

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.461

А.Т. Кондрин¹, А.Д. Кораблина², В.С. Архипкин³

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ В БЕЛОМ МОРЕ

Исследуются сгонно-нагонные колебания уровня Белого моря с помощью гидродинамической модели ADCIRC, адаптированной к условиям этого водоема. Численные эксперименты выполнены на нерегулярной расчетной сетке высокого разрешения. Верификация модели проведена путем сравнительного анализа результатов численных расчетов и данных наблюдений на водомерных постах Северодвинск, Соловки и Сосновец. Рассматривается пространственная структура нагонов и характер их распространения в Белом море.

Проведенные численные эксперименты показали, что модель ADCIRC удовлетворительно воспроизводит колебания остаточного уровня моря (ОУМ) во время нагонов. Это подтверждается значимой корреляцией между колебаниями ОУМ, полученными на основании обработки натурных и модельных данных. Среднеквадратичная ошибка модельных расчетов также относительно невелика (9–21 см).

Расчеты показали, что при прохождении циклонов возникает сильное повышение ОУМ в Воронке и Мезенской губе в результате действия сил давления и ветра в Баренцевом море. Затем это возмущение через Горло проникает в основную часть моря, вызывая менее значительное повышение ОУМ на всей акватории последней. При этом в вершинах Двинского и Онежского заливов высота нагонов достигает наибольших значений.

Ключевые слова: сгонно-нагонные колебания, ADCIRC, нерегулярная пространственная сетка высокого разрешения, верификация модели, наблюдения, характеристики нагонов.

Введение. Возникающие при прохождении интенсивных циклонов штормовые нагоны и связанные с ними затопления прибрежных территорий относятся к наиболее опасным природным явлениям. Все это в полной мере относится к Белому морю, где во многих случаях размах сгонно-нагонных колебаний уровня моря бывает сопоставим с величиной прилива. Учитывая прогнозируемое в текущем столетии существенное повышение среднего уровня океана, исследования штормовых нагонов с целью создания системы предупреждения в реальном времени и оценки риска, становятся все более значимыми. Согласно литературным данным [Магрицкий, Скрипник, 2016; Второй оценочный ..., 2014], повышение уровня Белого моря за 1993–2011 гг. происходило со скоростью +0,31 см/год. При этом в 1982–2011 гг. наблюдалось сокращение площади ледяного покрова (–209 км²/год) и продолжительности ледового периода (–2,2 сут/год).

Данные наблюдений, необходимые для исследований штормовых нагонов включают уровень моря и сопутствующие характеристики (метеоданные, геометрию береговой линии, топографию прибрежных районов). Однако сеть измерений уровня моря слишком редка и совершенно недостаточна

для изучения такого явления, как штормовой нагон, характеристики которого в значительной степени зависят от местных гидрометеоусловий, а также от батиметрии и очертаний береговой линии. Проблема получения необходимой информации для исследований штормовых нагонов особенно характерна для России, где за последние десятилетия уменьшилось число и без того редких постов, где проводятся наблюдения за уровнем моря, а получаемые на этих постах данные зачастую труднодоступны.

В силу этого особое значение для исследований штормовых нагонов приобретает численное моделирование этого явления.

Исследования сгонно-нагонных колебаний уровня в Белом море имеют длительную историю. Результаты более ранних исследований обобщены в монографиях [Filatov, 2005; Гидрометеорология ..., 1991]. В основном эти результаты относятся к периоду времени до 80-х годов прошлого века и поэтому нуждаются в проверке, уточнении и существенном дополнении с привлечением новых данных. В частности, в этих работах выдвигается гипотеза, что в Белом море штормовые нагоны нередко носят индуцированный характер. Проходящие

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: altkondr@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант 3 г.о.; e-mail: jacksparrow91@bk.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, доц., канд. геогр. н.; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

циклоны генерируют в акватории Баренцева моря барическую волну, которая затем проникает в Белое море и индуцирует нагон. Эта гипотеза рассматривалась в работах А.Т. Кондрина [2015, 2016] на основании анализа данных наблюдений на четырех водомерных постах, расположенных в Горле, Двинской губе, Кандалакшском заливе и Соловецком архипелаге. Однако анализ данных измерений уровня всего в четырех точках не позволяет изучить пространственную структуру того или иного нагона и, тем самым, сделать обоснованные выводы о механизме его формирования. Для решения этой проблемы эффективным инструментом может быть численное моделирование.

Сгонно-нагонные колебания в Белом море исследовались с помощью численного моделирования Белов и Филиппов, 1985; Инжебейкин, 2004]. Указанными авторами использовалась довольно грубая ортогональная сетка с низким пространственным разрешением, что не позволяет учитывать влияние рельефа дна и геометрии береговой линии в прибрежных районах, особенно в заливах, и не отвечает современным требованиям.

Нами изложены результаты численных экспериментов по изучению штормовых нагонов в Белом море с помощью гидродинамической модели ADCIRC. Следует подчеркнуть, что численные эксперименты по изучению штормовых нагонов с помощью современной модели, охватывающие всю акваторию Белого моря, были выполнены впервые.

В работах А.А. Иванова с соавт. [2015], В.В. Фомина, А.А. Полозка [2013], А.Д. Кораблиной с соавт. [2016] эта модель применялась к исследованию штормовых нагонов в прибрежной зоне о-ва Сахалин и Двинской губы, в Азовском море, и были получены удовлетворительные результаты. Важной составляющей настоящей работы была верификация модели на основании сравнительного анализа результатов численных расчетов и данных наблюдений. Результаты такого анализа позволили сделать определенные выводы относительно адаптации и совершенствования примененной модели для исследования нагонов в Белом море. На основании результатов численных экспериментов рассмотрена пространственная структура нагонов различного типа и характер их распространения.

Материалы и методы исследований. Численные эксперименты выполнены с помощью гидродинамической модели ADCIRC (ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters) [Luettich, Westerink, Scheffner, 1992; Luettich, Westerink, 2004]. Модель основана на нестационарных, нелинейных уравнениях гидродинамики на f -плоскости в приближении гидростатики и Буссинеска с учетом напряжения ветра, атмосферного давления, приливов, речного стока и ледяного покрова, а также свойств подстилающей поверхности. В данном исследовании использовался двумерный вариант модели ADCIRC, основанный на проинтегрированных по вертикали исходных уравнениях. Белое море имеет сложную береговую ли-

нию, поэтому при моделировании штормовых нагонов применялась нерегулярная (unstructured) расчетная сетка с минимальным шагом 50 м. В дискретной форме основные уравнения решаются с помощью метода конечных элементов в пространстве и с использованием метода конечных разностей во времени.

Формулировка модели допускает возможность расчета затопления прилегающей суши. Кроме того, имеется возможность проведения численных экспериментов совместно со спектральной волновой моделью SWAN для учета влияния ветрового волнения, что отсутствует во всех других моделях. Однако в данной работе эти вопросы не рассматривались.

С помощью программного обеспечения Surface Modeling System (SMS 11) Aquaveo [Resio, Westernink, 2008] создана нерегулярная триангуляционная сетка, включающая Белое море и часть Баренцева моря (от Кольского п-ва до северной оконечности арх. Новая Земля) (рис. 1). Сетка создана методом «paving», в котором параметры элементов зависят от количества точек на береговой линии [SMS, 2013]. Сетка состоит из 12 715 узлов. Шаг сетки на побережье в районе Кольского п-ва и арх. Новая Земля составляет 5 км, остальное побережье Баренцева и Белого морей перекрывается участками с шагом 1–3 км, за исключением локализованных участков (Двинской губы и др.), где минимальный шаг равен 50 м. Для создания цифровой модели рельефа использованы морские навигационные карты масштаба 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000.

Расчетная сетка имеет две внешние морские границы: полукруглую от Кольского п-ва (в районе Киркинеса) до м. Желания (арх. Новая Земля) и в проливе Югорский Шар. На полукруглой внешней границе задаются гармонические постоянные, рассчитанные с помощью базы данных FES2004 (Finite Element Solutions) tidal model 2004 [Lyard et al., 2006] с дискретностью 1 ч за весь расчетный год. Открытая граница в Югорском проливе имеет свойства нулевого потока.

В качестве входных гидрометеорологических данных в модели используются данные реанализа Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) National Centers for Environmental Prediction (NCEP) с 1979 по 2010 гг., а также NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) с 2011 по 2015 гг. Используются данные поля ветра, атмосферного давления и концентрации морского льда с разрешением $0,3 \times 0,3$ (1979–2010 гг.) и $0,2 \times 0,2$ (2011–2015 гг.) по горизонтали и часовым временным разрешением. На всей области моделирования содержится 162×54 (1979–2010 гг.) и 251×83 (2011–2015 гг.) точек реанализа.

Для анализа формирования нагонов на исследуемом полигоне с помощью данной модели проводилось несколько численных экспериментов. Решались задачи, включающие:

– «полную» задачу с расчетом приливных колебаний, а также воздействия полей ветра и атмосферного давления по данным реанализа;

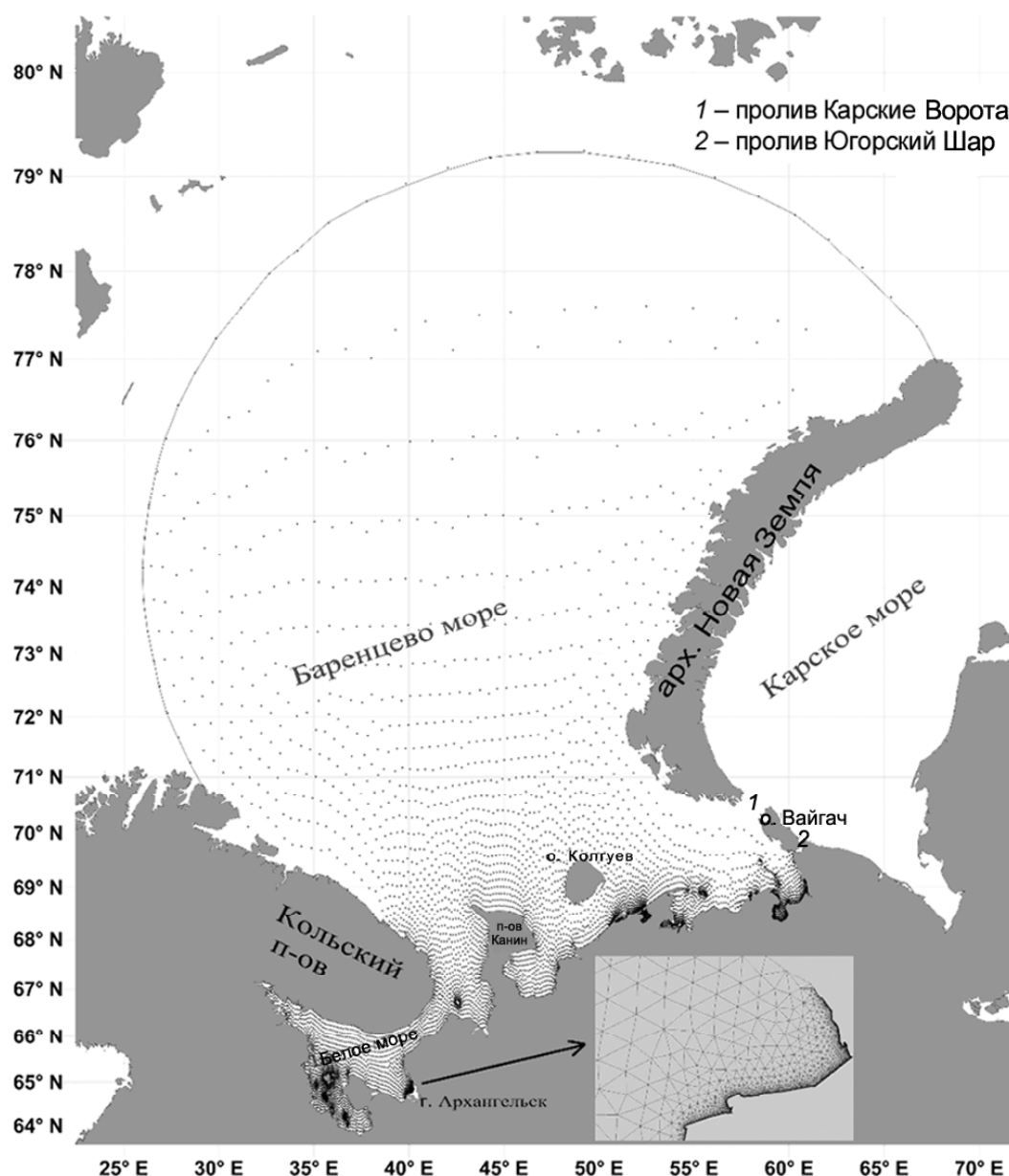


Рис. 1. Нерегулярная триангуляционная расчетная сетка для Белого моря

Fig. 1. Unstructured triangulation mesh for the White Sea

- только расчет приливных колебаний;
- расчет приливных колебаний, а также воздействие полей ветра по данным реанализа;
- расчет приливных колебаний, а также воздействие полей атмосферного давления по данным реанализа.

Для того чтобы определить колебания ОУМ из результатов «полной» задачи вычитаются результаты второй, то есть чистый прилив. Полученные таким образом данные анализируются в настоящей работе с целью изучения характеристик штормовых нагонов. Третья и четвертая задача рассчитываются для оценки вклада давления и ветра в формирование нагона.

Для оценки качества модели полученные с ее помощью характеристики сравнивались с натурными ежечасными данными наблюдений уровня моря в трех пунктах побережья Белого моря (Северодвинск, Соловки, Сосновец).

При обработке наблюдений в указанных пунктах приливные колебания были получены путем гармонического анализа временных рядов уровня моря с помощью метода наименьших квадратов [Pawlowicz et al., 2002]. Для получения ОУМ приливная составляющая вычитается из данных наблюдений. Полученные таким образом временные ряды содержат незначительные колебания на приливных частотах. Для полного исключения колебаний на приливных частотах был применен фильтр Баттерворта с частотой среза 0,04 ц/ч, соответствующей периоду 25 ч [Emery, Thompson, 2001]. С целью исключения долгопериодных сезонных и стерических изменений колебания ОУМ приведены относительно среднемесячных значений.

Результаты исследований и обсуждение. Для оценки качества моделирования колебаний ОУМ, как указано выше, выполнен сравнительный анализ ре-

зультатов численных расчетов и данных обработки результатов наблюдений. Для этого использованы следующие величины: ζ_O – отклонение ОУМ от среднего значения по данным наблюдений, ζ_N – отклонение ОУМ от среднего значения по данным моделирования, ζ_{OM} – максимальное отклонение ОУМ во время нагона по данным наблюдений, Z_M – максимальная отметка уровня моря по данным наблюдений относительно нуля поста с учетом прилива, ζ_{NM} – максимальное отклонение ОУМ во время нагона по данным моделирования, $q = \zeta_{NM} / \zeta_{OM}$ – отношение соответствующих максимальных высот ОУМ, σ_D – среднеквадратичная ошибка модельных расчетов, т. е. среднеквадратичная разность между ζ_O и ζ_N для декады, включающей нагон, σ_M – среднеквадратичная ошибка для соответствующего месяца, R_D и R_M – коэффициенты корреляции между изменениями ζ_O и ζ_N для декады и месяца, соответственно (табл.).

Приведенные данные показывают, что модель ADCIRC вполне удовлетворительно воспроизводит колебания ОУМ во время нагонов. Этот вывод подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции R_D для десятидневных временных рядов ζ_O и ζ_N во время нагона (0,80–0,97 в Северодвинске). Для таких промежутков времени среднеквадратичная ошибка σ_D модельных расчетов относительно невелика (в Северодвинске максимальное значение – 21 см при перепаде ОУМ 15.11.2011 г. более 170 см). В мае 2014 г., величина σ_D была минимальной во всех трех пунктах и равнялась 9 см. При этом R_D имел значения от 0,81 в Сосновце до 0,95 в Северодвинске.

Месячный коэффициент корреляции R_M существенно меньше, чем R_D во всех случаях, а σ_M в большинстве случаев превосходила σ_D . Это говорит о том, что в отсутствии нагонов модель недо-

статочно точно воспроизводит незначительные колебания ОУМ, что, впрочем, имеет второстепенное значение.

Согласно имеющимся данным наблюдений модель занижает высоту нагона в наибольшей степени в вершине Двинского залива ($q = 0,57$ – $0,88$, среднее 0,72), где формирование нагона происходит при существенном воздействии ветрового фактора. В других пунктах имеет место лучшее соответствие между максимальными высотами нагонов по данным моделирования и наблюдений. В Соловках q меняется в пределах 0,7–1,09, при среднем значении 0,84, а в Сосновце это отношение принимает значения 0,62–1,09 при среднем значении 0,96. Следовательно, модель нуждается в уточнении параметров, описывающих ветровое воздействие. Возможно, повышение точности модельных расчетов в Двинском и Онежском заливах может быть связано с учетом действия ветрового волнения.

Нагон 6 ноября 2010 г. (рис. 2) был вызван достаточно глубоким циклоном западного типа, который 4–6 ноября перемещался над южной частью Баренцева моря в восточном направлении со скоростью около 25 км/час. Центр этого циклона (975 гПа) 6 ноября находился над Югорским п-овом, причем Белое море оказалось в его тыловой части, где господствовали сильные нагонные северные и северо-западные ветры со скоростью до 21 м/с. По данным наблюдений 6 ноября около 8:00 в Северодвинске ОУМ поднялся до 0,96 м относительно среднемесячного значения. В 12:00 того же дня этот нагон достиг станции Сосновец (0,54 м), а несколько позже – в 14:00 – станции Соловки (0,61 м). При формировании этого нагона главную роль играли силы давления и ветра непосредственно в Белом море при преобладающем действии ветрового фактора [Кондрин, 2016].

Характеристики колебаний ОУМ по данным наблюдений и численного моделирования

Дата нагона	Водомерный пост	ζ_{OM}	Z_M	ζ_{NM}	q	σ_D/σ_M , см	R_D/R_M
		см					
06.11.2010	Северодвинск	96	655	55	0,57	18/22	0,92/0,58
	Соловки	61	612	43	0,70	15/14	0,76/0,59
	Сосновец	54	748	54	1,0	16/17	0,62/0,53
15.11.2011	Северодвинск	154	701	107	0,69	21/24	0,97/0,85
	Соловки	112	653	90	0,80	14/21	0,95/0,78
29.11.2013	Северодвинск	81	616	62	0,76	20/17	0,87/0,73
	Соловки	56	597	50	0,89	14/15	0,77/0,64
	Сосновец	35	653	40	1,14	10/13	0,80/0,65
23.04.2014	Северодвинск	63	603	45	0,71	14/13	0,80/0,77
	Соловки	45	566	32	0,71	14/14	0,65/0,55
	Сосновец	64	645	40	0,62	14/18	0,78/0,51
07.05.2014	Северодвинск	76	598	67	0,88	9/16	0,95/0,71
	Соловки	55	557	60	1,09	9/14	0,92/0,71
	Сосновец	44	597	48	1,09	9/11	0,81/0,70

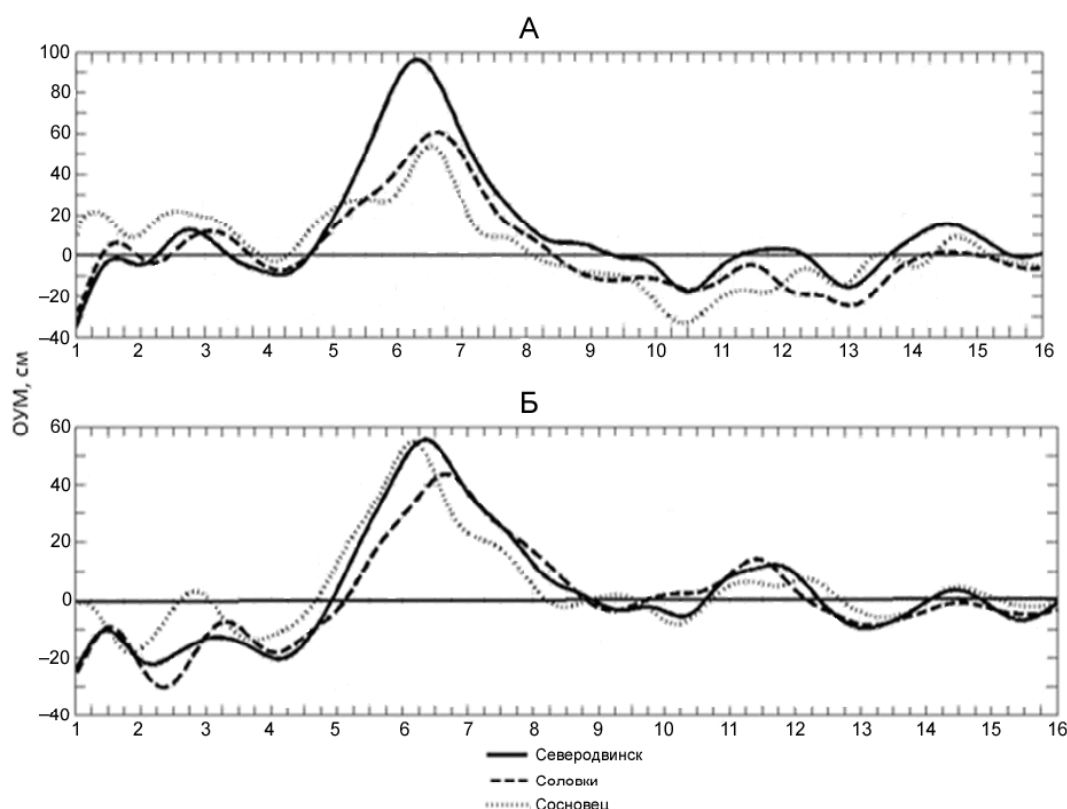


Рис. 2. Колебания ОУМ (см) во время нагона 6 ноября 2010 г. по натурным (А) и модельным (Б) данным на станциях Северодвинск, Соловки и Сосновец. По горизонтальной оси здесь, а также на рис. 3 и 5, 6, отложено время и указаны числа месяца

Fig. 2. The RSL oscillations (cm) during the surge on November 6, 2010, derived from observations (A) and numerical simulation (Б) at Severodvinsk, Solovki and Sosnovets stations. Here and at Figs. 3 and 5, 6 the horizontal axis represents the time and dates

Как показано на рис. 2, численная модель хорошо воспроизводит временной ход колебаний уровня на станции Северодвинск во время нагона, что подтверждается высоким значением коэффициента корреляции $R_D = 0,92$ для промежутка времени с 1 по 10 ноября. На станциях Соловки и Сосновец корреляция между колебаниями ОУМ за этот же промежуток времени существенно меньше ($R_D = 0,76$ и $0,62$, соответственно). На станциях Северодвинск и Соловки максимальная высота ОУМ во время нагона была занижена ($q = 0,57$ и $0,70$, соответственно), однако на станции Сосновец максимальные высоты ζ_{OM} и ζ_{NM} совпали ($q = 1,0$). Коэффициент корреляции R_{MP} рассчитанный для полного месяца во всех трех пунктах, оказался существенно меньше декадного. Это говорит о том, что модель хорошо воспроизводит колебания ОУМ именно во время нагона. Незначительные колебания ОУМ в остальное время искажаются, что, впрочем, имеет второстепенное значение. Следует отметить, что в рассматриваемом случае среднеквадратичная ошибка σ_D была относительно невелика и не превышала 18 см, в то время как перепад ОУМ в Северодвинске при этом нагоне был равен 105 см.

Нагон 15 ноября 2011 г. (рис. 3) произошел при прохождении глубокого циклона над восточной частью Баренцева моря. 14 ноября 2011 г. в 12:00 центр (960 гПа) этого циклона находился в районе Новой

Земли, а к 00:00 15 ноября переместился в юго-юго-западном направлении к мысу Канин Нос. Средняя скорость движения этой барической системы была около 49 км/ч. Затем к 12:00 15 ноября центр циклона переместился в район Печорского моря. На западной периферии этого барического образования в центральной части Баренцева моря скорость ветра северных румбов доходила до 30 м/с, а в южной части Баренцева моря у Кольского побережья и над акваторией Белого моря дул ветер северо-западного направления со скоростью порядка 18–20 м/с. К 00:00 15 ноября над центральной частью Баренцева моря и у Кольского побережья продолжал дуть ветер со скоростью около 30 м/с, над акваторией Белого моря дул такой же сильный ветер северо-западного направления. Такая ситуация сохранялась до 17:00 15 ноября, после чего ветер начал ослабевать. В результате прохождения достаточно быстрого глубокого циклона в Баренцевом море возникла барическая волна существенным образом усиленная действием сильного нагонного ветра. В Воронке и Мезенской губе возникло сильное возмущение уровня, которое затем распространилось в Белое море, где дополнительное воздействие ветра привело к сильному поднятию уровня в Двинской и Онежской губе (рис. 4). Утром 14 ноября в Северодвинске ОУМ начал увеличиваться и к 14:00 15 ноября достиг высоты 153 см относительно среднемесячного значения 513 см (относительно нуля по-

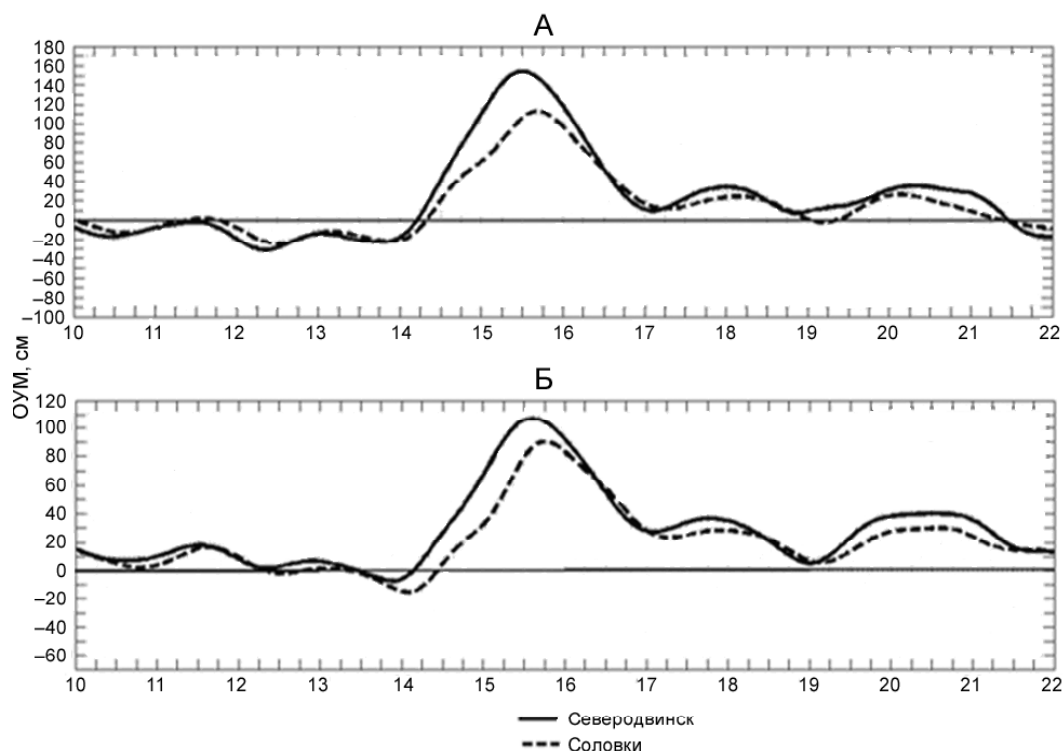


Рис. 3. Колебания ОУМ (см) во время нагона 15–16 ноября 2011 г. по натурным (А) и модельным (Б) данным на станциях Северодвинск и Соловки

Fig. 3. The RSL oscillations (cm) during the surge on November 15–16, 2011, derived from observations (А) and numerical simulations (Б) at Severodvinsk and Solovki stations

ста). Суммарная высота уровня моря с учетом прилива наблюдалась в 17:00 и составила 701 см относительно нуля поста. К этому времени высота ОУМ опустилась до 145 см. Таким образом, на долю прилива пришлось около 43 см суммарной высоты уровня моря. В Соловках максимум ОУМ (112 см) имел место в 16:00 того же дня. Суммарный подъем уровня с учетом прилива был зафиксирован в 17:33 и составил 653 см относительно нуля поста. Отметим, что для Северодвинска критическим для нагона принят уровень 612 см относительно нуля поста. Критический уровень во время описываемого нагона был превышен на 89 см. В Соловках критический уровень равен 605 см (относительно нуля поста), превышение над которым составило 48 см.

Анализ результатов обработки данных наблюдений и численных расчетов показал, что модель хорошо воспроизводит временной ход колебаний ОУМ, но занижает высоту нагона. В данном случае в Северодвинске максимальная высота ОУМ ζ_{NM} составила лишь 108 см, $q=0,69$. В Соловках $\zeta_{NM}=90$ см, $q=0,80$. Коэффициент корреляции R_D в Северодвинске во время нагона был равен 0,97, а в Соловках – 0,95. Среднеквадратичная ошибка моделирования σ_D при этом имела значения 21 см в Северодвинске и 14 см в Соловках.

Этот нагон был одним из самых значительных за все время наблюдений и нанес значительный ущерб. Затопления глубиной 1–1,5 м наблюдались в зоне шириной до 50 км от морского края

дельты р. Северная Двина [Магрицкий, Скрипник, 2016].

Нагон 29 ноября 2013 г. сформировался в Белом море при прохождении глубокого циклона, центр которого (менее 970 гПа) 28 ноября в 0:00 часов находился над Кандалакшским заливом. Циклон двигался в восточном направлении, пересек центральную часть Белого моря и к 18:00 часам находился восточнее Двинской губы, где его глубина составила 975 гПа. Постепенно заполняясь, циклон продолжал двигаться на восток и достиг Обской губы 29 ноября к 12:00 часам. Скорость движения этого циклона составила около 38–40 км/ч. На ББС 28 ноября зафиксировано понижение ПДА до 965 гПа. В тыловой части этого циклона в юго-восточной части Баренцева моря и в акватории Белого моря господствовал нагонный северный ветер со скоростью около 20 м/с. На рис. 5 показаны изменения ОУМ с 20 по 30 ноября 2013 г., полученные с помощью численного моделирования и по данным наблюдений. Модель хорошо воспроизводит изменения ОУМ на всех трех станциях, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции R на всех трех станциях (от 0,77 в Соловках до 0,87 в Северодвинске) во время нагона.

На станции Сосновец по данным наблюдений произошло повышение ОУМ до 0,35 м (29 ноября около 04:00). Согласно модели, ОУМ примерно в то же время (около 3:00) повысился до 0,4 м. На станции Северодвинск высота нагона была значи-

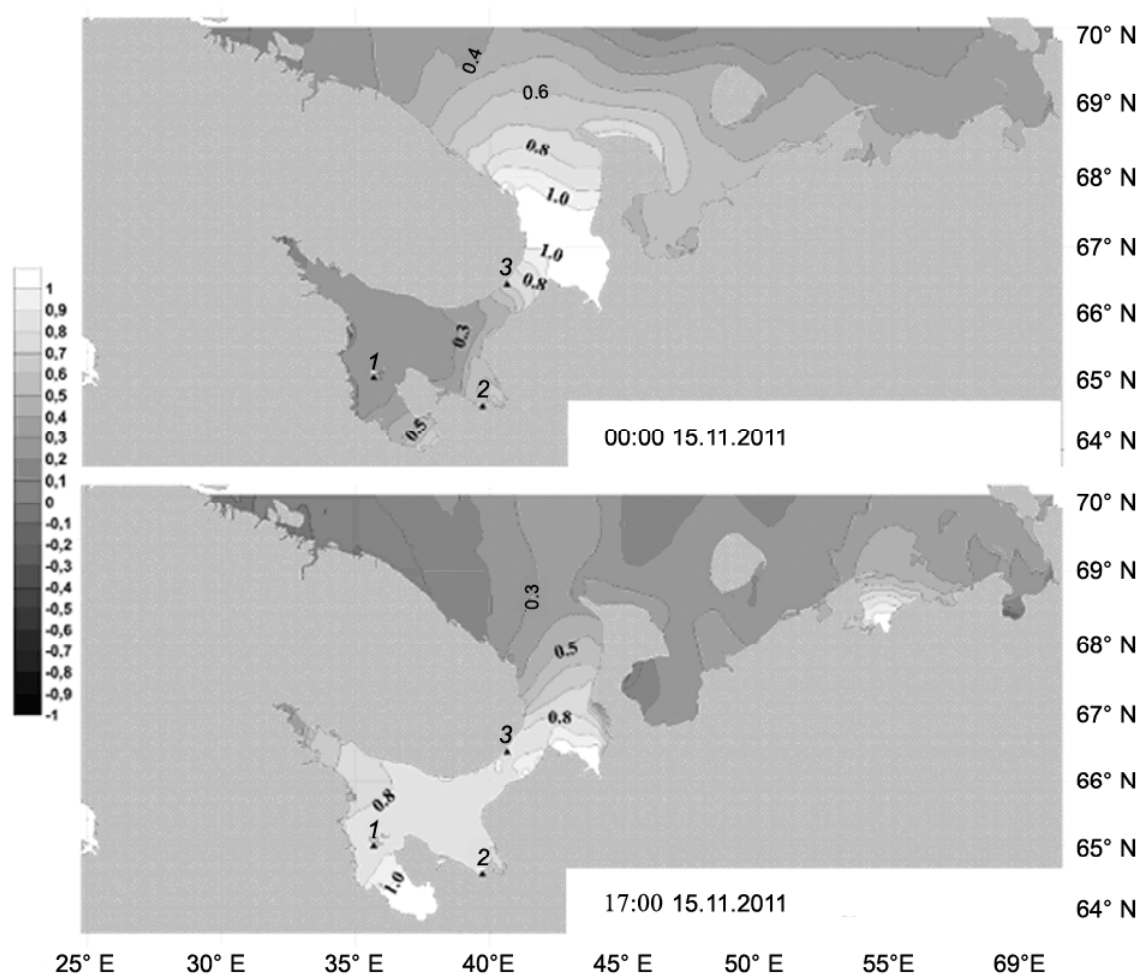


Рис. 4. Пространственное распределение ОУМ (м) во время нагона 15 ноября 2011 г. по данным моделирования. Цифрами обозначены: 1 – Соловки, 2 – Северодвинск, 3 – Сосновец

Fig. 4. The RSL (m) spatial distribution during the surge on November 15, 2011, according to numerical simulation data. The numbers indicate: 1 – Solovki, 2 – Severodvinsk, 3 – Sosnovets

тельно больше – 0,81 м (0,62 м по модели) и достигла этой величины в 9:00, что объясняется действием сил давления и ветра непосредственно в Белом море. На станции Соловки у входа в Онежский залив максимальная высота ОУМ (0,56 м по наблюдениям и 0,5 м по модели) наблюдалась около 12:00. Описанный по данным наблюдений ход изменений ОУМ согласуется с результатами численных расчетов, но, как и в предыдущих случаях, модель занижает высоту нагона в Северодвинске ($q=0,76$) и Соловках ($q=0,89$). Однако в Сосновце высота повышения ОУМ при нагоне по модели была выше, чем по данным наблюдений, $q=1,14$. Среднеквадратичная ошибка σ_D при этом была наибольшей в Северодвинске (20 см) и наименьшей в Сосновце (10 см).

Согласно данным модели, к концу дня 28 ноября у восточной оконечности Кольского п-ова возникло повышение ОУМ на 0,4–0,5 м, которое затем проникло в Горло. Численные расчеты также показывают, что в результате действия сил давления и ветра непосредственно в Белом море одновременно с нагоном в Двинском заливе еще большее воз-

растание ОУМ произошло в вершине Онежского залива (до 1 м). Эти результаты согласуются с выводами работы [Кондрин, 2016], однако позволили их уточнить и дополнить. В частности, показано, что определенный вклад в формирование рассматриваемого нагона внесла нагонная волна, пришедшая из Баренцева моря.

Перед этим нагоном 27 ноября наблюдался сильный сгон в результате действия юго-западного ветра. По имеющимся данным наблюдений наибольшей величины (–0,54 м) он достиг на станции Северодвинск в 20:00. Таким образом, на станции Северодвинск перепад ОУМ достиг величины 1,35 м (рис. 5). По данным численных расчетов перепад ОУМ здесь составил около 1,04 м.

Выводы:

– модель ADCIRC вполне удовлетворительно воспроизводит колебания ОУМ во время нагонов. Этот вывод подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции R_D для десятидневных временных рядов ζ_O и ζ_N во время нагона (0,80–0,97 в Северодвинске). Также, для таких промежутков времени среднеквадратичная ошибка σ_D модельных

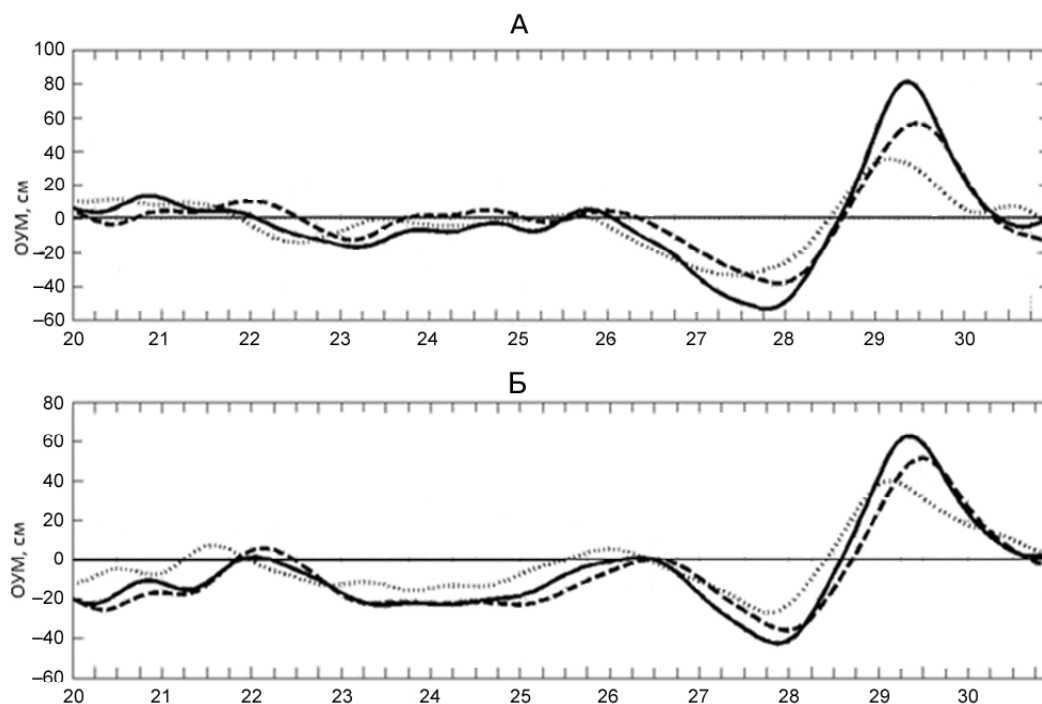


Рис. 5. Колебания ОУМ (см) с 20 по 30 ноября 2013 г. по натурным (А) и модельным (Б) данным на станциях Северодвинск, Соловки и Сосновец

Fig. 5. The RSL oscillations (cm) during November 20–30, 2013, derived from observations (A) and numerical simulations (B) at Severodvinsk, Solovki and Sosnovets stations

расчетов относительно невелика (в Северодвинске максимальное значение – 21 см при перепаде ОУМ 15.11.2011 г. более 170 см). В мае 2014 г., величина σ_D была минимальна во всех трех пунктах и равнялась 9 см. При этом R_D имел значения от 0,81 в Сосновце до 0,95 в Северодвинске;

– учитывая предыдущий вывод, можно считать, что модель дает достоверную информацию о пространственном распределении ОУМ при нагонах. Это позволило сделать определенные заключения относительно особенностей формирования последних в Белом море;

– первоначально, как правило, возникает сильное повышение ОУМ в Воронке и Мезенской губе в результате действия вынуждающих сил в Баренцевом море. Затем это возмущение через Горло про-

никает в основную часть моря, где происходит некоторое повышение ОУМ. При этом в результате действия сил давления и ветра непосредственно в акватории Белого моря в вершинах Двинского и Онежского заливов высота повышения ОУМ достигает наибольших значений;

– согласно имеющимся данным наблюдений, модель занижает высоту нагона в наибольшей степени в вершине Двинского залива ($q=0,57-0,88$), где формирование нагона происходит при существенном воздействии ветрового фактора. Следовательно, модель нуждается в уточнении параметров, описывающих ветровое воздействие. Возможно, повышение точности модельных расчетов в Двинском и Онежском заливах может быть связано с учетом действия ветрового волнения.

Благодарности. Исследование выполнено за счет Российского научного фонда (проект № 14-37-00038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1017 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1991. Т. II. Белое море. Вып. 1. 240 с.

Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 3. С. 41–49.

Кондрин А.Т. Формирование штормовых нагонов в Белом море // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 6. С. 33–40.

Кондрин А.Т. Штормовые нагоны в районе Беломорской биологической станции МГУ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 96–107.

Кораблина А.Д., Архипкин В.С., Самборский Т.В. Особенности формирования штормовых нагонов в динамической сис-

теме Белое море – устьевая область р. Северная Двина // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 1. С. 78–86.

Магрицкий Д.В., Скрипник Е.Н. Опасные гидрологические процессы в устье Северной Двины и факторы их многолетней изменчивости // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 6. С. 59–70.

Фомин В.В., Полозок А.А. Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2013. Вып. 27. С. 139–145.

Emery W.J., Thompson R.E. Data analysis methods in physical oceanography. Amsterdam: Elsevier, 2001. 638 p.

Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen Ola M. et al. White sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Springer – Verlag, Berlin: Praxis Publishing, Chichester, UK, 2005. 462 p.

Luetlich 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.

Luetlich R.A., Westerink J.J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC, 2004. http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf

Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // Ocean Dynamics. 2006. V. 56. P. 394–415.

Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE // Computers and Geoscience. 2002. V. 28. P. 929–937.

Resio D.T., Westerink J.J. Modeling the physics of storm surges // Physics Today. 2008. P. 33–38.

SMS Surface-water Modeling System User Manual. 2013. V. 11.1.

Поступила в редакцию 13.04.2017

Принята к публикации 01.11.2017

A.T. Kondrin¹, A.D. Korablina²,
V.S. Arhipkin³

THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATIONS OF STORM SURGES IN THE WHITE SEA

The results of numerical simulations of storm surges in the White Sea using the ADCIRC hydrodynamic model adapted to the conditions of the water body are discussed. Numerical experiments were performed on an unstructured high-resolution grid. The model was verified through the comparative analysis of numerical results and observational data at the Severodvinsk, Solovki and Sosnovets stations. The spatial structure of surges and their propagation features are described.

Numerical experiments have shown that the ADCIRC model adequately reproduces residual sea level (RSL) oscillations during surges. This is confirmed by significant correlation between RSL oscillation values obtained by processing of the observational data and from numerical simulations. The RMSE of model calculations is also relatively small (9–21 cm).

The numerical simulations revealed that when cyclones pass, a strong RSL increase occurs in the Voronka and Mezen Bay as a result of pressure and wind forces action in the Barents Sea. Then this disturbance penetrates through the Gorlo into the main part of the sea, causing a less significant increase of RSL in the entire water area. At the same time the highest values of RSL rise occur in the heads of the Dvina and Onega Bays.

Key words: surges oscillations, ADCIRC, unstructured high-resolution grid, model verification, observations, surge parameters.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 14-37-00038).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Research Scientist, PhD. in Geography; e-mail: altkondr@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, post-graduate student; e-mail: jacksparrow91@bk.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Associate Professor, PhD. in Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

REFERENCES

- Emery W.J., Thompson R.E. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Amsterdam: Elsevier, 2001. 638 p.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen Ola M. et al. White sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Springer – Verlag, Berlin: Praxis Publishing, Chichester, UK, 2005. 462 p.
- Fomin V.V., Polozok A.A. Tehnologiya modelirovaniya shtormovyh nagonov i vetrovogo volneniya v Azovskom more na nestruktirovannyh setkah [Technology for modeling storm surges and wind waves in the Sea of Azov on unstructured grids.] // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa. Sevastopol'*, 2013. Vyp. 27. S. 139–145 (in Russian).
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the USSR]. Leningrad, 1991. T. II. Vyp. 1. 240 p. (in Russian).
- Ivanova A.A., Arhipkin V.S., Myslenkov S.A., Shevchenko G.V. Modelirovanie shtormovyh nagonov v pribrezhnoj zone o. Sahalin [Storm surges modeling in the coastal zone of the Sakhalin island] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2015. № 3. S. 41–49 (in Russian).
- Kondrin A.T. Formirovanie shtormovyh nagonov v Belom more [Storm surge formation in the White Sea] // *Vestnik. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2016. № 6. S. 33–40 (in Russian).
- Kondrin A.T. Shtormovye nagony v rajone Belomorskoj biologicheskoy stancii MGU [Storm surges in the vicinity of the MSU White Sea Biological Station] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2015. № 6. S. 96–107 (in Russian).
- Korablina A.D., Arhipkin V.S., Samborskij T.V. Osobennosti formirovaniya shtormovyh nagonov v dinamicheskoy sisteme Beloe more – ust'evaya oblast' r. Severnaya Dvina [Specific features of storm surge formation in the dynamic system of the White Sea – the mouth area of the Northern Dvina River] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2016. № 1. S. 78–86 (in Russian).
- Luetlich R.A., Westerink J.J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC; 2004. http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf
- Luetlich 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.
- Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // *Ocean Dynamics*. 2006. V. 56. P. 394–415.
- Magrickij D.V., Skripnik E.N. Opasnye gidrologicheskie processy v ust'e Severnoj Dviny i faktory ih mnogoletnej izmenchivosti [Hydrological natural hazards in the mouth of the Northern Dvina River and the factors of their long-term variability] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2016. № 6. S. 59–70 (in Russian).
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE // *Computers and Geoscience*. 2002. V. 28. P. 929–937.
- Resio D.T., Westerink J.J. Modeling the physics of storm surges // *Physics Today*. 2008. P. 33–38.
- SMS Surface-water Modeling System User Manual. 2013. V. 11.1.
- Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation]. M., 2014. 1017 p. (in Russian).

Received 13.04.2017

Accepted 01.11.2017