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-58-70>

УДК 551.513.2

О возможных причинах возникновения экстремально высоких волн в Балтийском море

А.Э. Похил

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
aepokhil@yandex.ru*

Анализируются атмосферные ситуации, сопутствующие возникновению экстремально высоких волн в Балтийском море в 2004 и 2017 гг., в частности на входе в Ботнический залив. Рассматриваются изменения характеристик волнения при резком уменьшении глубины моря. Показано, что такие механизмы, как интерференция при наложении двух систем волн при огибании острова Готланд, суперпозиция прямой волны и отраженной от крутого склона на входе в Ботнический залив, могли способствовать появлению экстремальных волн.

Ключевые слова: Балтийское море, экстремальное волнение, спутниковая информация, поля водяного пара

Possible causes of extremely high waves in the Baltic Sea

A.E. Pohil

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
aepokhil@yandex.ru*

The atmospheric conditions accompanying the occurrence of extremely high waves in the Baltic Sea (in particular, at the entrance to the Gulf of Bothnia) in 2004 and 2017 are analyzed. Changes in wave characteristics with a sharp decrease in the sea depth are considered. It is shown that the mechanisms like interference, when two wave systems overlap when rounding the island of Gotland, a superposition of a direct wave and a wave reflected from the steep slope at the entrance to the Gulf of Bothnia could contribute to the occurrence of extreme waves.

Keywords: Baltic Sea, extreme waves, satellite data, water vapor fields

Введение

Одним из следствий интенсивного взаимодействия океана и атмосферы в умеренных широтах является усиление ветров [15–17]. В [5–11] показано, что одной из причин этого является трансформация тропических циклонов во внетропические при их продвижении к северу. Они способны вливаться в систему внетропических циклонических

возмущений, тем самым усиливая их [10–12]. Взаимодействие тропических циклонов с атмосферными фронтами умеренных широт, при котором происходит выброс огромного количества энергии, наблюдается довольно часто [7, 8]. При этом теплые и насыщенные влагой воздушные массы, сформировавшиеся над тропическими районами океана, выносятся тропическим вихрем на Европу [8, 9]. В результате этих процессов в Норвежском, Северном и Балтийском морях возникают штормы [9, 18].

В осенне-зимний период в Балтийском море скорость ветра в штормах может достигать 34–36 м/с, а высота волн 9–11 м [5]. Отдельная волна высотой около 14 м была зарегистрирована в центральной части Балтийского моря 22 декабря 2004 года [18]. За период 1950–2005 гг. в Балтийском море зарегистрировано 413 штормов с высотами волн более 4 м [6]. Самыми экстремальными были штормы Лотар (Lothar) и Мартин (Martin) в декабре 1999 года. Общий ущерб от них составил 11,3 млрд долларов, погибло 125 человек [6].

Еще один экстремальный шторм Гудрун (Gudrun) прошелся по северной Европе 7–9 января 2005 г. и в Северном море достиг силы урагана. В Балтийском море Гудрун немного ослабел, но при этом максимальная скорость ветра на побережье Дании достигла 41–46 м/с, у Швеции – 42 м/с и вблизи Эстонии – 37,5 м/с. По расчетам, в центральной части Балтийского моря высота волн достигала 9,5 м [6].

Цель работы – исследование некоторых физических механизмов формирования экстремального волнения в Балтийском море.

Примеры экстремальных волн в Балтийском море и сопутствующие им атмосферные процессы

Рассмотрим процессы, благоприятствующие возникновению упомянутой выше экстремальной 14-метровой волны 22 декабря 2004 года. Для этого использовалась спутниковая информация о содержании суммарного водяного пара в слое 600–300 гПа (<http://method.meteorf.ru/> / Геостационарные спутники). На спутниковых снимках видно, как атмосферные структуры, образовавшиеся над Атлантическим океаном, трансформируясь, перемещаются на северную Европу и, в частности, на Балтийским море.

На рис. 1а–в можно проследить динамику огромного циклонического образования, переместившегося 22.12.2004 г. с Северной Атлантики к берегам северной Европы и Норвежскому, Северному и Балтийскому морям. При этом наблюдался сильный северный ветер, дующий вдоль наибольшей длины Балтийского моря, поэтому создавались условия для значительного разгона ветровых волн.

Для изучения пространственно-временной изменчивости ветрового волнения в океанах и морях широко применяется численное моделирование. Для оперативного прогноза ветровых волн в Балтийском море

используются следующие модели: модель Национальной метеорологической службы Германии (DWD, Deutscher Wetterdienst), модель Финского института морских исследований (FIMR, Finnish Institute of Marine Research) и модель Датского метеорологического института (DMI, Danish Meteorological Institute). В их основу положена спектральная модель ветрового волнения третьего поколения WAM (Waves Modelling) [19].

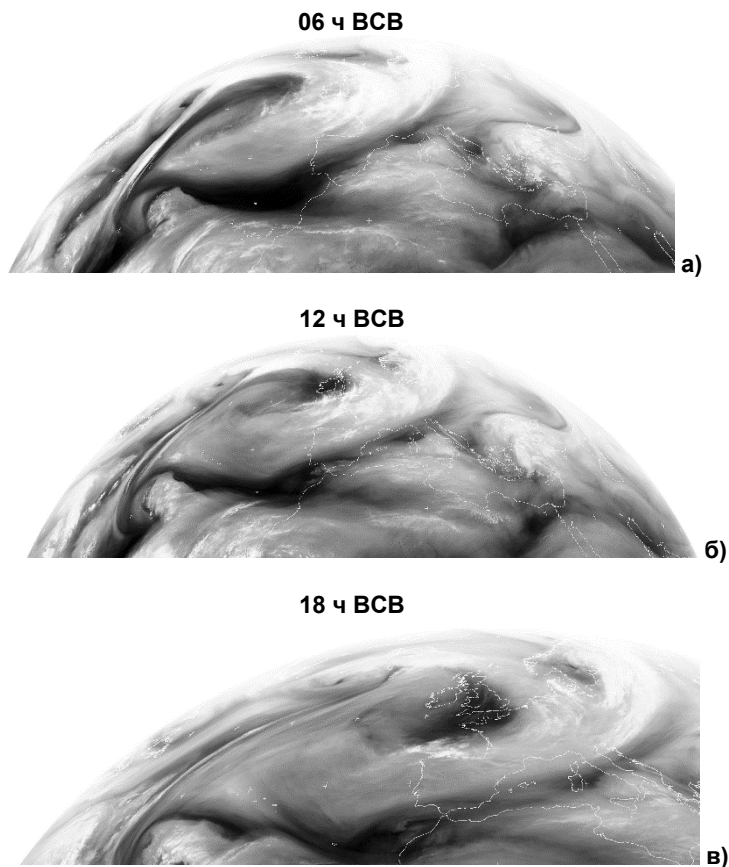


Рис. 1. Спутниковые снимки полей суммарного водяного пара (уровни 600–300 гПа), Meteosat 8, 22.12.2004.

Fig. 1. Satellite images of total water vapor fields (levels 600–300 hPa). Meteosat 8, 22.12.2004.

Поле волнения в Балтийском море для анализируемой ситуации, рассчитанное с помощью волновой модели SWAN [3], представлено на рис. 2. Область с волнами высотой более 7,5 м располагалась на входе в Ботнический залив. Отметим, что максимальная высота волн может превышать 12 м.

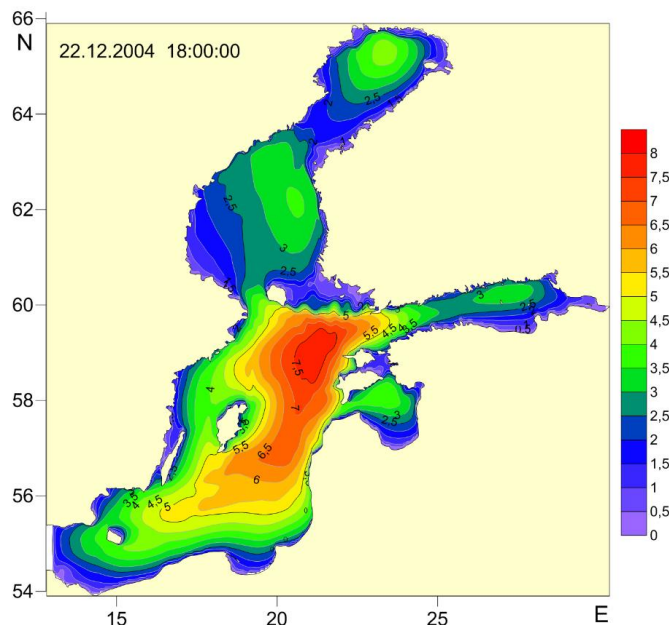


Рис. 2. Рассчитанная высота волн в Балтийском море в срок 18 ч ВСВ 22.12.2004 г. [3].

Fig. 2. The calculated height of significant waves in the Baltic Sea at 18 UTC 22.12.2004 [3].

В другом примере экстремального волнения в Балтийском море 12.01.2017 г., когда высота волн превышала 8 м (рис. 3), а максимальная высота могла достигать 13 м, по данным Финского метеорологического института (ФМИ) на входе в Ботнический залив были зарегистрированы волны высотой около 15 м.

По архивным таблицам, составляемым в отделе морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России, были найдены значения скорости ветра в срок примерно за сутки до расчета ветрового волнения, представленного на рис. 3. По данным станции Осло (индекс 2500, 58,9° с. ш., 11,00° в. д.), между проливами Скагеррак и Каттегат 11.01.2017 г. в интервале 06–09 ч ВСВ ветер достигал скоростей до 20 м/с. По данным шведских станций: 1) индекс 2625 (55,48° с. ш., 14,31° в. д., пролив Хамра-рис на входе в Балтийское море) – с 09 до 15 ч ВСВ скорость ветра достигала 18 м/с; 2) индекс 2628 (56,01° с. ш., 14,85° в. д., бухта Хамебуктек на входе в Балтийское море) с 00 до 15 ч ВСВ – 19 м/с; 3) индекс 2632 (55,95° с. ш., 15,7° в. д., бухта Хамебуктек на входе в Балтийское море) с 00 до 18 ч ВСВ – до 18 м/с; 4) индекс 2644 (56,2 с. ш., 16,4° в. д., расположена близко к предыдущей) с 06 до 18 ч ВСВ – до 19 м/с. У входа в Ботнический залив станция с индексом 2790 (60,25° с. ш., 20,75° в. д.) 11.01.2017 г. в 21 ч ВСВ зафиксировала ветер до 17 м/с.

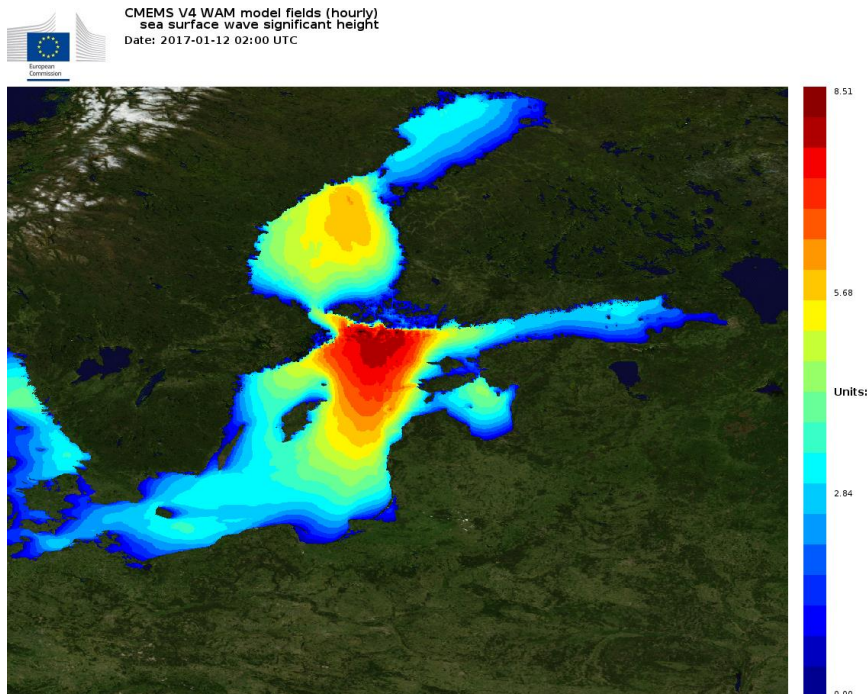


Рис. 3. Рассчитанные высоты волн в Балтийском море в срок 02 ч ВСВ 12.01.2017 г. (модель WAM).

Fig. 3. Calculated heights of waves in the Baltic Sea at 02 UTC 12.01.2017 (model WAM).

В эти дни атмосферная система, создающая сильный ветер, медленно перемещалась вначале на юго-восток, а затем на север-северо-восток. При этом направление ветра было $170\text{--}200^\circ$ (юг-юго-запад), и это способствовало образованию длинных волн, так как они перемещались вдоль оси Балтийского моря и, соответственно, имели большую область разгона. Именно эта циклоническая система создала предпосылки для образования зоны максимального волнения, представленного на рис. 3.

Однако надо заметить, что высокие волны (14–15 м) возникают в мелководном Балтийском море довольно редко. Вероятно, для их появления нужны некие дополнительные условия.

Возможные причины появления сильного волнения

Изменение характеристик волнения в зависимости от особенностей рельефа дна изучалось многими исследователями. В частности, в [13, 14] показано, что при приближении волн к берегу (повышение дна и уменьшение глубины) характер отдельных волн начинает меняться хаотически вплоть до обрушения, поэтому предложены эмпирические зависимости

для предельной высоты обрушающихся волн. В нашей работе рассматриваются два частных случая экстремальных волн, зарегистрированных на входе в Ботнический залив (рис. 4), где глубина резко уменьшается.

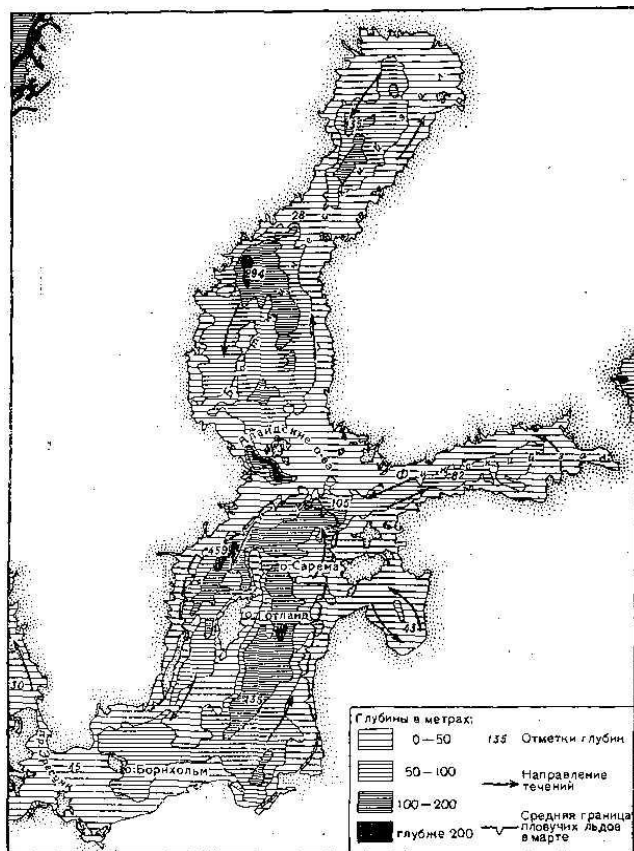


Рис. 4. Карта глубин Балтийского моря.
Fig. 4. Map of the depths of the Baltic Sea.

Как изменятся параметры волн при таком резком изменении глубины моря? Автором с сотрудниками исследовалась трансформация волн при разных углах наклона дна (физический эксперимент) [1]. На рис. 5 представлены результаты этого эксперимента.

Изменение профиля волны на мелководье представлено на рис 5а. Получены зависимости для роста, разрушения и наката волн различной относительной высоты h/h_0 (h – изменяющаяся высота волны при изменении глубины; h_0 – исходная высота волны) в зависимости от крутизны дна, характеризующейся величиной $\text{ctg}\alpha$.

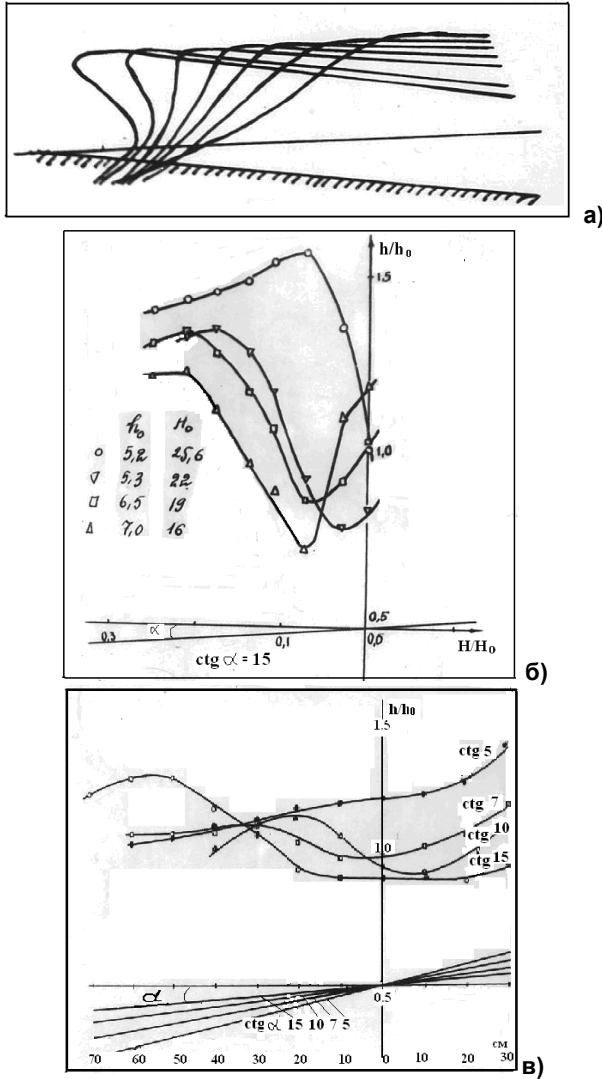


Рис. 5. Изменение профиля волны при подходе к берегу: на мелководье (а); при изменении относительной высоты волны (б); при изменении крутизны дна (в).
Fig. 5. Changing of the wave profile when approaching the shore: in shallow water (a); when changing the relative height of the wave (б); when changing the steepness of the bottom slope (в).

Показано что, чем больше относительная высота h/h_0 волны, под-
 ходящей к мелководью, тем раньше (дальше от уреза воды) происходит
 крутой подъем и обрушение гребня (рис. 5б); чем больше крутизна дна,
 тем ближе к урезу происходит разрушение (опрокидывание) волны

(рис. 5в). При максимальной крутизне (в наших экспериментах это $\text{ctg}\alpha = 5$) обрушения не наблюдается – происходит значительный подъем уровня моря [1, 4]

В реальной ситуации на Балтийском море на входе в Ботнический залив высота длинной волны, которая образовалась при большом разгоне, значительно увеличивается за счет трения о дно (рис. 5а). Это одна из причин увеличения высоты волны, которая была зарегистрирована [18].

В [2, 5] сообщается, что обычно большую крутизну волн в Балтийском море объясняют его небольшими глубинами (в среднем 54 м), однако в большинстве случаев увеличение крутизны волны есть результат коротких, но сильных штормов с ограниченной длиной разгона. Работы [1, 4] подтверждают, что для образования длинных волн необходим большой разгон. Малая глубина на входе в Ботнический залив способствует росту высоты волн.

Преградой для распространения волн в Ботнический залив при указанном выше направлении ветра является архипелаг Аландских островов. Большой разгон при определенном направлении ветра (юг-юго-запад) приводит к тому, что волны, свободно перемещавшиеся над большими глубинами вокруг о. Готланд (100 м с запада и 250 м с востока от острова, на малой глубине (10–25 м, см. рис. 5), которая имеет место именно здесь, при трении о дно становятся «дыбом», и, естественно, их крутизна и высота резко возрастают.

Другая возможная причина появления экстремальной волны следующая. Волны, образовавшиеся при ветре юго-юго-западного направления могут свободно огибать о. Готланд двумя группами с запада и востока, встречаться за северной его частью и взаимодействовать. При этом возможно перераспределение энергии в пространстве при наложении двух систем волн (интерференция), вследствие чего происходит увеличение или уменьшение результирующей амплитуды (рис. 6).

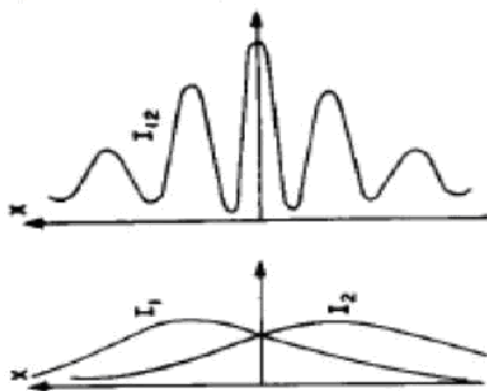


Рис. 6. Пример интерференции двух встречающихся волн.
Fig. 6. Example of interference between two meeting waves.

Еще одной причиной может быть рефракция волн (рис. 7) над шельфом Балтийского моря, что также меняет характеристики волны. При встрече волн на малых глубинах у входа в Ботнический залив с волнами, огибавшими о. Готланд с востока возможна интерференция волн разных характеристик и направлений. В этом случае также возможны мощные всплески.

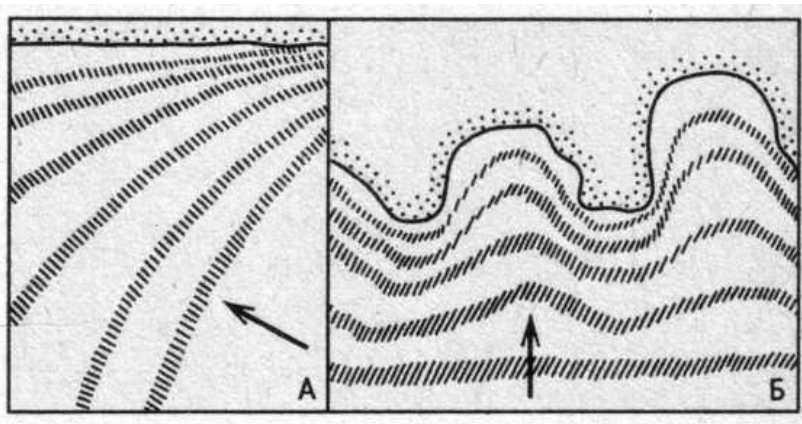


Рис. 7. Пример рефракции волн в прибрежной зоне.
Fig. 7. Example of the wave refraction on a coastal slope.

Возможная причина возникновения экстремальных волн состоит также в следующем. Волны, приближающиеся к побережью, видоизменяются под действием различных характеристик рельефа дна и берега. Подводные гряды и рифы, континентальный шельф, очертания мысов и заливов, крутизна прибрежной полосы могут изменять период и высоту волны, вызывать резонанс волн, отраженных от берега, или преобразовать их в приливной вал (бор), который обрушивается на берег.

Кроме того, причиной возникновения экстремальных волн может быть отражение волн от крутого берега на входе в Ботнический залив и сложение прямой и отраженной волн, что может привести к мощному росту высоты результирующей волны. Помимо этого, в Ботническом заливе имеет место встречное поверхностное течение, которое может способствовать увеличению крутизны и высоты волны.

Возможны также «каустики», при которых резко возрастает интенсивность волнового поля (рис. 8), хотя обычно при этом высоты волн увеличиваются незначительно, однако могут быть и исключения.

Все показанные выше физические явления могут способствовать возрастанию высоты волн до экстремальных размеров.

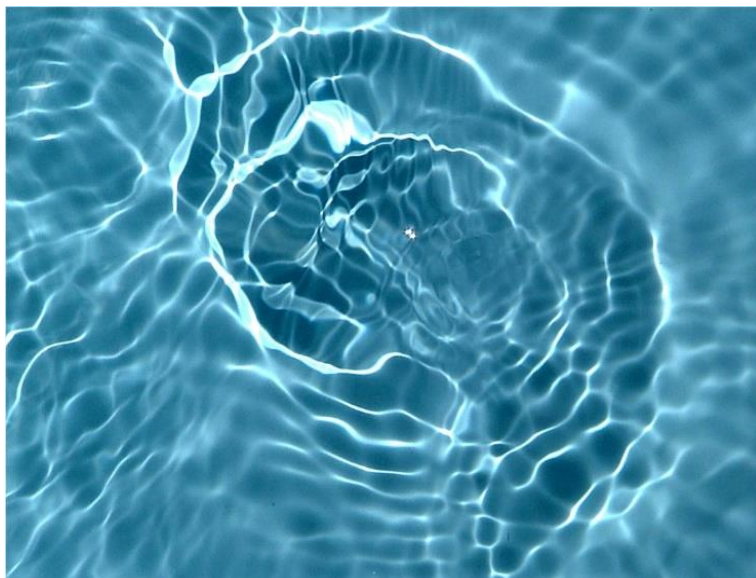


Рис. 8. Каустики на поверхности воды.

Fig 8. Caustics on the water surface.

Выводы

1. Рассмотрено несколько физических процессов, которые могли способствовать возникновению экстремально высоких волн в Балтийском море.

2. Возникновение больших волн на входе в Ботнический залив может произойти при следующих условиях:

– при выходе длинной (за счет большого разгона) волны на мелководье вблизи Аландских островов;

– интерференция – перераспределение энергии при наложении двух систем волн, огибающих с двух сторон о. Готланд;

– отражение длинных волн от круто поднимающегося дна на входе в Ботнический залив и суперпозиция прямой и отраженной волны;

– увеличение высоты волн за счет взаимодействия со встречным течением.

Автор выражает признательность, С.А. Мысленкову за предоставление данных по расчету волнения в Балтийском море.

Список литературы

1. Кононкова Г.Е., Рейхрудель А.Э., Нгуен тхе Тьонг. Изменение высот и разрушение одиночных волн на береговом откосе // Вестник МГУ, серия физическая, 1973.

2. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. СПб.: ВВМ, 2012. 165 с.
3. Медведева А.Ю., Мысленков С.А., Медведев И.П., Архипкин В.С., Кречик В.А., Добролюбов С.А. Моделирование ветрового волнения в Балтийском море на прямоугольной и неструктурной сетках на основе реанализа NCEP/CFRSR // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 362. С. 37-54.
4. Михайлова Н.А., Рейхрудель А.Э. Экспериментальное исследование трансформации одиночной волны на преградах // Гидротехническое строительство. 1970. № 11.
5. Нестеров Е.С. Экстремальные волны в океанах и морях. М.; Обнинск: ИГ СОЦИН, 2015. 64 с.
6. Нестеров Е.С. Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе. М.: Гидрометцентр России, 2018. 104 с.
7. Нестеров Е.С., Похил А.Э., Федоренко А.В. Об особенностях формирования глубоких циклонов в Северной Атлантике в осенний период // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 92-101.
8. Похил А.Э. Воздействие крупномасштабных атмосферных потоков северо-запада Тихого океана на группу взаимодействующих циклонов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 76-91.
9. Похил А.Э., Глебова Е.С. Влияние тропического циклона Омар на погоду в Европе // Метеорология и гидрология. 2010. № 9. С. 36-42.
10. Похил А.Э., Глебова Е.С., Смирнов А.В. Расчет на мезомасштабных моделях атмосферы ETA и WRF (NMM) взаимодействия тропических циклонов с полярными фронтами и струйными течениями // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 87-102.
11. Похил А.Э., Нестеров Е.С., Федоренко А.С. Ураганы Атлантического океана и штормы Балтийского моря // Энергия, экономика, техника, экология. 2019. № 6. С. 14-25.
12. Похил А.Э. О необычном поведении тропических циклонов в Тихом океане и объяснении его на основании исследования взаимодействия вихрей на численной модели // Всероссийская научная конференция "Проблемы и перспективы гидрометеорологических прогнозов". Москва. 17–21 января 2000 г.
13. Сапрыкина Я.В., Кузнецов С.Ю., Андреева Н.К., Штремель М.Н. Сценарии нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 4. С. 476-485.
14. Сапрыкина Я.В., Кузнецов С.Ю., Дивинский Б.В. Влияние процессов нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря на высоту обрушающихся волн // Океанология. 2017. Т. 57, № 3. С. 425-436.
15. Стадхолм Джошуа Генри Пол. Тропические циклоны и крупномасштабная динамика атмосферы. Автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2018.
16. Тимонов В.В., Смирнова А.И., Непол К.И. Об очагах взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике // Океанология. 1970. Вып. 5. С. 745-749.
17. Угрюмов А.И. Тепловой режим океана и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 176 с.
18. Soomere T., Behrens A., Tuomi L., Nielsen J.W. Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun // Nat. Haz. Earth Syst. Sci. 2008. Vol. 8. P. 37-46.
19. WAMDI Group: Hasselmann S, Hasselmann K, Bauer E. et al. The WAM Model – a Third Generation Ocean Wave Prediction Model // J. Phys. Oceanogr. 1988. Vol. 18. P. 1775-1810.

References

1. Kononkova G.E., Reykhrudel' A.E., Nguen tkhe Tyong. Izmenenie vysot i razrushenie odinochnykh voln na beregovom otkose. *Vestnik MGU. Seriya fizicheskaya*, 1973. [in Russ.].
2. Lopatukhin L.I. *Vetrovoe volnenie*. Saint Petersburg, VVM publ., 2012. 165 p. [in Russ.].
3. Medvedeva A.Yu., Myslenkov S.A., Medvedev I.P., Arkhipkin V.S., Krechik V.A., Dobrolyubov S.A. Numerical Modeling of the Wind Waves in the Baltic Sea using the Rectangular and Unstructured Grids and the Reanalysis NCEP/CFSR. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 362, pp. 37-54. [in Russ.].
4. Mikhaylova N.A., Reykhrudel' A.E. Eksperimental'noe issledovanie transformatsii odinochnoy volny na pregradakh. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 1970, no. 11. [in Russ.].
5. Nesterov E.S. *Ekstremal'nye volny v okeanakh i moryakh*. Moscow, Obninsk: IG-SOTSIN publ., 2015, 64 p. [in Russ.].
6. Nesterov E.S. *Ekstremal'nye ciklony v atlantiko-evropeyskom regione*. Moscow: Hydrometcenter of Russia, 2018, 104 p. [in Russ.].
7. Nesterov E.S., Pokhil A.E., Fedorenko A.V. Peculiarities of deep cyclone formation in the North Atlantic autumn. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 372, no. 2, pp. 92-101. [in Russ.].
8. Pokhil A.E. The impact of large-scale atmospheric circulation in the Northwest Pacific on the group of interacting cyclones. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 372, no. 2, pp. 76-91. [in Russ.].
9. Pokhil A.E., Glebova E.S. Influence of the tropical cyclone Omar on the weather in Europe. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2010, vol. 35, no. 9, pp. 604-610. DOI: 10.3103/S1068373910090049.
10. Pokhil A.E., Glebova E.C., Smirnov A.V. Calculation of tropical cyclones' and polar fronts and jet-streams interaction on mesoscale models of atmosphere ETA and WRF (NMM). *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 87-102. [in Russ.].
11. Pokhil A.E., Nesterov E.S., Fedorenko A.V. Uragany Atlanticheskogo okeana i shtormy Baltiyskogo morya. *Energiya, ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2019, no. 6, pp. 14-25. DOI: 10.7868/S0233361919060041. [in Russ.].
12. Pokhil A.E. O neobychnom povedenii tropicheskikh tsiklonov v Tikhom okeane i ob'yasnenii ego na osnovanii issledovaniya vzaimodeystviya vikhrey na chislennoy modeli // Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya "Problemy i perspektivy gidrometeorologicheskikh prognozov". Moskva, 17-21 yanvarya, 2000. [in Russ.].
13. Saprykina Y.V., Kuznetsov S.Y., Shtremel M.N., Andreeva N.K. Scenarios of nonlinear wave transformation in the coastal zone. *Oceanology*. 2013, vol. 53, no. 4, pp. 422-431. DOI: 10.7868/S0030157413040126. [in Russ.].
14. Saprykina Y.V., Kuznetsov S.Y., Divinskii B.V. Influence of processes of nonlinear transformations of waves in the coastal zone on the height of breaking waves. *Oceanology*. 2017. vol. 57, no. 3, pp. 383-393. DOI: 10.7868/S0030157417020186. [in Russ.].
15. *Stadkholm Dzhoshua Genri Pol*. Tropicheskie tsiklony i krupnomasshtabnaya dinamika atmosfery. Avtoreferat dis. kand. fizyuu-mat. nauk. Moscow, 2018. [in Russ.].

16. Timonov V.V., Smirnova A.I., Napol K.I. Ob ochagakh vzaimodeystviya okeana i atmosfery v Severnoy Atlantike. *Okeanologiya [Oceanology]*, 1970, vol. 5, pp. 745-749. [in Russ.].

17. Ugryumov A.I. Teplovoy rezhim okeana i dolgosrochnye prognozy pogody. Leningrad: Gidrometeoizdat publ, 1981, 176 p. [in Russ.].

18. Soomere T., Behrens A., Tuomi L., Nielsen J.W. Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, 2008, vol. 8, pp. 37-46.

19. WAMDI Group: Hasselmann S, Hasselmann K, Bauer E. et al. The WAM Model – a Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, vol. 18, pp. 1775-1810.

*Поступила 21.08.2020 г., одобрена после рецензирования 17.09.2020,
принята в печать 09.10.2020.*

*Submitted 21.08.2020; approved after reviewing 17.09.2020;
accepted for publication 09.10.2020.*