

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГОНОВ В БЕЛОМ И БАРЕНЦЕВОМ МОРЯХ ЗА ПЕРИОД 1979–2015 ГГ.

А.Д. Кораблина, А.Т. Кондрин, В.С. Архипкин

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
jacksparrow91@bk.ru*

Введение

Изучение нагонов на арктическом побережье России имеет важное научное и практическое значение с точки зрения обеспечения освоения природных ресурсов шельфа и развития судоходства на Северном морском пути. Последствия нагона ощутимы именно в прибрежной зоне морей, поэтому расчет высоты нагона важен при строительстве гидротехнических сооружений и портовых комплексов. Актуальность исследования связана с активным освоением Арктики в последние годы, что определяет необходимость получения новых знаний о формировании нагонов и количественных оценок этого явления.

Исследования сгонно-нагонных колебаний уровня в Баренцевом и Белом морях имеют длительную историю. Результаты более ранних исследований обобщены в монографиях [2, 3, 15], а также изложены в [12]. С помощью анализа данных наблюдений получены средние и экстремальные характеристики опасных подъемов уровня, проведена типизация циклонов, вызывающих штормовые нагоны, исходя из траекторий их движения над акваториями Баренцева и Белого морей. Рассмотрены особенности сгонно-нагонных колебаний уровня моря при прохождении циклонов различного типа. В частности показано, что проходящие над акваторией Баренцева моря глубокие циклоны генерируют барическую волну, которая затем проникает в Белое море и индуцирует нагон. Также получены оценки относительного вклада сил давления и ветра при формировании нагонов в различных синоптических ситуациях. Однако эти результаты в основном относятся к периоду времени до 80-х гг. прошлого века и поэтому нуждаются в проверке, уточнении и существенном дополнении с привлечением новых данных.

Взаимодействие нагонов и приливов в Белом море исследовалось с помощью численного моделирования [1, 5]. Однако в этих работах 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. Кроме того, в этих работах не оценивался относительный вклад факторов, которые влияют на формирование штормового нагона, например давления, ветра, волнения.

В последние годы остаточные колебания уровня Белого моря рассматривались в [6, 7] на основании анализа новых данных наблюдений на четырех водомерных постах, расположенных в Горле, Двинской губе, Кандалакшском заливе и на Соловецком архипелаге. Статистические характеристики штормовых нагонов в Двинском заливе исследовались в [9].

В настоящей работе предлагается применение новой методики исследования нагонов; проводится расчет высоты нагонов за продолжительный период времени (1979–2015 гг.) с помощью математического моделирования с учетом ветра, атмосферного давления, прилива, концентрации льда, ветрового волнения; все вычисления проводятся на нерегулярной расчетной сетке, охватывающей как Белое, так и Баренцево море. 37-летний период позволяет изучить сезонную и межгодовую изменчивость нагонов в Белом и Баренцевом морях.

Данные и методы

Модели. В данной работе для расчета уровенной поверхности моря использовалась численная гидродинамическая модель ADCIRC. Подробное описание модели дано в оригинальных работах [18, 19]. Нами используется вариант модели, который применялся в [4, 8, 9]. Численный алгоритм модели ADCIRC основан на методе конечных элементов, использующем треугольные элементы и линейные базисные функции. Сравнение результатов моделирования с натурными данными (рис. 1) показало, что ADCIRC достоверно воспроизводит положение уровня в пространстве и во времени [8].

Для оценки вклада ветрового волнения в формирование уровня моря использовалась совместная модель ADCIRC+SWAN, которая предложена в [14]. Она объединяет две известные и апробированные модели – ADCIRC [18, 19] и SWAN [13, 16]. Обе модели реализованы на нерегулярной сетке и адаптированы для параллельных вычислений.

Расчетная сетка. С помощью системы SMS 11 Aquaveo [21] создана нерегулярная триангуляционная сетка, охватывающая Белое и Баренцево море (рис. 2а). Сетка строится в зависимости от количества точек на береговой линии и состоит из 12 715 узлов. Минимальный шаг сетки составил 50 м, максимальный – 5 км. Для создания цифровой модели рельефа (рис. 2б) использованы морские навигационные карты масштаба 1:10 000,

1:25 000, 1:50 000. Расчетная сетка имеет две внешние жидкие 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 с пространственным разрешением $1/8^\circ$ и дискретностью 1 ч на весь расчетный год [20]. Открытая граница в Югорском проливе имеет свойства нулевого потока.

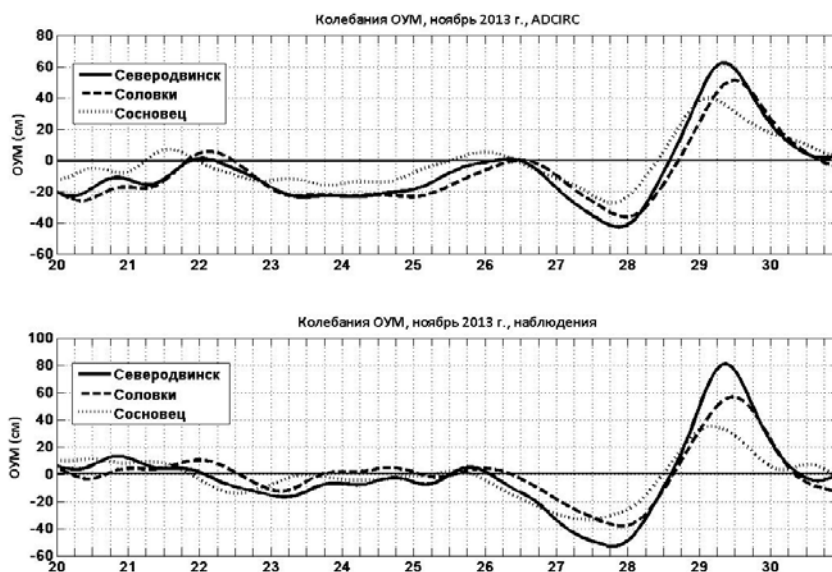


Рис. 1. Колебания остаточного уровня моря (ОУМ, см) в ноябре 2013 г. по данным численных расчетов (верхняя панель) и данным наблюдений в пунктах Северодвинск, Соловки, Сосновец [8]. ОУМ получен путем исключения приливной и низкочастотных составляющих из суммарного уровня.

Данные о ветре, атмосферном давлении и концентрации льда. В качестве входного параметра задавались поля приземного ветра, атмосферного давления и концентрации льда из реанализа NCEP/CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) – это современный продукт центра NCEP (National Centers for Environmental Prediction), реализованный в 2010 г. [22]. Данный реанализ NCEP/CFSR имеет пространственное разрешение $\sim 0,3125^\circ \times 0,312^\circ$, временной шаг составляет 1 час. Реанализ охватывает период в 32 года с 1979 по 2010 год.

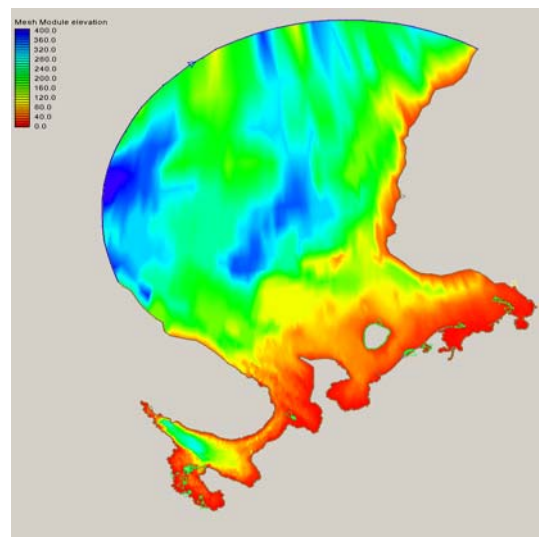
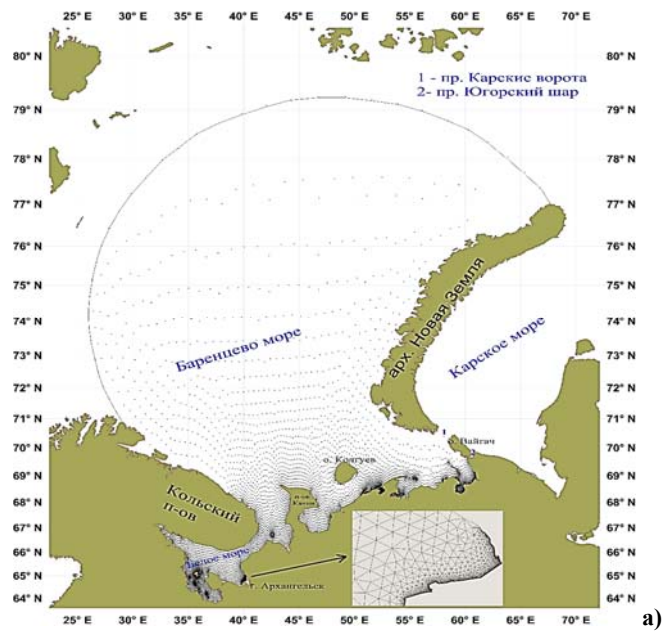


Рис. 2. Расчетная нерегулярная сетка для моделирования (а); цифровая модель рельефа (цветом показана глубина в метрах) (б).

Для численных расчетов с 2011 по 2015 г. использовалась следующая версия реанализа NCEP/CFSv2 (Climate Forecast System Version 2), имеющая пространственное разрешение $\sim 0,205^\circ \times 0,204^\circ$ [23] и временное – 1 час. Выбор реанализа CFSR основан на [17], где приведены сравнения наблюдений на дрейфующих станциях и данных семи реанализов. В [17] показано, что реанализы CFSR, MERRA и ERA-Interim имеют наилучшее соответствие с натурными наблюдениями. Из трех реанализов выбран CFSR в связи с тем, что систематическая ошибка скорости ветра на 10 м реанализа CFSR наименьшая среди других (от 0,0 до -0,3) и корреляция связи данных реанализа CFSR с наблюдениями высокая и в течение года находится в пределах от 0,80 до 0,87 [17]. Оценка качества реанализа NCEP/CFSR для Баренцева моря приведена в [10].

Для анализа формирования нагонов с помощью модели ADCIRC проводились следующие эксперименты:

- 1) расчет, который включает прилив, поле ветра, атмосферного давления, льда по данным реанализа;
- 2) расчет, который включает прилив и лед;
- 3) расчет, который включает прилив, поле ветра и льда по данным реанализа;
- 4) расчет, который включает прилив, поле атмосферного давления и концентрации льда по данным реанализа.

Для того, чтобы вычислить величину нагона, из задачи «1» вычитается задача «2», а задачи «3» и «4» рассчитываются для оценки вклада давления и ветра в формирование нагона.

С помощью совместной модели ADCIRC+SWAN проводились следующие эксперименты:

- 1) расчет, который включает прилив, поле ветра, атмосферного давления, льда по данным реанализа;
- 2) расчет, который включает прилив, поле ветра, атмосферного давления по данным реанализа;
- 3) расчет «1» без SWAN.

Задачи «1» и «3» рассчитываются для оценки вклада ветрового волнения, задача «2» – для концентрации льда. Лед в модели считается неподвижным. В SWAN расчет одного шага по времени занимает гораздо больше процессорного времени, чем в ADCIRC. Поэтому запуск модели ADCIRC производился для 1 года, а запуск совместной модели ADCIRC+SWAN – только для отдельных случаев нагонов на 4 дня (72 часа до максимальной фазы нагона и 24 часа после). Шаг по времени численной модели циркуляции ADCIRC составил 2 секунды, модели расчета ветровых волн SWAN – 1200 секунд.

Данные измерений. Низкочастотные колебания уровня моря исследовались с помощью спектрального анализа ежечасных временных рядов высот уровня, полученных по данным измерений в 2014 г. с буя Vardoe, Норвегия (70,34° N, 31,03° E) для Баренцева моря и на станции Северодвинск (2013 г.) для Белого моря. В обоих морях выделены колебания с периодом около 40 суток (рис. 3).

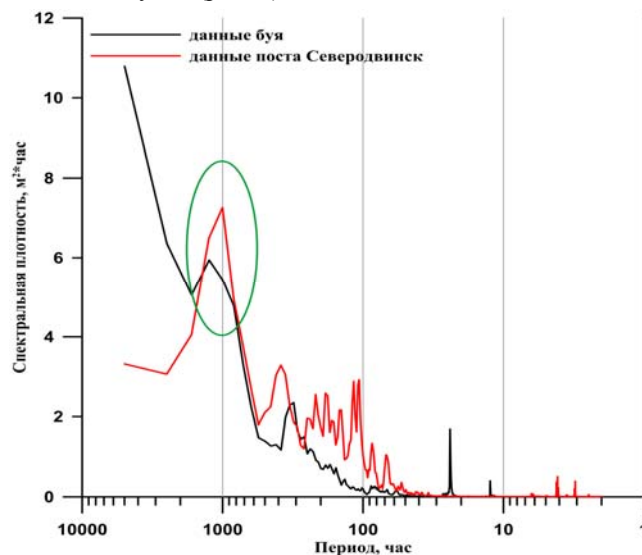


Рис. 3. Изменение спектральной плотности ($\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) по ежечасным уровням (м) данным буя Vardoe (Норвегия) в 2014 г. и станции Северодвинск в 2013 г. (Зеленый овал выделяет пик спектральной плотности в ~ 40 суток.)

В данной работе термин «нагон» определяется как повышение уровня моря, вызываемое метеорологическими причинами относительно поверхности, искривленной приливом и длиннопериодными колебаниями уровня моря. Другими словами, чтобы получить высоту нагона, необходимо исключить приливные и низкочастотные составляющие (сезонные колебания и колебания с периодом 35–40 суток) из суммарного уровня моря. В связи с этим высота нагона (рис. 4) определяется путем вычитания из суммарной высоты уровня («1») приливных колебаний («2») с последующим исключением низкочастотных колебаний с помощью цифрового фильтра Баттерворта (Butterworth) [11]. Понятие «штормовой нагон» определим, как нагон, высота которого приводит к затоплению и разрушению береговых сооружений (может быть различная высота

нагона для конкретных пунктов). В некоторых случаях высота нагона может совпадать с самыми высокими значениями уровня.

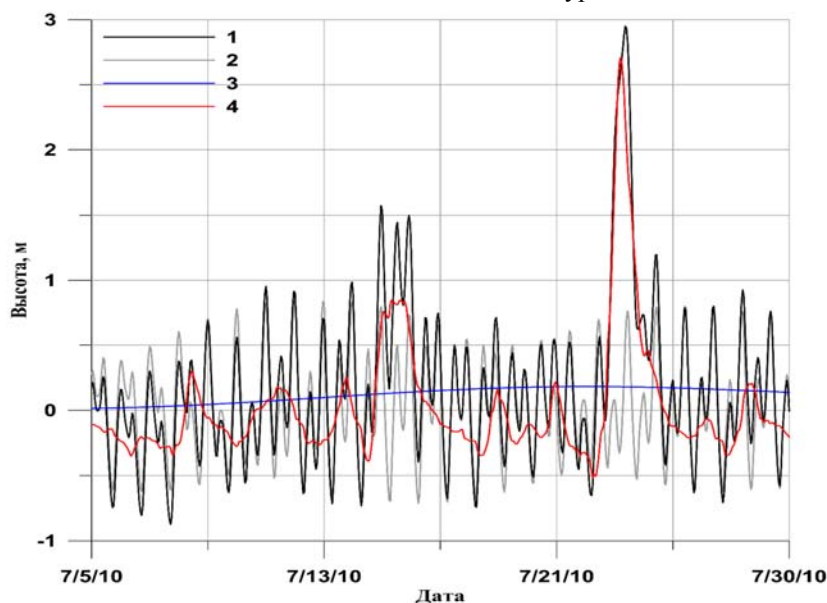


Рис. 4. Данные уровня, полученные с помощью численного моделирования на станции Варандей в 2010 г. Цифрами обозначены: 1 – модельный уровень; 2 – модельный прилив; 3 – уровень моря минус прилив, минус высокочастотные колебания; 4 – уровень моря минус прилив, минус низкочастотные колебания (40 суток).

Обсуждение

На рис. 5 представлено количество нагонов по диапазонам высот в период с 1979 по 2015 г. (37 лет) в шести пунктах: Соловки (35,67° E, 65,01° N), Онежская губа (37,75° E, 63,95° N), Северодвинск (39,76° E, 64,62° N) в Белом море; Чёшская губа (47,59° E, 67,06° N), Печорская губа (54,50° E, 68,60° N), Варандей (57,97° E, 68,80° N), Хайпудырская губа (59,86° E, 68,45° N) в Баренцевом море. В Белом море нагоны высотой 0,9–1,2 м составляют 1 % от всех нагонов (по данным трех станций), причем максимальное количество нагонов данной высоты обнаружено в Онежской губе (10). Нагонов высотой 0,3–0,6 м формируется наибольшее количество (88 %), причем в Онежской губе их зафиксировано 462, в Северодвинске – 409, в Соловках – 192. В Баренцевом море нагонов

высотой более 1,2 м насчитывается 3 % от всех нагонов, причем в Печорской губе зафиксировано 7 случаев, Чёшской губе – 14, Варандее – 34, Хайпудырской губе – 106. Здесь же нагоны высотой 0,9–1,2 м составляют 6 % от общего количества, высотой 0,6–0,9 м – 22 %. Наибольшее количество нагонов характеризуется высотами 0,3–0,6 м (69 %), причем в Хайпудырской губе обнаружено наибольшее количество случаев нагонов по всем диапазонам высот.

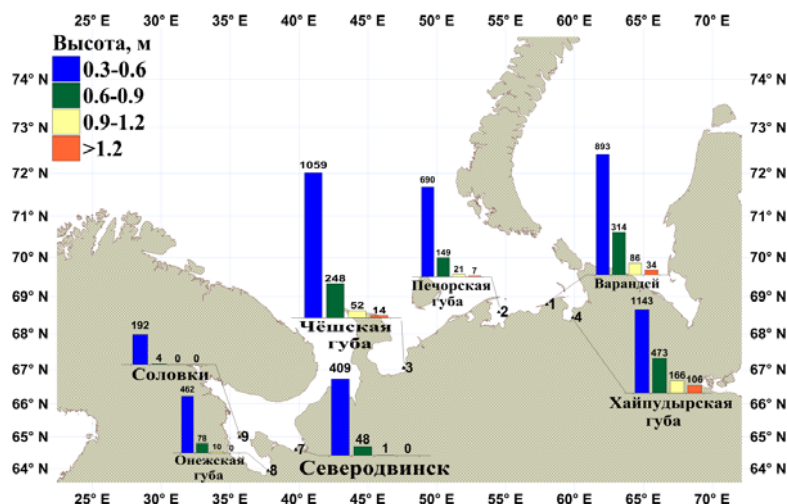


Рис. 5. Количество нагонов в период 1979–2015 гг. по диапазонам высот.

С помощью данных численного моделирования получено распределение количества нагонов в процентах по месяцам за 1979–2015 гг. по шести пунктам, описанным выше (рис. 6). В Белом море четко выделяются месяцы с наименьшим и наибольшим количеством нагонов: соответственно, июль (1–3 %) и октябрь (Соловки 16 %, Северодвинск 13 %), исключение составляет Онежская губа. Максимальное количество нагонов здесь наблюдается в ноябре (13 %). Второй небольшой максимум отмечается в феврале и составляет 11–12 %. В Баренцевом море наименьшее количество нагонов наблюдается в июле-августе и составляет 5 % (в Хайпудырской губе – 6 %), а максимальное – в октябре (Хайпудырская губа – 11 %, Варандей – 12 %, Чёшская губа – 13 %, Печорская губа – 14 %). В Хайпудырской губе в течение всего года отмечается достаточно равномерное распределение возникновения нагонов, которое колеблется от 6 до 11 % по месяцам в течение всего года.

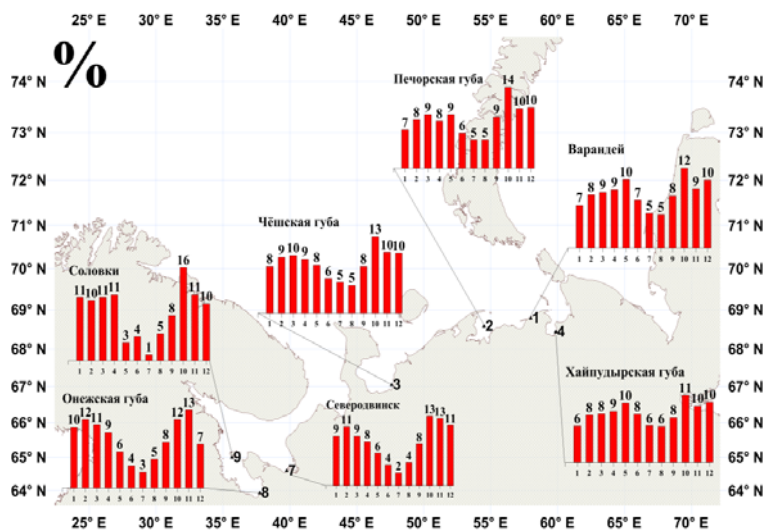


Рис. 6. Количество нагонов (%) по месяцам за период 1979–2015 гг.

На рис. 7 представлено распределение количества нагонов по сезонам (зима: декабрь, январь, февраль и т. д.) за период 1979–2015 гг. Минимальное количество нагонов формируется в летний период как в Белом, так и в Баренцевом море: Соловки – 19, Северодвинск – 49, Онежская губа – 63, Печорская губа – 136, Чёшская губа – 214, Варандей – 236, Хайпудырская губа – 386. В обоих морях максимальное количество нагонов зафиксировано в осенний период: Соловки – 68, Северодвинск – 154, Онежская губа – 180, Печорская губа – 284, Чёшская губа – 421, Варандей – 388, Хайпудырская губа – 536. Второй максимум нагонов образуется в Белом море зимой, а в Баренцевом – весной, исключение – Чёшская губа.

Оценка процентного вклада атмосферного давления и ветрового напряжения в формирование высоты нагона показала, что наибольшее количество нагонов образуется под действием ветрового напряжения (вклад более 75 %) на всех станциях, кроме Северодвинска, Чёшской губы, Печорской губы, где вклад ветра составляет 55–75 % (рис. 8). Количество нагонов, где вклад давления в их формирование составляет более 55 % следующее: в Соловках – 3 % (от общего количества), Онежской губе – 6 %, Северодвинске – 8 %, Варандее и Хайпудырской губе – 9 %, Чёшской губе – 10 %, Печорской губе – 11 %. Причем в Хайпудырской губе 3 % всех нагонов образуется исключительно под действием атмосферного давления (более 75 %).

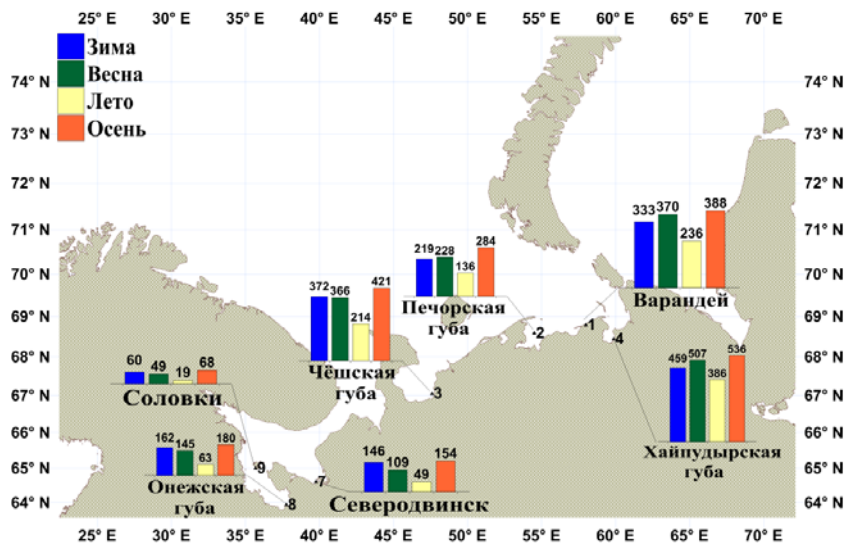


Рис. 7. Распределение количества нагонов в пунктах по сезонам за период 1979–2015 гг.

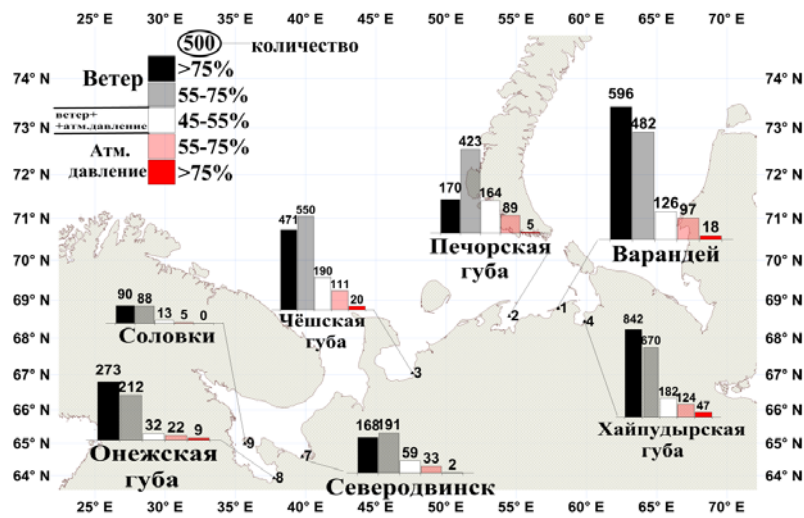


Рис. 8. Распределение количества нагонов в зависимости от вклада ветра (%) и атмосферного давления (%) в формирование нагонов за период 1979–2015 гг.

Оценки вклада ветрового волнения и льда (для зимних месяцев) проводились для нагонов в Варандее (табл. 1). Вклад ветрового волнения в уровень моря может составлять до 5 % (до 10 см), а вклад концентрации ледового покрова в зимние месяцы 2–5 % (до 8 см). Однако такого количества расчетов недостаточно для полной оценки воздействия ветрового волнения и ледового покрова на уровень моря.

Таблица 1. Данные уровня моря (м) на станции Варандей во время нагонов, рассчитанные с помощью ADCIRC+SWAN для оценки вклада ветрового волнения и ледового покрова в формирование нагона

Дата, время (BCB) нагона на ст. Варандей	Без SWAN (уровень, м)	SWAN (уровень, м)	SWAN без льда (уровень, м)
27.01.2010, 06:00	2,13	2,15	2,23
25.04.2010, 19:00	1,77	1,78	
24.07.2010, 06:00	3,46	3,58	
17.08.2010, 02:00	2,14	2,20	
18.11.2010, 15:00	2,12	2,22	2,21
02.12.2010, 22:00	1,83	1,84	1,87

Для анализа синоптических ситуаций во время нагонов, использовалась классификация, описанная в [2, 3, 12]. Для анализа штормовых нагонов в Северодвинске были выбраны все случаи с высотой нагона более 0,5 м, а для Варандея – более 1,0 м (табл. 2). Для Северодвинска таких случаев за период 1979–2015 гг. выявлено 76, для Варандея – 107. В Северодвинске 47 %, в Варандее 63 % нагонов образуются после прохождения глубоких «ныряющих» циклонов. Причем нагон в Варандее в любом случае образуется под действием ветра западного направления, а максимальный средний уровень 1,63 м образуется после прохождения западных циклонов. Формирование нагона в Белом море, где баренцевоморская нагонная волна трансформируется в результате действия местного ветра и под влиянием рельефа дна и геометрии береговой линии, имеет более сложную структуру [8]. Нагоны, возникающие при прохождении «ныряющих» циклонов, характеризуются наибольшей средней высотой, равной 0,64 м.

На основе данных, полученных с помощью модели, была рассчитана максимальная высота нагона, возможная один раз в сто лет. Для Белого моря высота составила в Соловках – 1,2 м, Северодвинске – 1,6 м, Онежской губе – 1,9 м; для Баренцева моря в Чёшской и Печорской губе – 2,3 м, Варандее – 3,7 м, Хайпудырской губе – 4,9 м.

Таблица 2. Характеристика штормовых нагонов в Белом и Баренцевом морях в зависимости от траектории циклонов

Траектории циклонов (для Белого моря)	1	2	3
Аномальные	11	0,59	113
Западные с центром над Белым морем	21	0,60	116
Западные с центром над Баренцевым морем	12	0,63	193
"Ныряющие"	47	0,64	152
Южные	9	0,54	161
Траектории циклонов (для Баренцева моря)			
Аномальные	16	1,22	278
Западные	21	1,26	265
"Ныряющие"	63	1,23	276

Примечание: 1 – количество нагонов, %; 2 – средняя высота нагона, м; 3 – среднее направление ветра (°) за шесть часов перед максимумом нагона.

На основе численного моделирования дана оценка межгодовой изменчивости нагонов за период 1979–2015 гг. В Белом море (рис. 9) по данным трех пунктов (Соловки, Двинская губа, Онежская губа) наблюдается схожая картина распределения количества нагонов в исследуемый период.

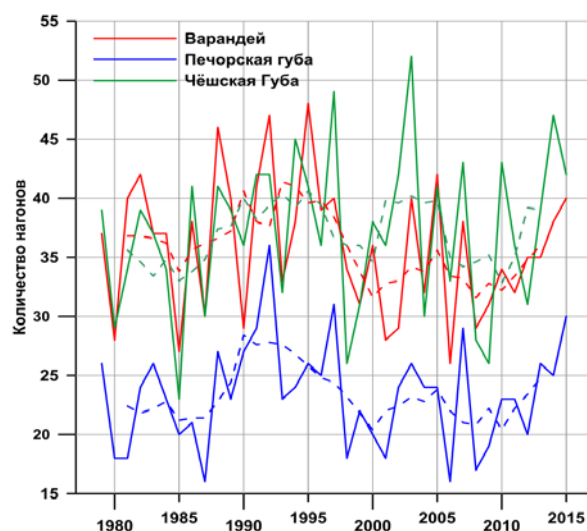


Рис. 9. Многолетняя изменчивость возникновений нагонов (>0,3 м) в Белом море (пунктир – скользящее среднее с шагом 5 лет) за период 1979–2015 гг.

Данные скользящего среднего с шагом 5 лет в Двинской и Онежской губе и Соловках показывают минимальное количество нагонов в 1982, 1998, 2010 гг., а максимальное – в 1993, 2003, 2013 г. В Соловках количество нагонов находится в диапазоне от 1 до 9 нагонов, в Двинской губе и Онежской губе возникает от 5 до 20 нагонов в год. В Баренцевом море (рис. 10) минимальное количество нагонов возникало в 1985, 2000, 2007 и 2010 гг. по данным в Печорской губе, Варандее и Чёшской губе, а максимальное – в 1983, 1990, 2005 гг. В Печорской губе зафиксировано от 15 до 36 нагонов в год, что меньше чем в Варандее и Чёшской губе, где количество нагонов в год находится в диапазоне от 24 до 53.

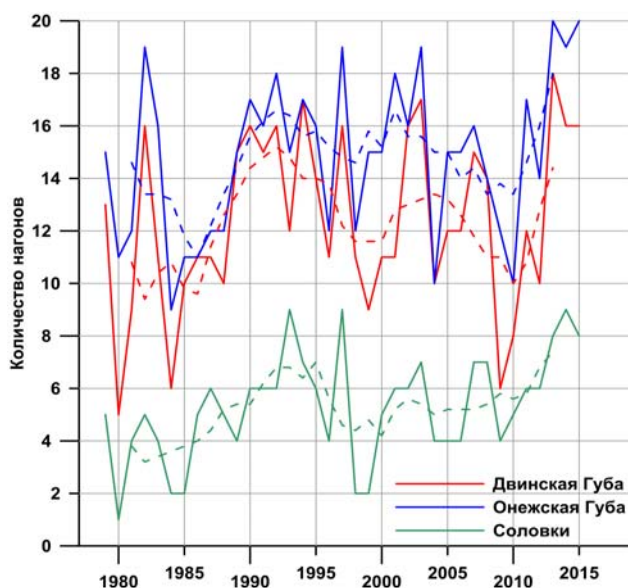


Рис. 10. Многолетняя изменчивость возникновений нагонов (>0,3 м) в Баренцевом море (пунктир – скользящее среднее с шагом 5 лет) за период 1979–2015 гг.

Заключение

В настоящей работе представлена новая методика расчета высоты нагонов, предлагается разделить термин «нагон» и «штормовой нагон». Данные численного моделирования позволили изучить нагоны за продолжительный период времени с 1979 по 2015 г. С помощью моделирования установлено, что в Белом море доля нагонов высотой 0,9–1,2 м

равна 1 % от всего их количества за 37 лет. В Баренцевом море нагоны высотой более 1,2 м составляют 3 % от общего количества за тот же промежуток времени, нагоны высотой 0,9–1,2 м – 6 %. Наибольшее количество нагонов образуется в Хайпудырской губе. В обоих морях наименьшее количество нагонов образуется в июле-августе, наибольшее – в октябре.

Впервые отдельно рассчитан вклад ветра, атмосферного давления, ветрового волнения и концентрации льда в формирование нагонов. Количество нагонов, которые образованы только за счет атмосферного давления, в разы меньше, чем нагонов, которые образованы под действием ветровой составляющей. Онежская губа, Хайдупурская губа, Варандей – станции, где нагон формируется под действием ветра (действие ветра более 75 %) в наибольшем числе случаев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФГ грант №14-37-00038.

Список использованных источников

1. Белов В.П., Филиппов Ю.Г. Численное моделирование суммарных колебаний уровня Белого моря // Метеорология и гидрология. 1985. № 7. С. 63-69.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том I. Баренцево море. Выпуск 1. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 280 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II. Белое море. Выпуск 1. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.
4. Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2015. № 3. С. 41-49.
5. Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря: дисс...д-ра геогр. наук. СПб: РГГМУ, 2004.
6. Кондрин А.Т. Штормовые нагоны в районе Беломорской биологической станции МГУ // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2015. № 6. С. 96-107.
7. Кондрин А.Т. Формирование штормовых нагонов в Белом море // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 33-40.
8. Кондрин А.Т., Кораблина А.Д., Архипкин В. С. Результаты численного моделирования штормовых нагонов в Белом море с помощью ADCIRC // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2017 (в печати).
9. Кораблина А.Д., Архипкин В.С., Самборский Т.В. Особенности формирования штормовых нагонов в динамической системе Белое море – устьевая область р. Северная Двина // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2016. № 1. С. 78-86.
10. Мысленков С.А., Голубкин П.А., Заболотских Е.В. Оценка качества моделирования волнения в Баренцевом море при прохождении зимнего циклона // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2016. № 6. С. 26-32.

11. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 429 с.
12. Потанин В.А. Формирование и затухание баренцевоморских и беломорских штормовых нагонов // Вопросы океанологии и комплексных исследований шельфа Баренцева и Белого морей: тезисы докл. совещ. Апатиты, 1972. С. 11-14.
13. Booij N., Ris. R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104(C4). P. 7649-7666.
14. Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J., Holthuijsen L.H., Dawson C., Luettich R.A., Jensen R., Smith J.M., Stelling G.S., Stone G.W. Modeling Hurricane Waves and Storm Surge using Integrally-Coupled, Scalable Computations // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58, No. 1. P. 45-65.
15. 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.
16. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 387 p. Available at <http://www.cambridge.org/9780521860284>. ISBN 0-521-86028-8. XVI.
17. Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of Seven Different Atmospheric Reanalysis Products in the Arctic // J. Clim. 2014. Vol. 27. P. 2588-2606. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00014.1.
18. 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.
19. 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
20. Lyard F., Lefèvre F., Letellier T., Francis O. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // Ocean Dynamics. 2006. No. 56. P. 394-415.
21. Resio D.T., Westerink J.J. Modeling the physics of storm surges // Physics Today. 2008. P. 33-38.
22. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2010. Vol. 91, No. 8. P. 1015-1057.
23. Saha S. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2 // J. Climate. 2014. Vol. 27. P. 2185-2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

Поступила в редакцию 02.05.2017 г.