РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЕВ СОЧЕТАНИЙ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ И НАГОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД В АЗОВСКОМ МОРЕ

Н.А. Яицкая^{1,2,3}, И.А. Третьякова

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

² Сочинский научно-исследовательский центр РАН, Сочи, Россия

³ Филиал Института природно-технических систем РАН, Сочи, Россия
yaitskayan@gmail.com

Аннотация. Результаты ретроспективного анализа сочетаний штормового волнения и опасных нагонных явлений в зимний период в мелководном Азовском море с помощью математических моделей представлены в статье. Исходные данные, порядок вычислительных экспериментов и адаптационные расчеты кратко описаны. Показано, что с 1950 по 2015 гг. в Азовском море наблюдалось 102 дня, когда значительная высота волн при ветрах западной составляющей в центральной части моря равнялась 1.0-2.0 м; 11 дней с высотой волны 2.0-3.0 м. Все они характерны для безледного периода. Максимальная значительная высота волн в центральной части моря составила 3.1 м. Наибольшие высоты волн характерны для января, наименьшие из максимальных значений – для февраля. В это же время происходит наибольший подъем уровня воды в море. Зимы – 1967/68 гг., 1989/90 гг., 1999/00 гг. являются наиболее штормовыми, когда опасные ситуации наблюдались три-четыре месяца за сезон. Максимального развития волнение достигает в центральной части Азовского моря и южной оконечности Керченского пролива. При оценке междесятилетних изменений с 1950 по 2015 гг. выявлено, что расчетные величины нагонных превышений уровня имеют тенденцию к росту в декабре и феврале. В среднем разница между пиками волнения и уровня моря составляет 6-12 часов.

Ключевые слова: Азовское море, шторма, нагоны, опасные гидрометеорологические явления, математическое моделирование

Введение

Наибольшую угрозу для людей и прибрежной инфраструктуры представляют сочетания опасных явлений. Суммарное воздействие нагонов и штормового волнения в зимний период может способствовать разрушению установившегося льда, переносу его по направлению к берегу. Нагонные явления в Азовском море наблюдаются практически во всех прибрежных районах. Особенно сильны колебания уровня в Таганрогском заливе. Наибольшие подъемы воды фиксируются в холодный период года. В это же время развивается и штормовая активность. Сдерживающим фактором при наступлении сочетаний таких опасных гидрометеорологических явлений становится припайный лед. Наиболее катастрофические случаи описаны в литературе, научной и СМИ, на основе наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях и со слов

очевидцев. Но для исследования таких сложных явлений, как сочетание штормового волнения и нагонов в холодный период года, выявления общих закономерностей развития, оценки воздействия на прибрежную инфраструктуру, необходимую учет и описание всех произошедших случаев, их пространственно-временная детализация.

Поэтому целью работы стал ретроспективный анализ с помощью математических моделей случаев сочетаний штормового волнения и нагонных явлений в зимний период в Азовском море.

Материалы и методы

Для ретроспективного анализа сочетаний штормового волнения и опасных нагонных явлений в зимний период в мелководном Азовском море применялась связка моделей: SWAN (Simulating WAVes Nearshore Model) и

SASMO (Sea of Azov Surge MOdel). Спектральная модель SWAN [1] – это волновая модель третьего поколения для получения реалистичных параметров при заданном ветре, батиметрии и текущих условиях в мелководных акваториях – прибрежных регионах, озерах и эстуариях. Модель разработана на факультете Гражданского строительства и наук о Земле Делфтского технического университета, Нидерланды.

Оригинальная трехмерная гидродинамическая модель SASMO [2] позволяет оперативно получать оценочные картины гидрофизических параметров. Простая численная реализация модели осуществляется благодаря использованию конечно-разностных методов на равномерной прямоугольной сетке без предварительного преобразования расчетной области из нерегулярной в регулярную.

Для обеих моделей в качестве исходных использован набор данных:

(а) данные об абсолютных глубинах и положении береговой линии моря, включая острова;

(б) информация о скорости и направлении ветра, в виде серий данных меридиональной и зональной компонент.

В работе использована цифровая модель рельефа дна (ЦМР) [3], составленная на основе новейшей батиметрической карты [4].

На основе ЦМР были построены регулярные сетки для Азово-Черноморского региона, Азовского моря в целом и отдельных районов с разным пространственным разрешением. Все работы с батиметрическими данными и ГИС выполнялись с использованием программного продукта ArcGIS (ESRI, США).

Адаптация модели SWAN к условиям Азовского и Черного морей и ее верификация выполнялась в соответствии с подходом [5]. В результате проведенных экспериментов был определен ряд основных процессов и коэффициентов для вычислений. В основу положена трехуровневая схема выложенных расчетов: (i) Азово-Черноморский бассейн; (ii) Азовское море; (iii) Керченский пролив, Таганрогский залив, косы. Такой подход позволяет получать детальные картины

пространственного распределения параметров с заданной точностью без статистической обработки. Информация о непрерывном ветровом воздействии при расчете параметров волнения, представленная в виде наборов меридиональной (U) и зональной компонент (V) на высоте 10 м над уровнем моря с дискретностью 6 ч., была выбрана из реанализа NCEP/NCAR [6].

Адаптация модели SASMO к условиям Азовского моря выполнялась для периода с 2015 по 2017 гг. Ветровой форсинг задавался по данным ГМС «Таганрог» с временной дискретностью 3-6 ч. Для оценки качества расчетов рассчитывалась средняя абсолютная ошибка (MAE) за первые сутки и за весь срок вычислений. По результатам адаптационных расчетов для 2015 г. MAE за первые сутки составила 34,9 м, а за весь период расчета – 0,424 м. Для расчета на 22-24 апреля 2016 г. значение MAE за первые сутки равнялось 0,126 м, за весь период – 0,301 м; 21-23 апреля 2017 г. MAE за первые сутки – 0,182 м, за весь период расчета – 0,299 м. Таким образом удалось достичь того, чтобы за первые сутки расчетов ошибка не превышала 0,2 м. Также в результате тестовых экспериментов показано, что на «разгон» модели необходимо 6 часов, что важно учитывать при задании начальных условий ветрового форсинга. Расчетные значения в целом адекватно описывают динамику хода уровня по данным наблюдений.

Результаты и обсуждение

В период с 1950 по 2015 гг. наблюдалось 102 дня, когда значительная высота волн при ветрах западной составляющей в центральной части моря составляла 1,0-2,0 м; 11 дней с высотой волны 2,0-3,0 м. Все они характерны для безледного периода. Максимальная значительная высота волн в центральной части моря, восстановленная с помощью математического моделирования, составила 3,1 м и наблюдалась 13 января 1968 года (длина волны 47 м, период волны 6,6 м). При этом волнение высотой более 3,0 м держалось более 4 часов и сопровождалось ветрами юго-западной составляющей. В это же время в Таганрогском заливе в районе

устьевого взморья р. Дон высота значительных волн составляла 1.0 м (длина волны 12.1 м, период волны 3.4 м). В рамках суточного хода максимальные значения параметров волнения как правило приходятся на время с 15:00 до 19:00. Минимальные – на ночное время.

В целом максимальные высоты волн характерны для января. Так, наибольшие значения параметров волнения за рассматриваемый период отмечаются зимой 1967/68 гг. (высоты волн более 3.0 м). Немного меньше значения в марте. Наименьшие из максимальных значений – в феврале, декабре и ноябре.

Наиболее штормовыми, когда опасные ситуации наблюдались три-четыре месяца за сезон, являются зимы – 1967/68 гг., 1989/90 гг., 1999/00 гг. Также можно отметить 1972/73 гг. и 1982/83 гг. При штормовых условиях наблюдается активное развитие волн зыби. В центральной части Азовского моря высота зыби может достигать практически 0.4 м.

Наибольшей силы волнение достигает в центральной части Азовского моря и южной оконечности Керченского пролива. Наименьшей – в северной части Таганрогского залива и центре Керченского пролива. Как и для нагонных явлений, перед которыми зачастую возникает мощный по силе сгон [8], для сильного волнения характерно некоторое уменьшение высоты волны перед началом шторма и далее стремительное развитие. Зачастую процессы развития и затухания сгонно-нагонных и штормовых явлений в Азовском море являются синхронными, таким образом, возникает сочетание опасных явлений.

Для Азовского моря, как и для Северного Каспия [5], при среднем по силе волнении отсутствует значительная контрастность полей ветрового волнения, что, по-видимому, может объясняться небольшой площадью и глубиной. Парные линейные регрессии, рассчитанные для разных районов моря, показали, что в параметрах волнения пар (Таганрогский залив – собственно море; Керченский пролив (северная часть, центр, южная часть) – собственно море) выделяется две моды волнения – при северо-восточных ветрах, т.е. сгонные ветра, и юго-западных

ветрах, т.е. нагонные ветра. Для этих сочетаний коэффициенты детерминации в отдельные годы составляют более 0.7. Отсутствует связь лишь между районами Таганрогский залив и Керченский пролив (коэффициент детерминации менее 0.1).

Результаты расчетов с помощью модели SASMO оценивались для точки в Таганрогском заливе с координатой 47.085 с.ш. 39.24 в.д.

При анализе распределения максимальных расчетных уровней по месяцам выявлено, что максимальный подъем воды приходится на февраль, что хорошо согласуется с данными статистического анализа метеопараметров в Таганроге. Средние значения уровня моря, полученные в результате реанализа, схожи во все месяцы за исключением ноября, когда рассчитанные величины не превышают 1.5 м. К наиболее опасному месяцу по уровням нагонов за весь рассматриваемый период можно отнести март, когда больше половины значений превышают 2 м.

При оценке междесятилетних изменений с 1950 по 2015 гг. выявлено, что декабрь и февраль имеют тенденцию к росту расчетных величин. Ноябрь и январь не имеют ярко выраженного тренда.

Максимальный уровень снизился в 1960-е – 1970-е гг. после чего начал снова повышаться. На 30 лет с 1980 по 2009 пришлось 3 наиболее сильных подъема уровня (1980-е – январь, 1990-е – март, 2000-е – февраль).

Синхронный ретроспективный расчет нагонных колебаний уровня Азовского моря и штормового волнения позволил выявить ряд важных особенностей режима водоема. В среднем разница между пиками волнения и уровня моря составляет 6-12 часов. Интересным представляется факт, что не всегда пик развития волновых параметров происходит до пика нагонного увеличения уровня моря. Также, как не во всех случаях опасное повышение уровня моря сопровождается штормовым волнением. Это объясняется длительным односторонним, но не сильным, ветровым воздействием.

Заключение

Разработанный подход к расчету ветрового волнения для мелководного водоема с последовательностью вложенных сеток позволил восстановить для зимних сезонов Азовского моря ряды параметров – значительная высота, средние (нулевой и минус первый моменты спектра) период, длина и направление волны, параметры волн зыби. Средняя ошибка расчетных значений высот значительных волн для тестовых экспериментов при максимальной высоте 3 м составила 10-20 см.

На основе ретроспективного анализа установлен ряд особенностей. Для Азовского моря характерно наличие сочетаний опасных явлений – штормовое волнение, как правило, сопровождается нагонными явлениями, т.е. наибольшую высоту волн вызывают ветра юго-западной составляющей; ситуации с высотой волны более 2 м в центральном районе моря из года в год возникают

практически в одни и те же календарные сроки; для мелководного Азовского моря при среднем по силе волнении отсутствует значительная контрастность полей ветрового волнения. К наиболее опасному месяцу по уровням нагонов за весь рассматриваемый период относится март, где больше половины значений превышают 2 м. Максимальный расчетный уровень пришелся на февраль, что хорошо согласуется с данными, полученными ранее при рассмотрении статистик метеопараметров в Таганроге.

Эффективность примененной схемы расчета позволяет использовать ее для ретроспективного анализа ветрового волнения и уровня в других не глубоких водоемах или с обширными мелководными областями, а также при выполнении практических работ по прогнозированию.

Литература

1. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research*. 1999. 104(C4): 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622
2. Чикин А.Л. Об одном из методов расчета параметров течений в водоемах с большой неоднородностью глубин // *Водные ресурсы*. 2005. 32(1): 55–60.
3. Магаева А.А., Третьякова И.А. Создание цифровой модели рельефа дна Азовского моря // В кн.: *Экология. Экономика. Информатика*. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2015. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 266–269.
4. Матишов Г.Г. Батиметрия и закономерности формирования рельефа дна Азовского моря // В кн.: *Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей*. Т. VIII. Под ред. Г.Г. Матишова. 2006. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 31–42.
5. Яшуккая Н.А. Результаты ретроспективного анализа ветрового волнения в Азовском море (на примере зим 2015–2017 гг.) // *Наука Юга России*. 2017. 13(4):60–70. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-60-70.
6. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. 77(3): 437–471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
7. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клеценков А.В., Кириллова Е.Э. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // *Вестник Южного научного центра*. 2014. 10(1): 17–24.

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE CASES OF WIND WAVES AND STORM SURGES COMBINATIONS DURING THE WINTER PERIODS IN THE SEA OF AZOV

N.A. Yaitskaya^{1,2,3}, I.A. Tretyakova

¹ Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

² Sochi Research Center of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

³ Branch of the Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Russia
yaitskayan@gmail.com

Abstract. The results of a retrospective analysis of the combinations of stormy waves and dangerous surge phenomena in the winter in the shallow Sea of Azov using mathematical models are presented in the article. The initial data, the order of computational experiments, and adaptation calculations are briefly described. It is shown that from 1950 to 2015, 102 days were observed in the Sea of Azov, when a significant height of the waves during the winds of the western component in the central part of the sea was 1.0-2.0 m; 11 days with a wave height of 2.0-3.0 m. All of them are characteristic for the ice-free period. The maximum significant wave height in the central part of the sea was 3.1 m. The highest wave heights are characteristic for January, the lowest of the maximum values - for February. At the same time, the greatest rise in sea level occurs. Winters - 1967/68, 1989/90, 1999/00 are the most stormy when dangerous situations were observed for three to four months per season. Excitement reaches its maximum development in the central part of the Sea of Azov and the southern tip of the Kerch Strait. In assessing the inter-decade changes from 1950 to 2015, it was found that the calculated values of surge surges of the level tend to increase in December and February. On average, the difference between the peaks of unrest and sea level is 6-12 hours.

Keywords: the Sea of Azov, storm, storm surges, natural hazards, mathematical modelling

References

1. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research*. 1999. 104(C4): 7649–7666. DOI: 10.1029/98JC02622
2. Chikin A.L. A technique for evaluating flow parameters in water bodies with a highly heterogeneous depth // *Water Resources*. 2005. 32(1):55–60. DOI: 10.1007/s11268-005-0007-2 (In Russian)
3. Magaeva A.A., Tretyakova I.A. [Creation digital elevation model of bottom sea of Azov] // In: *Ecologiya. Ekonomika. Informatika. T. 3: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskiy monitoring*. [Ecology. Economics. Informatics. Vol. 3: Geoinformation technologies and space monitoring]. 2015. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 266–269. (In Russian).
4. Matishov G.G. [Bathymetry and patterns of formation of the relief of the bottom of the Sea of Azov] // In: *Ekosistemnye issledovaniya Azovskogo, Chernogo, Kaspiyskogo morey*. [Ecosystem studies of the Sea of Azov, Black Sea, Caspian Sea. Vol. 8]. 2006. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 31–42. (In Russian).
5. Yaitskaya N. [The results of hindcasting experiments of wind wave in the Sea of Azov (as illustrated by winters 2015-2017)] // *Science in the South Russia*. 2017. 13(4): 60–70. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-60-70 (In Russian).
6. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. 77(3): 437–471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
7. Matishov G.G., Chikin A.L., Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V., Kleshchenkov A.V., Kirillova E.E. [Extreme flooding of the Don delta in spring of 2013: chronology, formation conditions, and consequences] // *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 2014. 10(1): 17–24. (In Russian).