

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-42-57>

УДК 551.465.75

## **Внутри- и межгодовая изменчивость сгонно-нагонных колебаний уровня моря в Северном Каспии**

***А.В. Павлова<sup>1,2</sup>, В.С. Архипкин<sup>2</sup>, С.А. Мысленков<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия  
anna.pavlova-16@yandex.ru*

В работе используются результаты гидродинамического моделирования колебаний уровня моря в Каспийском море, полученные с помощью модели ADCIRC за период с 1979 по 2017 год. При моделировании нагонов применялась нерегулярная триангуляционная расчетная сетка с изменяющимся размером ячеек, которая легко адаптируется к изменениям береговой линии и глубин и, следовательно, более точно описывает прибрежные зоны.

Показано, что сезонная изменчивость сгонно-нагонных колебаний уровня характеризуется максимумом в зимний и весенний периоды и минимумом – в летний. На западном побережье Северного Каспия максимум наблюдается в декабре–феврале, а на северном и восточном побережьях – в феврале и марте. Оценены площади затопления прибрежной территории российского сектора моря. Для нагона 12–16.03.1995 г., одного из самых катастрофических по своим последствиям, площадь затопления суши составила 53 % от возможной площади затопления, для нагона 27.03 – 1.04.2015 г. – 71 %. Тяжелые последствия нагона в 1995 г. обусловлены тем, что среднегодовой уровень моря, который определяет возможную площадь затопления, в 1995 г. был значительно выше, чем в 2015 году.

*Ключевые слова:* ADCIRC модель (ADCIRC), Каспийское море (Северный Каспий), неструктурированная расчетная сетка, сгонно-нагонные явления, уровень моря, численное моделирование

## **Intraannual and interannual variability of storm surges in the North Caspian Sea**

***A.V. Pavlova<sup>1,2</sup>, V.S. Arkhipkin<sup>2</sup>, S.A. Myslenkov<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
anna.pavlova-16@yandex.ru*

The article presents the results of hydrodynamic modeling of sea level fluctuations in the Caspian Sea using the ADCIRC model for the period from 1979 to 2017. Surges are simulated using an irregular triangulation computational grid with a changing cell size, that easily adapts to changes in shoreline and depth and, therefore, more accurately describes coastal zones.

It is found that the seasonal variability of surges is characterized by a maximum in winter and spring and by a minimum in summer. On the western coast of the North Caspian Sea, the maximum sea-level fluctuations are observed in December-February, and on the northern and eastern coasts – in February and March. The areas of inundation of the coastal territory of the Russian sector of the sea are identified. For the surge on March 12–16, 1995, that was one of the most catastrophic ones in terms of its consequences, the inundation area made up 53% of the possible flooded area, and the inundation area for the surge registered on March 27–April 1, 2015 made up 71 %. The more severe consequences of the surge in 1995 are associated with the fact that the mean annual sea level, that determines the possible flooded area, in 1995 was much higher than in 2015.

*Keywords:* ADCIRC, Caspian Sea, unstructured grid, storm surge, sea level, numerical modeling

## Введение

Прибрежная зона Северного Каспия характеризуется наличием обширных мелководий и низких пологих берегов. Это способствует тому, что здесь часто возникают большие сгонно-нагонные колебания уровня моря. Подъем уровня во время штормовых нагонов может приводить к катастрофическим последствиям – вызывать наводнения и затопления прибрежных районов. С другой стороны, понижение уровня может сопровождаться осушением прибрежных территорий и создавать проблемы безопасности судоходства в прибрежных водах и вблизи портов [1].

В последнее время изучение Каспийского моря проводится не только в связи с интенсивным развитием добычи углеводородов [3], но и с повторяющимися значительными колебаниями уровня Каспия. За время инструментальных наблюдений (с 1830 г.) амплитуда колебаний уровня Каспийского моря достигала 4 м. Самое низкое стояние уровня наблюдалось в 1977 г. и составило -29 м, что является самой низкой отметкой за последние 400–500 лет [2, 9]. К середине 1995 г. уровень вырос на 2,5 м, после чего снизился к 2002 г. на 1 м [7, 8]. К 2006 г. уровень поднялся до отметок -26,7 м и затем вновь начал снижение.

В последние десятилетия одним из основных методов изучения изменчивости сгонно-нагонных колебаний уровня моря в связи с недостаточным количеством прибрежных наблюдательных станций и нерегулярностью наблюдений является математическое моделирование. Существенным шагом в повышении адекватности моделирования динамики Каспийского моря стал переход к неструктурированным сеткам и технологиям параллельных вычислений на многопроцессорных системах. Неструктурированные сетки легко адаптируются к изменениям береговой линии и глубин моря и, следовательно, более точно описывают характер процессов и очертания прибрежных зон, тем самым повышая пространственное разрешение там, где это необходимо. Хотя использование неструктурированных сеток требует большего количества операций на каждый расчетный узел по сравнению с прямоугольными сетками, за счет

оптимальной триангуляции расчетной области можно существенно уменьшить количество узлов расчетной сетки.

Целью данной работы является изучение процессов формирования сгонно-нагонных колебаний в Северном Каспии с помощью модели ADCIRC (ADvanced CIRCulation) за период с 1979 по 2017 год. Модель ADCIRC ранее была успешно применена для моделирования нагонов в Белом и Баренцевом морях [5], а также в Охотском море [4].

### **Материалы и методы исследования**

Моделирование сгонно-нагонных колебаний на Каспийском море выполнялось с помощью модели ADCIRC. Первоначально модель была разработана в США для моделирования процессов в прибрежных зонах с высоким разрешением [10, 11]. Она использовалась федеральными агентствами, научными исследователями и частными компаниями для моделирования широкого спектра явлений, включая штормовые нагоны, приливы и приливно-отливные течения. Модель ADCIRC решает уравнения мелкой воды, дискретизированные в пространстве, используя метод конечных элементов, который позволяет создавать очень гибкие неструктурированные сетки. Аппроксимация по времени проводится методом конечных разностей.

Модель может быть запущена либо в двухмерном режиме, проинтегрированном по глубине (2DDI), либо в трехмерном режиме (3D). Нами использовалась двумерная модель. В любом случае превышение уровня определяется путем решения проинтегрированного по глубине уравнения неразрывности в виде обобщенного уравнения волн и неразрывности GWCE (Generalized Wave-Continuity Equation) [15]. Скорость течений рассчитывается по уравнениям движения. Для учета эффектов сгонно-нагонных колебаний необходимы поля ветра и давления.

Для точного моделирования сгонно-нагонных колебаний в ADCIRC были включены такие функции, как затопление и осушение прилегающих территорий.

Отметим, что методология неструктурированных триангуляционных сеток обеспечивает высокую степень детализации прибрежных районов. В работе на основе морских навигационных карт масштаба 1:25000, 1:100000, 1:750000 была создана цифровая модель рельефа дна Каспийского моря и прилегающей суши. Минимальный размер ячейки равен 500 м (у берегов), максимальный – 10 км (в центре моря). Расчетная сетка была составлена относительно абсолютного единого нуля поста для Каспийского моря, равного -28 м БС, с учетом затопления при поднятии уровня до 3 м.

В качестве входных данных задавались поля приземного ветра и атмосферного давления из реанализа NCEP/CFSR. Данные, охватывающие период с 1979 по 2010 г., имеют часовой интервал и пространственное

разрешение  $\sim 0,3^\circ \times 0,3^\circ$ , временной шаг – 1 ч [13]. Для периода с 2011 по 2017 год использовался реанализ версии NCEP/CFSv2 (Climate Forecast System, Version 2), имеющий пространственное разрешение  $\sim 0,2^\circ \times 0,2^\circ$  [14].

В качестве входных данных задавалась также концентрация морского льда (OSI-450), полученная на основе данных пассивных микроволновых радиометров SMMR, SSM/I и SSMIS и реанализа ECMWF ERA-Interim [6]. Данные охватывают период с 1979 по 2017 год с суточным интервалом и пространственным разрешением  $\sim 0,2^\circ \times 0,2^\circ$ .

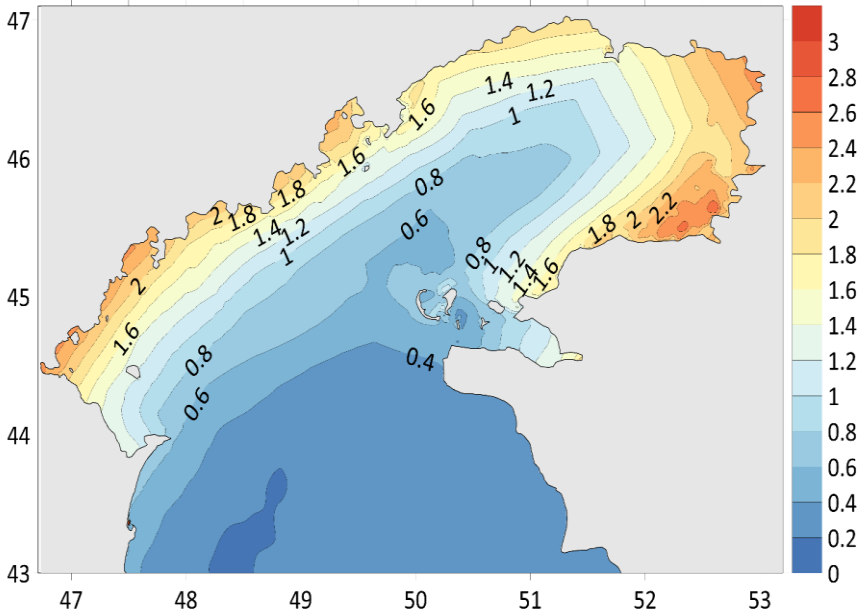
## Результаты

Для оценки качества модели полученные результаты сравнивались с данными наблюдений уровенных постов на о. Тюлений и в Махачкале за 2003–2017 гг. Коэффициент корреляции для о. Тюлений менялся в пределах 0,79–0,88, а для Махачкалы – 0,67–0,79. Среднеквадратическая погрешность составляла, в среднем, для о. Тюлений – 0,11 м, для Махачкалы – 0,06 м. Если исключить колебания уровня моря с амплитудой менее 10 см, то корреляция в среднем увеличивается на 0,04. Например, в 2007 г. коэффициент корреляции был равен 0,86, после исключения колебаний – 0,91. Подобные результаты позволяют сделать вывод о том, что, во-первых, модель адекватно описывает изменения уровня моря, а во-вторых, ADCIRC хорошо воспроизводит нагоны. Более детальное описание статистического анализа данных представлено в [12].

Анализ межгодовых пространственных колебаний уровня в Северном Каспии показал, что здесь имеют место две локальные области максимальных нагонов. Первая находится в северо-западной части вдоль взморья в дельте Волги, где наблюдались нагоны высотой до 2,5 м. Вторая область расположена на востоке, где высота нагонов достигала 2,7 м (рис. 1).

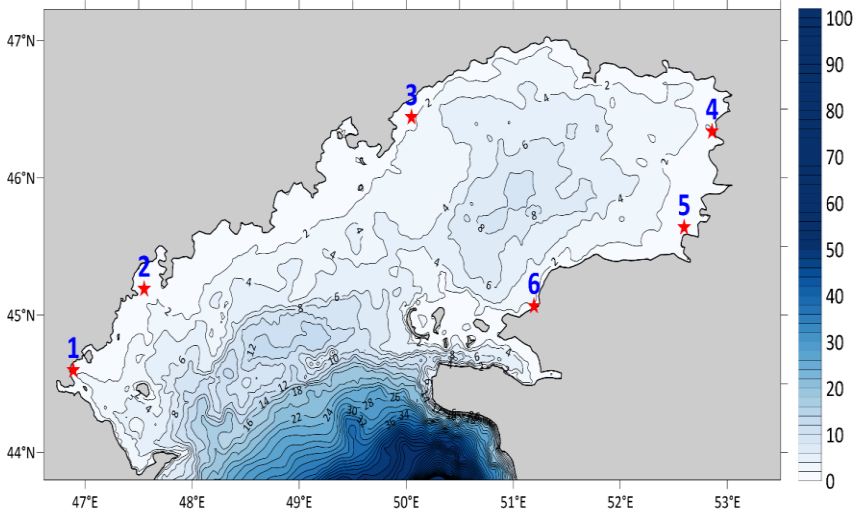
Для более детального анализа были выделены 6 точек вдоль берега моря, которые характеризуют районы исследования: 1 и 2 – на западе, 3 – на севере, 4 и 5 – на востоке, 6 – на юго-западе (рис. 2). Точки выбирались с учетом глубины моря более 1 метра при наименьшем среднегодовом уровне моря.

Распределение количества случаев сгонно-нагонных колебаний более 1 м по годам за период исследования показало, что в западной и северной частях моря количество сгонов превышает количество нагонов (рис. 3). У восточного побережья картина более равномерная, здесь от года к году преобладают либо сгоны, либо нагоны. Такое распределение объясняется прохождением большего количества циклонов, которые вызывают значительные колебания уровня моря по сравнению с антициклонами, несмотря на то, что в течение года преобладает антициклоническая деятельность.



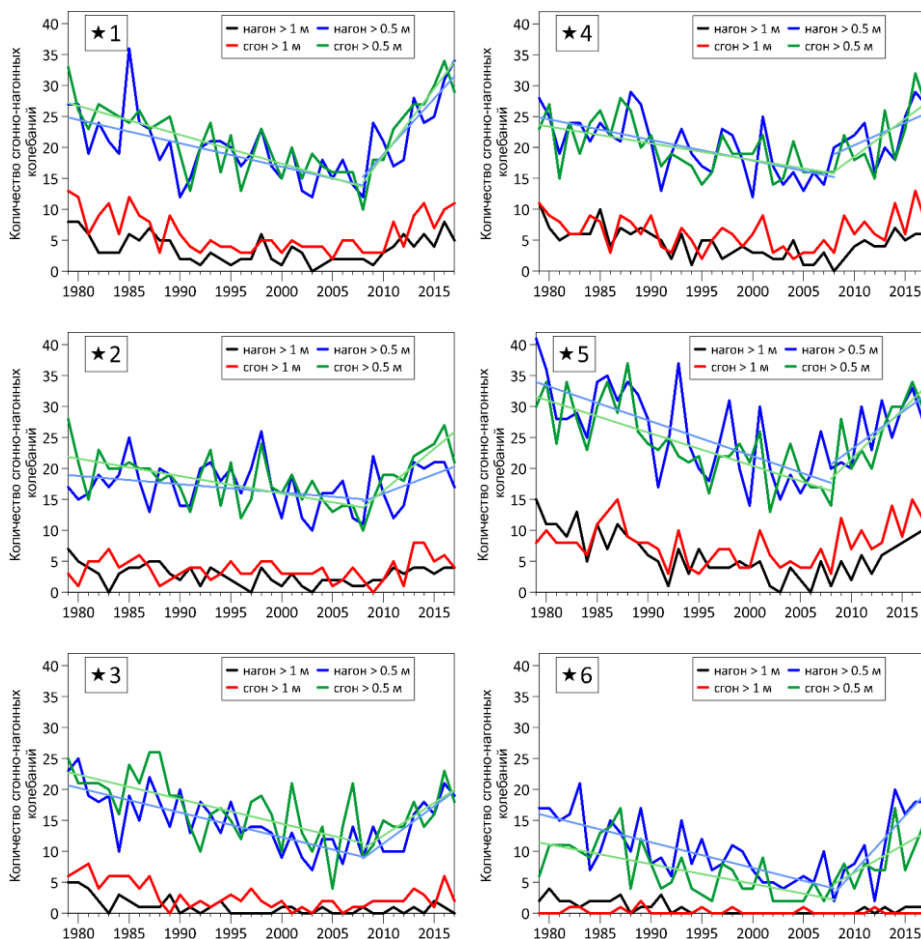
**Рис. 1.** Наибольшие рассчитанные величины нагонов в Северном Каспии за период с 1979 по 2017 г.

**Fig. 1.** The largest calculated surge values in the Northern Caspian for the period from 1979 to 2017.



**Рис. 2.** Карта батиметрии Северного Каспия с расположением шести выделенных точек.

**Fig. 2.** Bathymetry of the Northern Caspian with the location of six allocated points.



**Рис. 3.** Межгодовое распределение сгонно-нагонных колебаний более 0,5 и 1 метра.

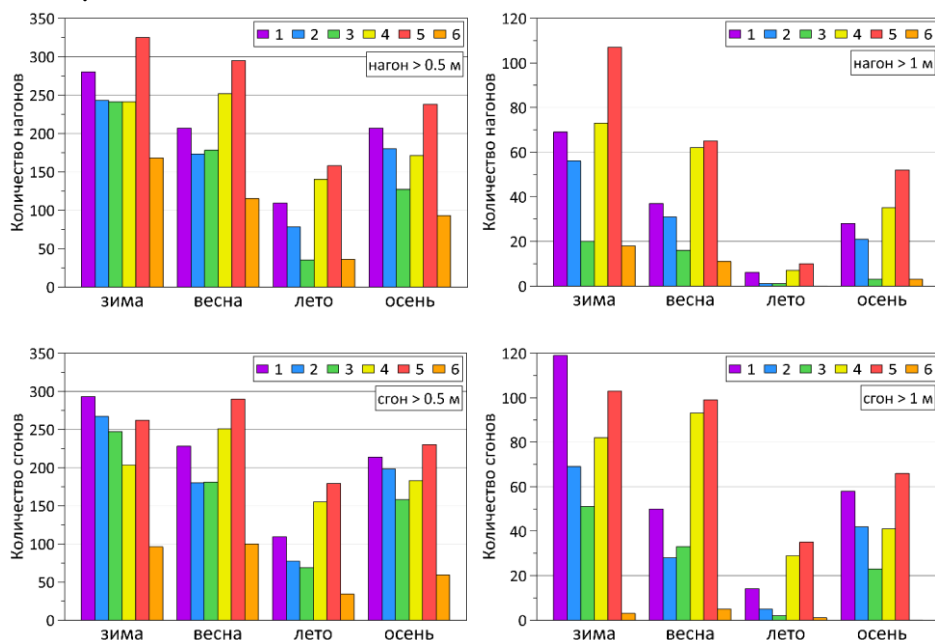
**Fig. 3.** Interannual distribution of wind-surges fluctuations of more than 0.5 and 1 meter.

В период с 1979 г. по 2005–2008 гг. выявлена многолетняя тенденция уменьшения количества случаев формирования сгонно-нагонных колебаний уровня моря на треть и более значений. Позднее наблюдается заметное увеличение числа сгонно-нагонных колебаний до прежних среднегодовых значений. Следует отметить, что подобное распределение отмечается в многолетнем ходе изменения уровня Каспийского моря, что в свою очередь, преимущественно зависит от климатических изменений. Таким образом, было выявлено, что с подъемом уровня моря количество колебаний уменьшалось.

В период с 1979 по 2017 г. в точке 1 наблюдалось 140 нагонов более 1 м, в других точках: 2 – 109, 3 – 40, 4 – 177, 5 – 234, 6 – 32. Количество сгонов за этот же период в точке 1 – 241, 2 – 144, 3 – 109, 4 – 245, 5 – 303, в точке 6 – 9.

Количественный анализ показал, что в среднем в году наблюдается 7–10 нагонов высотой более 1 м суммарной продолжительностью до 20–30 суток. При колебаниях более 0,5 м количество нагонов на западном берегу изменяется в пределах от 10 до 36, а на восточном – от 12 до 41. На севере значения не превышают 26.

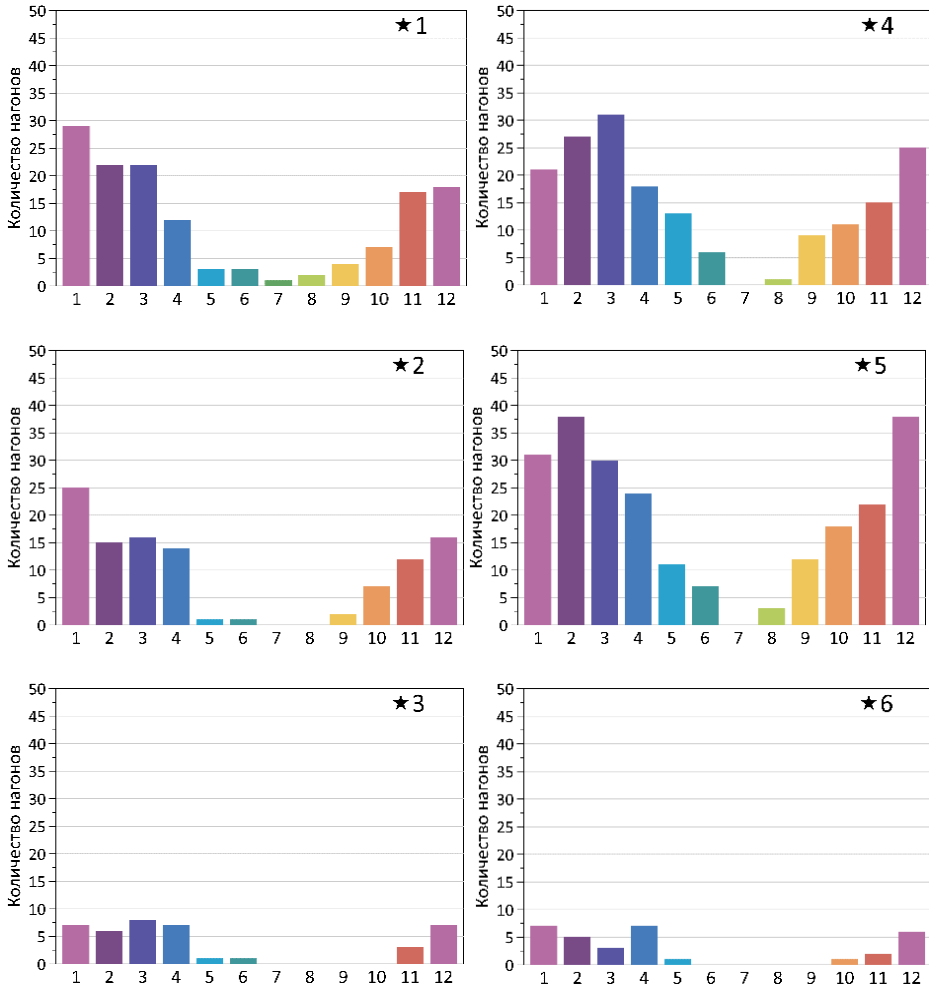
На рис. 4 представлена сезонная изменчивость сгонно-нагонных колебаний уровня моря. Минимальное количество колебаний наблюдается в летний период. Максимум нагонов приходится на зимний период: наблюдается около 300 при значениях нагона более 0,5 м от 50 на западном побережье до 110 на восточном при нагонах более 1 м. При колебаниях уровня, превышающих 0,5 м, максимум сгонов на западном побережье приходится на зимний период, в то время как на восточном побережье максимум с количеством около 300 наблюдается весной. При этом количество сгонов более 1 м менялось от 70 до 120.



**Рис. 4.** Сезонное распределение сгонно-нагонных колебаний более 0,5 и 1 метра.

**Fig. 4.** Seasonal distribution of wind-surge fluctuations of more than 0.5 and 1 meter.

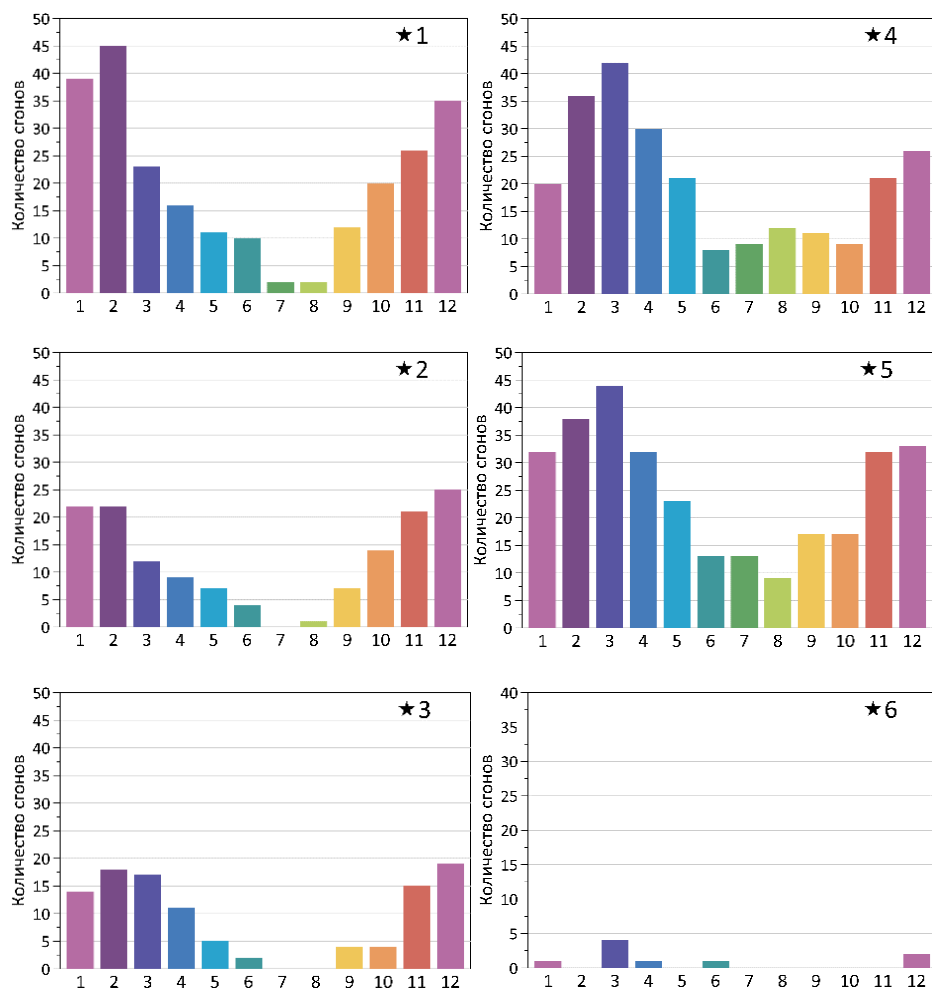
Более детальное рассмотрение внутригодовой изменчивости показывает, что на западном побережье максимум колебаний приходится на декабрь-февраль, в то время как на северном и восточном побережье – на февраль и март (рис. 5, 6).



**Рис. 5.** Внутригодовое распределение нагонов более 1 метра.  
**Fig. 5.** Intra-annual distribution of surges over 1 meter.

Разные сезоны характеризуются различной штормовой активностью, и, соответственно, площадь территории, которая может быть затоплена, также различается. Затопление территории зависит в первую очередь от уровня моря и рельефа рассматриваемой территории.





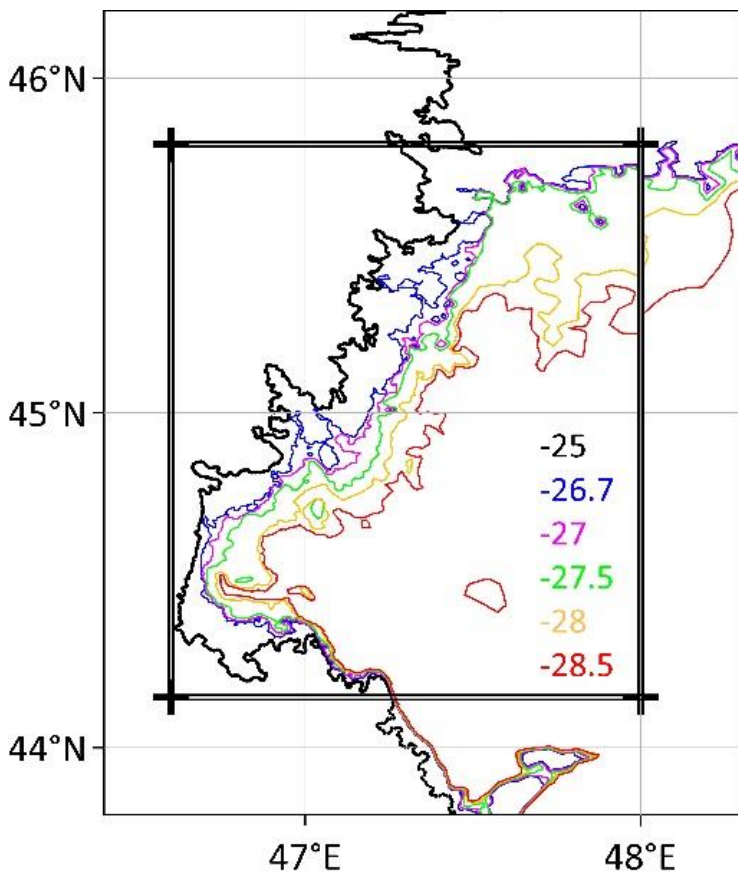
**Рис. 6.** Внутригодовое распределение сгонов более 1 метра.  
**Fig. 6.** Intra-annual distribution of negative surges over 1 meter.

Площадь затопления рассчитывалась для прибрежной территории российского сектора с ограничениями по широте от  $44,15^\circ$  до  $45,8^\circ$  с. ш. и по долготу от  $46,6^\circ$  до  $48^\circ$  в. д. (рис. 7). Отсчет выполнялся от условного среднегодового уровня моря при максимальном затоплении -25 м БС.

С помощью модели ADCIRC была выполнена серия расчетов для условий нагона, наблюдавшегося 12–16 марта 1995 г., который вызвал серьезные последствия, и для нагона 27 марта–1 апреля 2015 г.

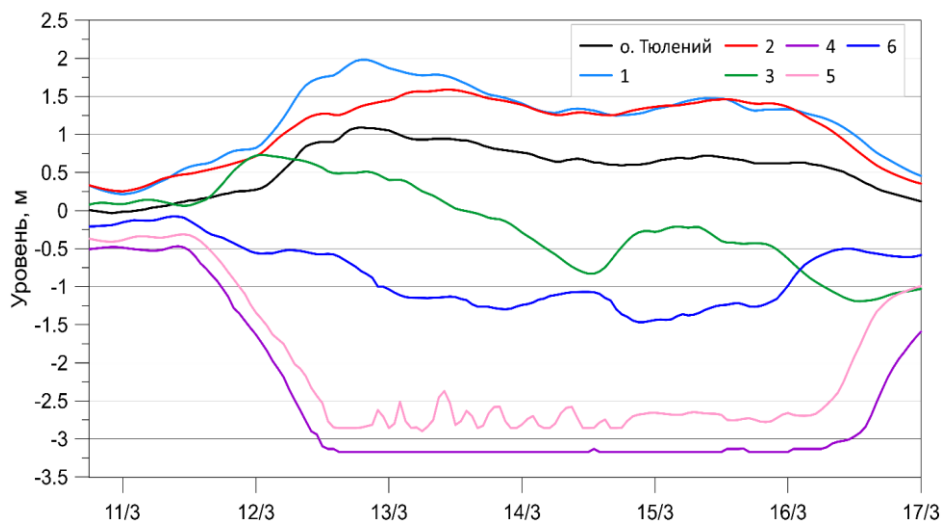
Во время нагона 1995 г. отмечалось резкое увеличение горизонтальных градиентов давления над Северным Каспием за счет смещения мощного антициклона с севера и углубления циклона над Черным морем.

В северной части Каспийского моря отмечался сильный восточный-северо-восточный (12–13 марта) и восточный (с 14 марта) ветер со скоростями до 20 м/с. Во время нагона образовалось течение с общим направлением на запад-юго-запад со скоростями до 1 м/с.



**Рис. 7.** Границы зон затопления при разных уровнях моря.  
**Fig. 7.** Borders of inundation area at different sea levels.

На рис. 8 представлены изменения уровня в шести выбранных точках и на о. Тюлений. В выбранных точках наибольший нагон (около 2 м) (точка 1) сформировался в северо-западной части моря 12–13 марта, а наибольший сгон (более 3 м) (точка 4) – в эти же сроки в восточной части. На о. Тюлений величина нагона составила 1,3 м. Также с помощью совместного моделирования ADCIRC+SWAN был оценен вклад волнения в высоту нагона, который на о. Тюлений не превышал 5 см.

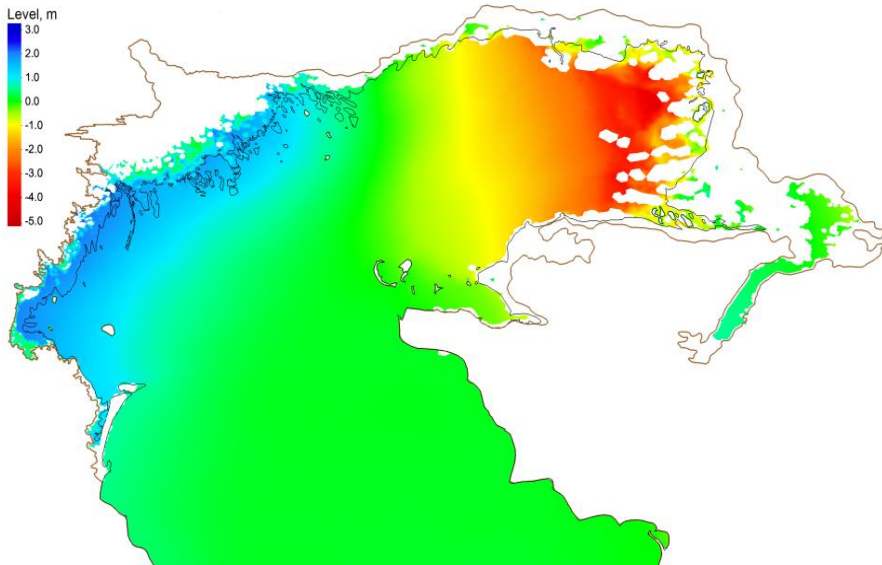


**Рис. 8.** Изменения уровня моря во время нагона 12–16 марта 1995 г.  
**Fig. 8.** Sea level during the surge on March 12-16, 1995.

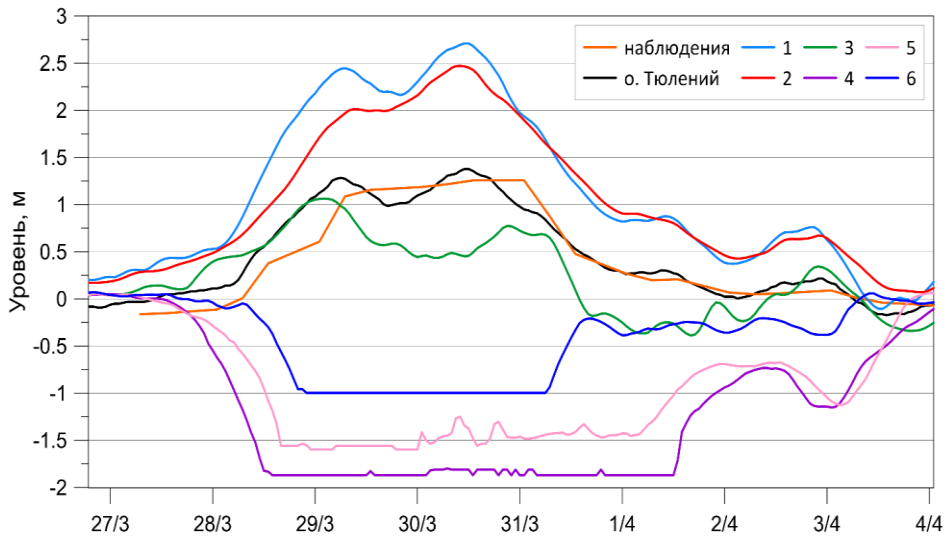
Более наглядно изменения уровня в момент катастрофического нагона представлены на рис. 9, где более точно определены значения величины максимального нагона (2,7 м) и максимального сгона (3,5 м). Рассчитанная ширина полосы затопления достигает 25 км. Площадь затопления составила 53 % от возможной.

Нагону в конце марта 2015 года способствовало формирование севернее Каспийского моря мощного антициклона, при этом над территорией Европы находилась область пониженного давления. В результате над Северным Каспием наблюдался ветер преимущественно восточных и юго-восточных направлений со скоростями до 17 м/с. Особенности колебаний уровня в этот период схожи с нагоном 1995 года. Наибольший нагон (более 2,5 м) отмечен в точке 1, а наибольший сгон (около 2 м) – в точке 4 (рис. 10). Характерно наличие двух пиков нагона в точке 1 и на о. Тюлений. Оценка влияния волнения на уровень моря на о. Тюлений показала, что вклад волнения достигал 5 см.

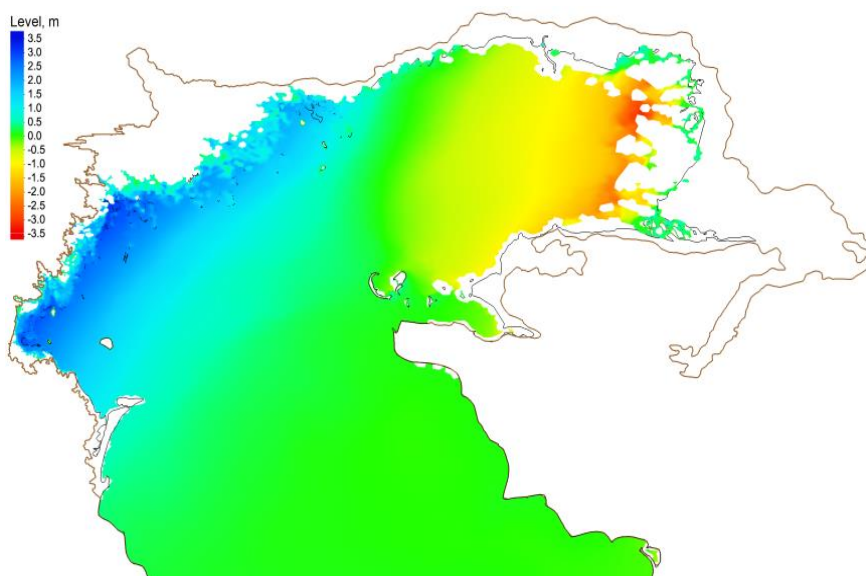
Максимальные значения нагона в момент его наибольшего развития составили у западного побережья 3 м (рис. 11). Величина сгона у восточного побережья также достигала 3 м. Рассчитанная полоса затопления составила 15 км. Площадь затопления составила 71 % от возможной. Более тяжелые последствия нагона в 1995 г. связаны с тем, что среднегодовой уровень моря, от которого зависит возможная площадь затопления, в 1995 г. был на 1,3 м выше, чем в 2015 году.



**Рис. 9.** Пространственное распределение рассчитанного уровня моря в Северном Каспии в 12 ч 13 марта 1995 года.  
**Fig. 9.** The calculated sea level in the Northern Caspian at 12:00 13 March 1995.



**Рис. 10.** Изменения уровня моря во время нагона 27 марта – 1 апреля 2015 г. и наблюдения уровня на о. Тюлений.  
**Fig. 10.** Sea level during the surge on March 27 - April 1, 2015 and sea level observations at Tyuleniy island.



**Рис. 11.** Пространственное распределение рассчитанного уровня моря в Северном Каспии в 12 ч 30 марта 2015 года.

**Fig. 11.** The calculated sea level in the Northern Caspian at 12:00 30 March 2015.

### Заключение

На основе данных математического моделирования выполнено исследование формирования сгонно-нагонных колебаний в Северном Каспии за период с 1979 по 2017 год.

Межгодовой пространственный анализ колебаний уровня показал наличие двух локальных областей с максимальными величинами нагонов. Первая находится в северо-западной части вдоль взморья Волги, где наблюдались нагоны высотой до 2,5 м. Вторая область расположена на востоке, где значения высот нагонов достигали 2,7 м. В среднем в году наблюдается 7–10 нагонов высотой более 1 м и суммарной продолжительностью до 20–30 суток.

Выявлена многолетняя тенденция к уменьшению повторяемости сгонно-нагонных колебаний уровня моря с 1979 г. по 2005–2008 гг., а с 2008 г. имеет место обратная тенденция.

Сезонная изменчивость сгонно-нагонных колебаний характеризуется максимумом в зимний и весенний периоды и минимумом - в летний. На западном побережье Северного Каспия максимум колебаний уровня достигается в декабре-феврале, а на северном и восточном побережье – в феврале и марте.

Оценены площади затопления прибрежной территории российского сектора моря. Для нагона 12–16.03.1995 г. – одного из самых катастрофических по своим последствиям, площадь затопления суши составила 53 % от возможной, а для нагона 27.03–1.04.2015 г. – 71 %. Более тяжелые последствия нагона в 1995 г. вызваны тем, что среднегодовой уровень моря, от которого зависит возможная площадь затопления, в 1995 г. был значительно выше, чем в 2015 году.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №18-05-80088.

### Список литературы

1. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз // Под ред. Е.С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоздат, 1992. С. 298–303.
3. Зонн И.С., Жильцов С.С. Новый Каспий: география, экономика, политика. М.: АСТ Восток-Запад, 2008. 542 с.
4. Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне острова Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 3. С. 41–49.
5. Кораблина А.Д., Кондрин А.Т., Архипкин В.С. Моделирование нагонов в Белом и Баренцевом морях за период 1979–2015 гг. // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 144–158.
6. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration climate data record 1979–2015 (v2.0, 2017), [Online]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. DOI: 10.15770/EUM\_SAF\_OSI\_0008
7. Kosarev A.N. Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea // The Caspian Sea Environment // Hdb. Env. Chem. 2005. Vol. 5. Part P. Berlin, Heidelberg, New York: Springer–Verlag, 2005. P. 59–81.
8. Kosarev A.N., Tuzhilkin V.S., Kostianoy A.G. Main features of the Caspian Sea hydrology. // Dying and Dead Seas. Climatic versus Anthropic Causes / J.C.J. Nihoul, P.O. Zavialov, Ph.P. Micklin (Eds.). NATO ARW/ASI Series, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2004. P. 159–184.
9. Kosarev A.N., Yablonskaya E.A. The Caspian Sea. SPB Academic Publishing. The Hague. 1994. 259 p.
10. Luettich R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1992. 137 p.
11. Luettich R.A., Westerink J.J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC; 2004. Available at: [http://adcirc.org/adcirc\\_theory\\_2004\\_12\\_08.pdf](http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf)
12. Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid // Russ. J. Earth. Sci. 2020. Vol. 20. ES1006. DOI:10.2205/2019ES000688.

13. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2010. Vol. 91, no. 8. P. 1015-1057.
14. Saha, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2 // J. Clim. 2014. Vol. 27, no. 6. P. 2185-2208. doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1
15. Westerink J.J., Blain C.C., Luettich R.A., Scheffner N.W. ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts and Estuaries, Report 2: User's Manual for ADCIRC-2DDI. Technical Report DRP-92-6. Washington, D.C. U.S. Army Corps of Engineers, 1994.

## References

1. Vodnyj balans i kolebaniya urovnya Kaspijskogo morya. Modelirovanie i prognoz [Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and prediction]. Moscow: Triada Ltd, 2016, 378 pp. [in Russ.].
2. Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej. T. VI. Kaspijskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 298-303 pp. [in Russ.].
3. Zonn I.S., ZHil'cov S.S. Novyj Kaspij: geografiya, ekonomika, politika. Moscow.: AST Vostok-Zapad, 2008, 542 pp. [in Russ.].
4. Ivanova A.A., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Shevchenko G.V. Modeling of storm surges in the coastal zone of the Sakhalin island. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography], 2015, vol. 3, pp. 41-49. [in Russ.].
5. Korablina A.D., Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. The White and Barents seas surges numerical simulation for period 1979-2015. Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 364, pp. 144-158. [in Russ.].
6. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration climate data record 1979-2015 (v2.0, 2017), [Online]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. DOI: 10.15770/EUM\_SAF\_OSI\_0008
7. Kosarev A.N. Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea // The Caspian Sea Environment. Hdb. Env. Chem. 2005, vol. 5, part P, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2005, pp. 59-81. DOI: 10.1007/698\_5\_002.
8. Kosarev A.N., Tuzhilkin V.S., Kostianoy A.G. Main features of the Caspian Sea hydrology. Dying and Dead Seas. Climatic versus Anthropic Causes, J.C.J. Nihoul, P.O. Zavialov, Ph.P. Micklin (Eds.), NATO ARW/ASI Series, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2004, pp. 159-184.
9. Kosarev A.N., Yablonskaya E.A. The Caspian Sea. SPB Academic Publishing. The Hague, 1994, 259 p.
10. Luettich R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W. ADCIRC: an advanced threedimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1992, 137 p.
11. Luettich R.A., Westerink J.J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC; 2004. Available at: [http://adcirc.org/adcirc\\_theory\\_2004\\_12\\_08.pdf](http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf)
12. Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid. Russ. J. Earth. Sci. 2020, vol. 20, ES1006. DOI:10.2205/2019ES000688.

13. Saha S. *et al.* The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010, vol. 91, no. 8, pp. 1015-1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1

14. Saha, S. *et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. Clim.* 2014, vol. 27, no. 6, pp. 2185-2208. doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1

15. Westerink J.J., Blain C.C., Luettich R.A., Scheffner N.W. ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts and Estuaries, Report 2: User's Manual for ADCIRC-2DDI. Technical Report DRP-92-6. Washington, D.C. U.S. Army Corps of Engineers, 1994.

*Поступила 05.09.2020 г., одобрена после рецензирования 17.09.2020,  
принята в печать 09.10.2020.*

*Submitted 05.09.2020; approved after reviewing 17.09.2020;  
accepted for publication 09.10.2020.*