

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Кораблина Анастасия Дмитриевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГОНОВ
В БЕЛОМ И БАРЕНЦЕВОМ МОРЯХ**

Специальность: 25.00.28 – «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Москва — 2018

Работа выполнена на кафедре океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель — *Архипкин Виктор Семёнович,*
кандидат географических наук, доцент
- Официальные оппоненты — *Нестеров Евгений Самойлович,*
доктор географических наук, заведующий
отделом морских гидрологических прогно-
зов Гидрометцентра России
- *Огородов Станислав Анатольевич,*
доктор географических наук,
ведущий научный сотрудник Научно-
исследовательской лаборатории геоэколо-
гии Севера географического факультета
Московского государственного универси-
тета имени М.В. Ломоносова
- *Кузнецов Сергей Юрьевич,*
доктор физико-математических наук, ру-
ководитель Лаборатории шельфа и мор-
ских берегов им. В.П. Зенковича Инсти-
тута океанологии Российской академии
наук имени П.П. Ширшова

Защита диссертации состоится «29» марта 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7495 9391420, факс +74959328836)

E-mail: science@geogr.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/90623355/>

Автореферат разослан « » февраля 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Исследование условий формирования нагонов на арктическом побережье имеет важное научное и практическое значение в связи с усилением экономического освоения природных ресурсов моря, таких как нефть и газ, увеличением морского судоходства на Северном морском пути. Последствия нагона ощутимы именно в прибрежной зоне морей, поэтому расчёт высоты нагона важен при строительстве гидротехнических защитных сооружений, морских нефтеналивных терминалов и портовых комплексов. Однако малое количество данных наблюдений за уровнем моря влечёт за собой недостаточную дискретность по времени и пропуски в этих данных, а также небольшой пространственный охват. **Актуальность** исследования связана с активным освоением Арктики в настоящее время и необходимостью получения новых знаний о формировании и развитии нагонов в приоритетном для России регионе. В последнее время в России особенно характерна проблема получения необходимых данных наблюдений для изучения нагонов в связи с закрытием и без того редких гидрометеорологических постов, где проводят наблюдения за уровнем моря, а получить данные с этих постов часто очень трудно. Поэтому особое значение для исследования нагонов приносит численное моделирование.

Исследования стонно-нагонных колебаний уровня в Белом и Баренцевом морях имеют длительную историю. Результаты более ранних исследований обобщены в (Потанин, 1971, 1972; Белов и Филиппов, 1985; Проект..., 1990, 1991; Инжебейкин, 2003; Filatov et al., 2005). При помощи анализа данных наблюдений получены средние и экстремальные характеристики опасных подъёмов уровня моря, проанализированы синоптические данные во время нагонов и непериодической составляющей уровня, в результате проведена типизация циклонов и исследована динамика нагонной волны в разных частях Белого и Баренцева морей. Таким образом, было выявлено, что всё побережье Баренцева моря подвержено штормовым нагонам, а возникновение баренцевоморских и беломорских нагонов обусловлено выходом глубоких циклонов (Потанин, 1971, 1972; Кондрин 2015, 2016). В частности, показано, что проходящие над акваторией Баренцева моря глубокие циклоны генерируют барическую волну, которая затем проникает в Белое море и индуцирует нагон. Были получены оценки относительного вклада сил давления и ветра при формировании нагонов в различных синоптических ситуациях. Эти исследования свидетельствуют о наличии тесной генетической связи между баренцевоморскими и беломорскими нагонами. Данные результаты получены в основном в период до 90-х годов прошлого столетия, поэтому они нуждаются в проверке, дополнении и уточнении в связи с появлением новых данных и подходов к исследованию этого природного явления.

В работах (Белов и Филиппов, 1985; Инжебейкин, 2003) изучение нагонов в Белом море проводилось на основе численного моделирования, при этом использовалась грубая ортогональная сетка с низким пространственным разрешением, не позволяющая учитывать влияние батиметрии и геометрии береговой линии в прибрежных районах, особенно в заливах, и уже не отвечающая современным требованиям. Исследовалось формирование уровня в условиях взаимо-

действия ветрового нагона и прилива (Белов и Филиппов, 1985), однако данное исследование не учитывало: 1) вклад градиентов атмосферного давления, 2) взаимодействие между приливом и нагонной волной, входящей в Белое море из Баренцева моря, 3) взаимодействие между различными видами движений в мелководных районах Белого моря. Инжебейкин (2003), с помощью разработанной им численной модели, идентифицировал и описал механизм нелинейного взаимодействия между приливами и волнами штормового нагона в Белом море. Однако не оценивался процентный вклад факторов, влияющих на формирование нагона, например, давления, ветрового воздействия, волнения и подстилающей поверхности.

В последнее время физико-статистическое исследование нагонов в Белом и Баренцевом морях рассматривалось в (Кондрин, 2015, 2016; Кораблина и др., 2016). На основании анализа новых рядов данных наблюдений на четырёх гидрометеорологических постах, расположенных в Горле, Двинской губе, Кандалакшском заливе и на Соловках анализировались остаточные колебания уровня Белого моря.

Объект исследования — нагоны высотой более 0,3 м в Белом и Баренцевом морях.

Предмет исследования — условия формирования и количественные характеристики нагонов.

Цель и задачи диссертации

Цель данной работы — исследование закономерностей формирования нагонов в Белом и Баренцевом морях на основе результатов математического моделирования.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка методики выделения сгонно-нагонных колебаний по данным математического моделирования.
2. Выявление основных периодов колебаний уровня моря с помощью спектрального анализа натуральных данных наблюдений за уровнем моря.
3. Построение расчётной нерегулярной сетки для моделирования нагонов в Белом и Баренцевом морях и адаптация гидродинамической модели ADCIRC и спектральной волновой модели SWAN для района исследования.
4. Верификация модели ADCIRC с помощью натуральных данных измерений уровня моря.
5. Выполнение численных экспериментов расчёта нагонов за период 1979 — 2015 гг. с использованием различных факторов (с / без учёта влияния воздействия ветра, атмосферного давления, ветрового волнения, концентрации льда).
6. Выделение синоптических ситуаций, приводящих к возникновению наибольших нагонов.
7. Оценка вклада воздействия ветра, атмосферного давления, ветрового волнения, концентрации льда в формирование нагонов.
8. Оценка сезонной и межгодовой изменчивости возникновения нагонов.

Научная новизна работы

Впервые выполнен расчёт высоты нагонов за продолжительный период времени с 1979 по 2015 гг. (37 лет) на основе результатов математического моделирования с использованием нерегулярной сетки, охватывающей Белое и Баренцево моря, с учётом влияния ветрового воздействия, атмосферного давления, прилива, концентрации льда и ветрового волнения.

Усовершенствована методика исследования нагонов при помощи исключения приливных и низкочастотных составляющих (с периодом более 35 — 40 сут) из суммарного уровня моря.

Выявлены синоптические ситуации, приводящие к формированию наибольших нагонов.

Дана оценка воздействия ветра, атмосферного давления, ветрового волнения и концентрации льда в формирование нагона.

Выявлена межгодовая и сезонная изменчивость возникновения нагонов в Белом и Баренцевом морях, а также рассчитаны экстремальные значения высоты нагонов, возможные раз в 100 лет.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в том, что её результаты и выводы о формировании нагонов могут быть востребованы:

1) при подготовке документации по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) для планирования и проведения крупных работ при освоении минеральных и биологических ресурсов морей (Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Министерство природных ресурсов и экологии РФ);

2) при прогнозировании природных катастроф в регионе (Министерство РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий);

3) при долгосрочных проектах социально-экономического развития городов, крупных населённых пунктов на арктическом побережье России (Администрация Северного морского пути при Федеральном агентстве морского и речного транспорта Министерства транспорта РФ);

4) при строительстве и эксплуатации нефтеналивных портов, морских отгрузочных терминалов и берегозащитных сооружений, а также других гидротехнических сооружений с учётом экстремальных значений высоты нагона, возможных раз в сто лет (ФГБУ «Администрация морских портов Западной Арктики», Министерство транспорта РФ).

Результаты диссертационной работы используются при выполнении проекта РНФ «Изменения окружающей среды в Арктике и их влияние на население и хозяйство» (№14-37-00038).

Личный вклад автора

Все анализируемые результаты работы получены диссертантом лично или в соавторстве с кандидатом географических наук В.С. Архипкиным и кандидатом географических наук А.Т. Кондриным. Личный вклад автора состоит в самостоятельной подготовке необходимых входных параметров, поиске навигационных карт и натуральных данных, проведении всех расчётов, анализе исполь-

зованных данных, визуализации, интерпретации и обобщении полученных результатов. Необходимые расчётные программы, используемые во время данного исследования, созданы автором. Диссертант принимал непосредственное участие в написании научных статей по теме работы, а также в представлении научных докладов на конференциях, как в устных, так и в стендовых секциях.

Положения, выносимые на защиту

1. Впервые с использованием оригинальной нерегулярной (unstructured) сетки, охватывающей акватории Белого и Баренцева морей, выполнено гидродинамическое моделирование нагонов, позволяющее выявить особенности формирования нагонов на этих акваториях.

2. При отдельном рассмотрении роли ветра, атмосферного давления, ветрового волнения и концентрации льда в формирование нагона преобладающая роль принадлежит ветровой составляющей, при этом наибольшее количество нагонов максимальной величины ежегодно образуются после прохождения «ныряющего» циклона.

3. Наибольшее и наименьшее количество нагонов в Белом и Баренцевом морях наблюдается в октябре и июле соответственно, что определяется характером синоптических условий в районе этих акваторий.

4. Межгодовая изменчивость нагонов в период с 1979 по 2015 гг. в Белом и Баренцевом морях не имеет значимых линейных трендов. Связь между межгодовой изменчивостью формирования нагонов и индексом североатлантической осцилляции не обнаружена.

5. Онежская и Хайпудырская губы — районы наиболее частого образования нагонов за 37-летний период, что связано с особенностью их физико-географического положения и конфигурацией. Причём максимальная зафиксированная высота нагона здесь составила 1,19 и 2,39 м соответственно.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались автором на международных и отечественных конференциях, научной школе: XX и XXI международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, Россия, 2013, 2014); Региональной конференции международного географического союза (IGU, Москва, 2015); Генеральной ассамблее европейского союза наук о Земле (European Geosciences Union General Assembly, EGU, Вена, Австрия, 2016, 2017); совместной конференции «Управление рисками в прибрежной зоне в условиях меняющегося климата» (EMECS 11 – Sea Coasts XXVI Joint Conference "Managing Risks to Coastal Regions and Communities in a Changing World", Санкт-Петербург, Россия, 2016); всероссийской конференции «Комплексные исследования мирового океана» (Москва, Россия, 2017); междисциплинарной летней школе «Северный Ледовитый океан и маргинальная зона льда» (NVP Interdisciplinary PhD and Post-Doc Summer School; "The Arctic Ocean and the marginal ice zone (MIZ)", Лонгйир, Шпицберген, Норвегия, 2017), научной конференции "Моря России: наука, безопасность, ресурсы", IV научно-практической молодежной конференции "Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами" (Севастополь, 2017); VI международной научно-практической конференции

"Морские исследования и образование: MARESEDU-2017" (Москва, Россия, 2017); всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, Россия, 2017); соавтором на 13 международном конгрессе Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST17 (Меллиха, Мальта, 2017).

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, определённых п. 2.3 Положения о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и литературы из 126 наименований, в том числе 84 на иностранном языке. Общий объём работы содержит 126 страниц, включая 33 рисунка и 10 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю к. г. н., доценту кафедры океанологии В.С. Архипкину за неоценимую помощь во время работы над диссертацией. Автор благодарит сотрудников ФГБУ «Северное УГМС» начальника отдела гидрометеорологии моря ГМЦ О.Н. Балакину и начальника базы экспедиционного флота В.В. Гарькавенко, с. н. с. кафедры океанологии С.А. Мысленкова за помощь в поиске необходимых исходных данных для расчётов, к. г. н., с. н. с. кафедры океанологии А.Т. Кондрина.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, её практическая значимость, научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, практическая значимость работы и личный вклад автора, указаны основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, о структуре и объёме диссертации.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена условиям и механизму формирования нагонов. Несмотря на потенциально катастрофические последствия штормовых нагонов, их возникновение и распространение исторически плохо изучено, до сих пор существуют неверные представления об этом явлении. В **разделе 1.1** на основании различных литературных источников (Численные..., 1964; Лабзовский, 1971; Murty, 1984; Боуден, 1988; Ullmann et al., 2008; Wolf, 2009; Olbert et al., 2010; Siek, 2011; Needham and Keim, 2011; Wiśniewski and Wolski, 2011; Weissea et al., 2012) приводится и анализируется термин «штормовой нагон». Отмечено, что, главным образом на формирование нагона оказывают влияние пять важных факторов, таких как: 1) ветер (поверхностное напряжение ветра, направление ветра (нормальное к берегу, или вдоль берега), скорость ветра и его продолжительность), 2) атмосферное давление, 3) ветровое волнение, 4) взаимодействие нагона с приливом, 5) лёд на поверхности моря. Однако некоторые нагоны формируются исключительно за счёт местных особенностей ветра и локальной прибрежной батиметрии или формы береговой линии.

В разделе 1.2 описаны физические механизмы формирования нагона. Подробно рассматривается влияние каждого из факторов и показано, к каким последствиям они приводят.

Например, сила нагона зависит исключительно от метеорологических условий, таких как скорость, направление и продолжительность ветра и атмосферное давление. Сравнение возмущений, вызванных касательным напряжением ветра и непосредственным влиянием атмосферного давления, показывает, что для пониженных областей давления в средних широтах ветер создаёт приблизительно на порядок больший эффект, чем прямое воздействие атмосферного давления (Боуден, 1988). В некоторых случаях поверхностное ветровое напряжение является доминирующим фактором в формировании нагонов (Needham and Keim, 2011).

Развитию нагона способствует прохождение циклонов, так как во время них наблюдается эффект «обратного барометра», что приводит к изменению уровня моря.

Отдельно выделяют нагоны, формирующиеся при выходе глубоких тропических циклонов (тайфунов) на побережье (например, вся западная часть Атлантического океана, Мексиканского залива и западной части Тихого и Индийского океанов).

При образовании волнового нагона уровень моря повышается ещё примерно на 10 — 12 см при скорости ветра около 20 м/с (Рабинович, 1993). Wolf (2009) с помощью моделирования показал, что ветровое волнение может привести в общий уровень около 0,48 м.

В некоторых случаях величина нагона зависит от свободных длинных волн, сгенерированных в открытом море во время движения атмосферных барических систем. При совпадении скоростей свободной длинной волны и барической системы может произойти резонанс, и высота волны сильно возрастёт (Дуванин, 1968; Жуков, 1976).

Показано, что в море, где ширина превосходит баротропный радиус деформации Россби, свободная волна захватывается береговой зоной и распространяется дальше в виде захваченной волны Кельвина. Если скорость барической системы будет близка к скорости волны Кельвина, то может возникнуть резонанс, и амплитуда нагона резко возрастёт (Боуден, 1988). Для Белого моря баротропный радиус деформации Россби равен $\sqrt{10 \text{ м/с}^2 * 100 \text{ м}/10^{-4} \text{ с}^{-1}} \approx 320 \text{ км}$, что значительно больше средней ширины Белого моря (в среднем составляющая 150 км). Следовательно, величина нагона естественно зависит от ширины полосы мелководья у наветренного берега. Важную роль здесь играет расстояние до критических глубин (3 — 4 м) (Гидрометеорологические..., 2008; Weissea et al., 2012). Чем дальше эти глубины от берега, тем больше на данном участке величина нагона.

Кроме того, на мелководье, где отношение глубины моря к глубине трения Экмана имеет порядок $\sim 0,1$, полный поток направлен по ветру, то есть повышение уровня создаёт нормальный к берегу ветер (Лабзовский, 1971; Боуден, 1988). Другими словами, максимальный нагон в глубоком море образуется при ветрах, параллельных береговой черте, а для мелководных морей — при ветре, нормальном к берегу.

При исследовании величины нагона нужно учитывать нелинейное взаимодействие прилива и нагона (Инжебейкин, 2003).

Полный ледяной покров в Белом и Баренцевом морях наблюдается редко, так как сильные ветры имеют тенденцию ломать лёд, но при непрерывном покрытии льдом напряжение ветра может быть сбалансировано горизонтальными толчками, передаваемыми через жёсткий ледяной покров. Последствия сезонных изменений ледяного покрова также значительны для нагонов в море Бофорта в канадской Арктике, где нагоны уменьшаются под действием ледяного покрова и сильнее затухают, чем сгоны (Kowalik, 1984).

Важно уделять внимание наличию естественных и искусственных препятствий для течения воды, например, речного потока и гидротехнических берегозащитных сооружений, которые оказывают сильное воздействие на нагон, иногда вызывая экстремальные локализованные различия уровня воды (Лебедева и др., 2015; Кораблина и др., 2016). Однако для автора данный вопрос представляется отдельной большой задачей и не рассматривается в работе.

В **разделе 1.3** даны региональные особенности штормовых нагонов в Мировом океане.

Вторая глава посвящена современному представлению о нагонах в Белом и Баренцевом морях. В **разделе 2.1** дано физико-географическое описание Белого и Баренцева морей; отдельно представлена устьевая область Северной Двины. В **разделе 2.2** описаны особенности нагонов в Белом и Баренцевом морях. Причина нагонов в Белом и Баренцевом морях — это проходящие глубокие циклоны над акваториями этих морей. Циклоны в исследуемой области принято делить на следующие: 1) «ныряющие», 2) западные, 3) южные, 4) аномально смещающиеся. При западном направлении циклоны различают в зависимости от расположения его центра: над Баренцевым или над Белым морями.

Нагоны в Белом море в основном обусловлены выходом глубоких циклонов двух типов: «ныряющие» (повторяемость около 88 %) и западные (атлантические). Роль воздействия поля атмосферного давления и ветра на формирование нагонов неодинакова в различных областях Баренцева и Белого морей. Для Воронки Белого моря эти составляющие равны 50 %, а для Бассейна с заливами соответственно 55 % и 45 % от общей величины нагона (Потанин, 1972). В результате воздействия поля атмосферного давления на водные массы в Баренцевом море образуется длинная волна, распространяющаяся затем в Белое море (там же). В среднем величина нагона в Белом море составляет 0,65 м (в Воронке) и 0,68 м (в Бассейне) (там же), в заливах — до 0,9 м, а его продолжительность — в среднем 80 ч.

Преобладающая схема формирования для большинства нагонов в Белом море следующая. Циклоны с центром над Баренцевым морем генерируют длинную гравитационную волну в Баренцевом море (скорость около 150 км/ч). Далее эта волна распространяется в Белое море, подвергаясь воздействию прилива, рельефа дна и берега. Центр циклона успевает переместиться на восток и ЮВ к моменту достижения гребня нагонной волны вершин заливов (кроме Мезенского). Во время максимальных уровней в Белом море оно оказывается в тыловой части циклона в зоне экстремальных ветров СЗ направления. При этих

циклонах влияние градиентов приземного атмосферного давления незначительно (Проект..., 1991). Соответственно, нагонные ветры для Белого моря — это ветры, перпендикулярные береговой черте (меридиональная составляющая), то есть тыловые ветры надвигающихся глубоких циклонов (северные румбы для исследуемых станций). Поэтому для исследования нагонов в Белом море с помощью моделирования необходимо использовать расчётную сетку, охватывающую Белое и Баренцево моря.

Основной процесс, влияющий на формирование нагонов в Баренцевом море, — воздействие поля атмосферного давления и трансформация длинной волны, действующие одновременно, но по-разному, в зависимости от метеорологических условий и района моря. Скорость распространения этой волны составляет в Баренцевом море порядка 54 км/ч, в Белом море — 22 км/ч, а в Воронке Белого моря уменьшается до 14 км/ч (Потанин, 1972). Ещё одной особенностью формирования нагонов в Баренцевом море является не локальное действие ветра, а подъём моря у берега за счёт растекания вод из области шторма в результате совместного эффекта циклонического поля ветра и силы Кориолиса. В условиях обширного Баренцева моря со средней глубиной около 200 м, соизмеримого с размерами циклонов, эффекты вращения Земли и воздействия циклонической системы штормовых ветров практически равнозначны и взаимосвязаны. В Печорской губе наибольшие подъёмы уровня обусловлены ветрами, перпендикулярными к линии берега (меридиональная составляющая), то есть ветрами северных направлений, находящихся в тыловых частях циклонов, уходящих к востоку. По сведениям из лоций Баренцева моря превышения уровня при нагонах для устья р. Индига (Чёшская губа) оценивались в 1,5 м, в устье р. Печоры — 1,0 — 1,3 м.

Дан анализ работ, где представлено изучение формирования нагонов в Белом море с помощью методов математического моделирования.

В **третьей главе** приведены материалы и методы исследования. В **разделе 3.1** описаны исходные данные о поле скорости приземного ветра на высоте 10 м, атмосферном давлении, концентрации льда и гармонических постоянных. Для расчётов с 1979 по 2010 гг. используются данные реанализа NCEP CFSR (National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis) с пространственным разрешением $\sim 0,3125^\circ \times 0,312^\circ$ и временным шагом равным 1 ч (Saha S. et al., 2010). Для численных расчётов с 2011 по 2015 гг. использовалась следующая версия реанализа NCEP/CFSv2 (Climate Forecast System Version 2), имеющая в отличие от предыдущего реанализа пространственное разрешение $\sim 0,205^\circ \times 0,204^\circ$ (Saha et al., 2014). Поле скорости приземного ветра на высоте 10 м в данном реанализе при сравнении с натурными данными (среди семи реанализов) имеет наименьшую систематическую ошибку, находящуюся в диапазоне от 0,0 до минус 0,3, а корреляция — в диапазоне от 0,80 до 0,87 (Lindsay et al., 2014). При сравнении данных концентрации льда корреляция составила 0,79 (Lindsay et al., 2014).

В качестве входных данных используются гармонические постоянные на основе базы данных глобальной приливной конечно-элементной модели FES2004 (finite element solutions) версии 2004 г. (Le Provost, 1994; Lyard, 2006). Амплитуда и фаза пятнадцати гармонических постоянных распределяются на

сетке с разрешением $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ и временным шагом в 1 ч и рассчитываются отдельно для каждого океана. В работе используются восемь гармонических постоянных K1, O1, P1, Q1, N2, M2, S2, K2.

Для сравнения полученных модельных данных используются ежечасные временные ряды высот уровня морских гидрометеорологических станций (МГ-2) Северодвинск, Соловки, Сосновец. Данные наблюдений для анализа формирования нагонов представляют собой слишком редкую сеть измерений, и она совершенно недостаточна для исследования нагонов, так как данное явление в высшей степени зависит от местной специфики, определяемой батиметрией, береговой линией, синоптическими условиями.

В разделе 3.2 даётся описание методики выделения нагонов, используемое в данной работе. В работе термин «нагон» определяется как повышение уровня моря, вызываемое метеорологическими причинами относительно поверхности, искривленной приливом и длиннопериодными колебаниями уровня моря. Следовательно, для того чтобы найти величину нагона, нужно исключить приливные и длиннопериодные климатические колебания. Приливные колебания можно рассчитать и выделить тремя способами. 1) Сначала их можно рассчитать по натурным данным с помощью гармонического анализа, а затем удалить их из общего уровня. Однако, учитывая ограниченность натурных данных по времени и пространству, этот способ мы не рассматриваем. 2) Приливные колебания можно удалить с помощью цифровых фильтров, но их применение затруднено выбором типа фильтра и расчётом его устойчивости (Отнес и Эноксон, 1982). 3) Также приливные колебания можно рассчитать с помощью гидродинамических моделей на всей расчётной области, например, используя глобальную модель приливов FES2004 (Lyard et al., 2006), а потом их вычесть из общего уровня. Нами был выбран третий вариант. Затем остаётся учесть сезонные колебания, связанные с атмосферными процессами, и стерические колебания, которые изменяются из-за плотности морской воды за счёт изменения температуры и солёности воды. Однако существуют собственные низкочастотные колебания моря (Захарчук, 2009), выходящие за рамки диапазона естественного синоптического периода, которые нельзя объяснить только локальными аномобарическими эффектами. Поэтому сначала исследовались низкочастотные колебания уровня с помощью спектрального анализа ежечасных временных рядов уровня моря с буя Vardø (Норвегия) в 2014 г. для Баренцева моря и со станции Северодвинск в 2013 г. для Белого моря. Изменение рассчитанной спектральной плотности ($m^2 \times ч$) для этих пунктов показано на рисунке 1. Для 90-процентного доверительного интервала (степень свободы равна семи) данных уровня в Северодвинске верхняя доверительная граница равна $30 m^2 \times ч$, а нижняя — $3 m^2 \times ч$; в данных буя — 24,5 и $2,6 m^2 \times ч$ соответственно. В данных буя (Vardø, Норвегия) не были удалены приливные колебания, поэтому на рисунке 1 выделяется пик в 12 ч (чёрная линия), в отличие от данных станции Северодвинска (красная линия), где этого пика не наблюдается. Как в Белом, так и в Баренцевом море наблюдается пик спектральной плотности в 38 — 42 дня (выделено зелёным овалом на рисунке 1). В целом, в Баренцевом море наблюдаются значимые узкополосные пики спектральной плотности синоптических колебаний на периодах 38, 41 — 46 сут (Захарчук, 2009).

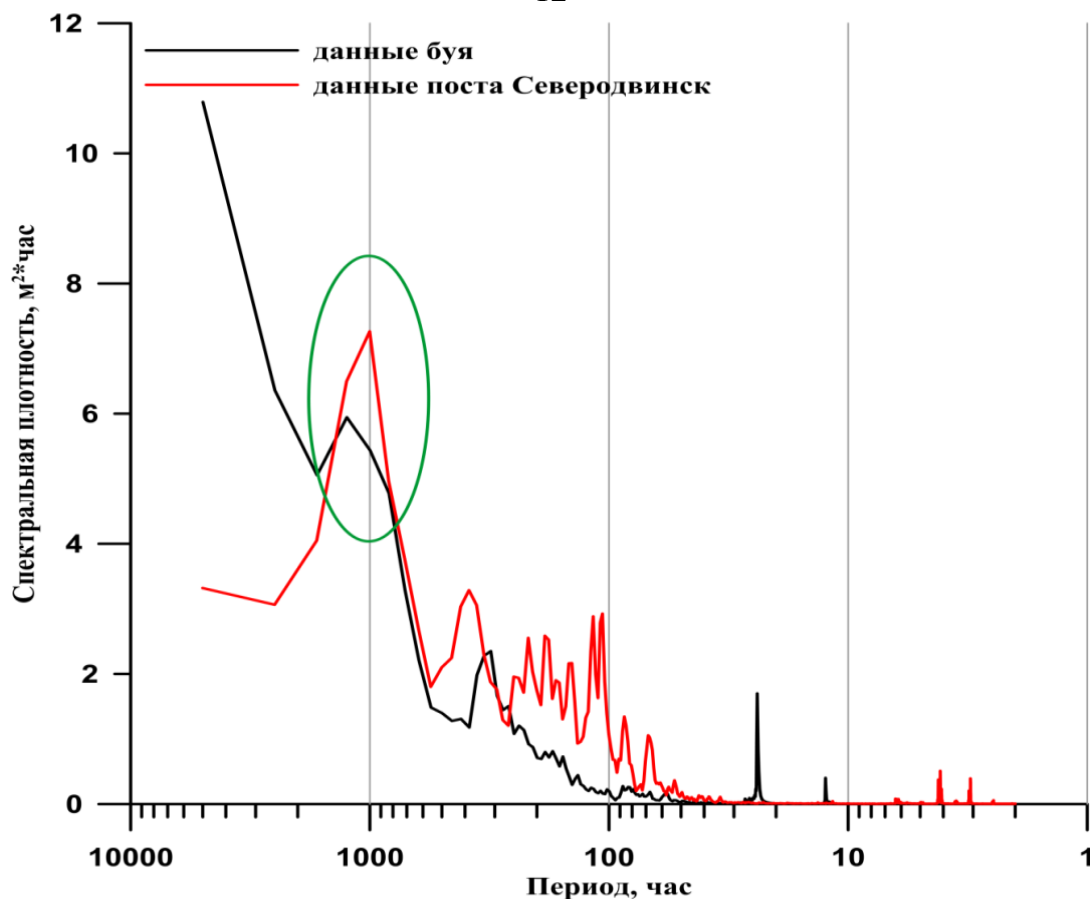


Рисунок 1. Спектральная плотность уровня моря ($\text{м}^2 \times \text{ч}$) по ежечасным уровням (м) данным буя (Vardø, Норвегия) в 2014 году и станции Северодвинск в 2013 году. (Зелёный овал выделяет пик спектральной плотности в ~ 40 сут).

В связи с этим смоделированная высота нагона (4) (рисунок 2) определялась путём вычитания из суммарной высоты уровня (1) приливных колебаний (2) с последующим исключением низкочастотных составляющих (с периодом более 40 сут) с помощью цифрового фильтра Баттерворта (Butterworth) (Отнес и Эноксон, 1982; Кораблина и др., 2017) с частотой среза 0,04 ц/ч, соответствующей периоду 25 ч (Emery, Thompson, 2001). В этом заключается новизна методики, так как обычно исключаются среднемесячные колебания. Причём в некоторых случаях нагон, полученный вышеописанным методом, в действительности мог иметь отрицательный уровень моря, а в других — высота нагона может совпадать с самыми высокими значениями уровня. В работе введено два понятия «нагон» и «штормовой нагон». Термин «нагон» — это повышение уровня моря, вызываемое метеорологическими причинами относительно поверхности, искривленной приливом и длиннопериодными колебаниями уровня моря. Понятие «штормовой нагон» определено как нагон, высота которого приводит к затоплению и разрушению береговых сооружений, поэтому высота «штормового нагона» определяется для каждого конкретного пункта на основе многолетних данных о наводнениях и экстремальном уровне моря. То есть термин «нагон» следует отнести к океанологическому событию, а «штормовой нагон» — к эколого-географическому.

Моделирование нагонов в Белом и Баренцевом морях производилось с помощью гидродинамической модели ADCIRC (Luettich et al., 1992, 2004). В работе исследовались все нагоны высотой более 0,3 м, которые потом разделе-

ны по диапазонам высот от 0,3 до 0,6 м, 0,6 — 0,9 м, 0,9 — 1,2 м, более 1,2 м. Продолжительность нагона определялась, во-первых, относительно нуля (абс) (тогда она будет соотноситься непосредственно с наблюдаемой продолжительностью); во-вторых, относительно уровня моря, из которого исключили приливные и высокочастотные колебания (линия (3), синяя на рисунке 2), то есть после применения фильтра Баттерворта. Последняя продолжительность отражает характеристику исключительно самого нагона, как океанологического события.

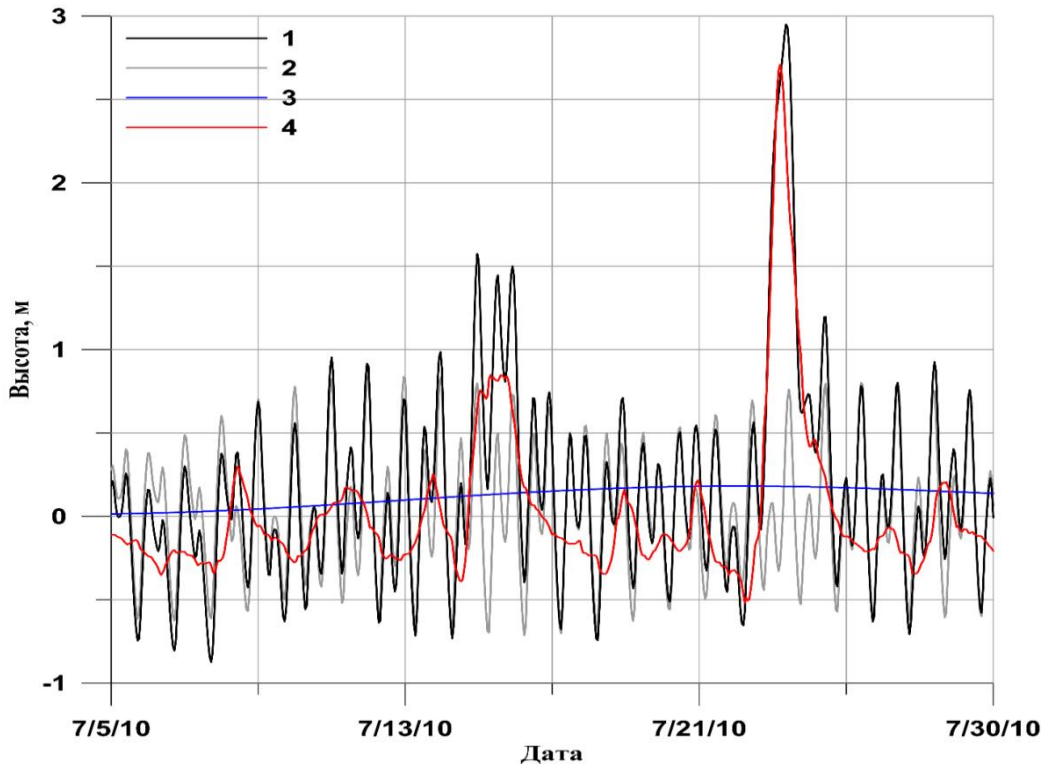


Рисунок 2. Уровень моря (м), рассчитанный с помощью численного моделирования на станции Варандей в 2010 году. Цифрами обозначены: 1 — модельный уровень, 2 — модельный прилив, 3 — уровень моря без прилива и высокочастотных колебаний, 4 — уровень моря без прилива и низкочастотных колебаний (40 сут).

В разделе 3.3 дано подробное описание гидродинамической модели ADCIRC, а также совместной гидродинамической и волновой спектральной модели ADCIRC+SWAN.

Модель ADCIRC использует вертикально интегрированные уравнения движения в неконсервативной форме (1, 2), уравнение неразрывности (3). Для вычисления уровенной поверхности используется общее волновое уравнение GWCE (4) (Westerink, et al., 1994):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial [\zeta + \frac{p_s}{g\rho_0} - \alpha\eta]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{H\rho_0} + \frac{M_x}{H} - \frac{D_x}{H} - \frac{B_x}{H}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial [\zeta + \frac{p_s}{g\rho_0} - \alpha\eta]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{H\rho_0} + \frac{M_y}{H} - \frac{D_y}{H} - \frac{B_y}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UH) + \frac{\partial}{\partial y}(VH) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{J}_y}{\partial y} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0, \text{ где} \quad (4)$$

$$\tilde{J}_x \equiv \frac{\partial}{\partial t}(UH) + \tau_0 UH = \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \tau_0 Q_x = H \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tau_0 UH,$$

$$\tilde{J}_y \equiv \frac{\partial}{\partial t}(VH) + \tau_0 VH = \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \tau_0 Q_y = H \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tau_0 VH,$$

где $f = 2\omega \sin \varphi$ — параметр Кориолиса; $\omega = 7,29212 \times 10^{-5}$ рад/с; φ — градус широты; M — вертикально интегрированный горизонтальный градиент напряжения; B — вертикально интегрированный бароклинный градиент давления; D — горизонтальный градиент вертикально интегрированных пульсаций скорости; ρ_0 — плотность воды; τ_s — поверхностное напряжение ветра; τ_b — напряжение трения на дне; τ_0 — параметр, отражающий вклад волновой части в уравнение (4) (при $\tau_0 = 0$ уравнение (4) — чисто волновое уравнение, параметр может меняться в зависимости от глубины моря для лучшей устойчивости численного решения); p_s — атмосферное давление на поверхности моря; η — ньютоновский приливной потенциал равновесия; $Q_x, Q_y \equiv UH, VH$ — составляющие полного потока по осям x, y на единицу ширины; U, V — интегрированные по глубине скорости потока по осям x, y

$$U, V \equiv \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u, v \, dz,$$

где u, v — вертикально изменяющаяся скорость по осям x, y ; $H \equiv \zeta + h$ — общая глубина воды; h — глубина (расстояние от геоида до дна); ζ — отклонение свободной поверхности.

Ледовое покрытие в модели ADCIRC отражается в виде изменения коэффициента трения ветра (Chapman et al., 2011). ADCIRC использует так называемое определение Garratt для коэффициента трения, верхний предел для которого равен 0,0035. Лёд в модели считается неподвижным и характеризует ледовитость.

В разделе 3.4 описано построение расчётной сетки. Для моделирования нагонов в Белом и Баренцевом морях с помощью программного обеспечения Surface Modeling System (SMS 11) фирмы Aquaveo (Resio and Westernik, 2008) создана нерегулярная триангуляционная сетка, включающая Белое море и часть Баренцева моря (от Кольского п-ва до северной оконечности арх. Новая Земля) (рисунок 3). Сетка создана методом «raving», то есть сетка построена в зависимости от количества точек на береговой линии (SMS, 2013). Данная сетка включает 12 715 расчётных узлов. Шаг сетки изменяется в зависимости от интересующего места изучения нагонов: минимальный шаг сетки составил 50 м, максимальный — 5 км. Расчётная сетка имеет две внешние жидкие границы: 1) полукруглая граница от Кольского полуострова (в районе Киркинеса) до м. Желания (арх. Новая Земля), 2) граница в проливе Югорский Шар. Полукруглая внешняя граница состоит из 36 узлов, на ней задаётся восемь гармонических постоянных. Открытая граница в Югорском проливе длиной 3,7 км имеет свойства нулевого потока и включает три расчётных узла. Для создания цифровой модели рельефа (рисунок 3) использовались морские навигационные

карты масштаба 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000. Минимальная глубина — 0 м, это береговая линия, максимальная — 400 м на западе Баренцева моря.

В **разделе 3.5** приводится технология проведения численных экспериментов. Шаг по времени численной модели ADCIRC составляет 2 с для расчётов на 1 год, два дня для разгона модели. Общее время расчёта модели составляет 364,5 дней, вывод данных начинается с 49 ч.

Для анализа формирования нагонов с помощью модели ADCIRC проводились следующие эксперименты: 1) расчёт, включающий прилив, поле ветра, атмосферного давления, льда по данным реанализа; 2) расчёт, включающий прилив и лёд; 3) расчёт, включающий прилив, поле ветра и концентрации льда по данным реанализа; 4) расчёт, включающий прилив, поле атмосферного давления и концентрации льда по данным реанализа. Для того, чтобы вычислить величину нагона из «1» задачи вычитается «2» задача, а «3» и «4» задачи, рассчитываются для оценки вклада атмосферного давления и ветра в формирование нагона.

С помощью совместной модели ADCIRC+SWAN проводились следующие эксперименты: 1) расчёт, включающий прилив, поле ветра, атмосферного давления, льда по данным реанализа; 2) расчёт, включающий прилив, поле ветра, атмосферного давления по данным реанализа; 3) «1» -й расчёт без SWAN. «1» и «3» задачи рассчитываются для оценки вклада ветрового волнения, а «2» — для концентрации льда. В SWAN расчёт 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 ч до максимальной фазы нагона и 24 ч после). Шаг по времени численной модели циркуляции ADCIRC составил 2 с, модели расчёта ветровых волн SWAN — 1200 с, 0,5 сут для разгона модели, вывод данных осуществляется с самого начала.

Верификация модели ADCIRC приведена в **разделе 3.6**. Для оценки качества модели использовались данные параметры (таблица № 1): ζ_{obsM} — максимальное отклонение высоты нагона (ВН) во время нагона по данным наблюдений; Z_{max} — максимальная отметка уровня моря по данным наблюдений за вычетом нуля поста с учётом прилива; ζ_{modM} — максимальное отклонение ВН во время нагона по данным моделирования; $\gamma = \zeta_{modM} / \zeta_{obsM}$ — отношение соответствующих максимальных ВН; σ_{modD} — среднеквадратическая ошибка (СКО) расчётов модели, то есть среднеквадратическая разность между ζ_{obs} и ζ_{mod} для декады во время нагона (где ζ_{obs} — отклонение ВН от среднего значения по данным наблюдений, ζ_{mod} — отклонение ВН от среднего значения по данным моделирования); σ_{month} — СКО для месяца; r_D и r_{month} коэффициенты корреляции между изменениями ζ_{obs} и ζ_{mod} для декады и месяца.

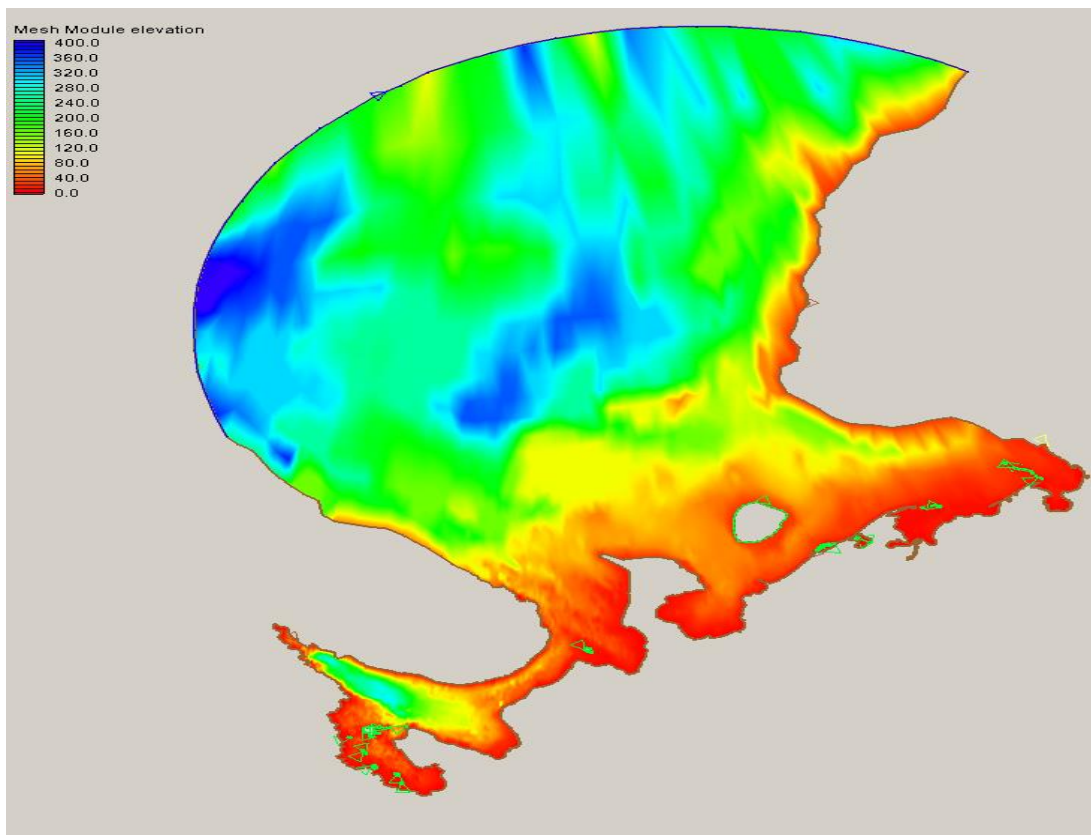
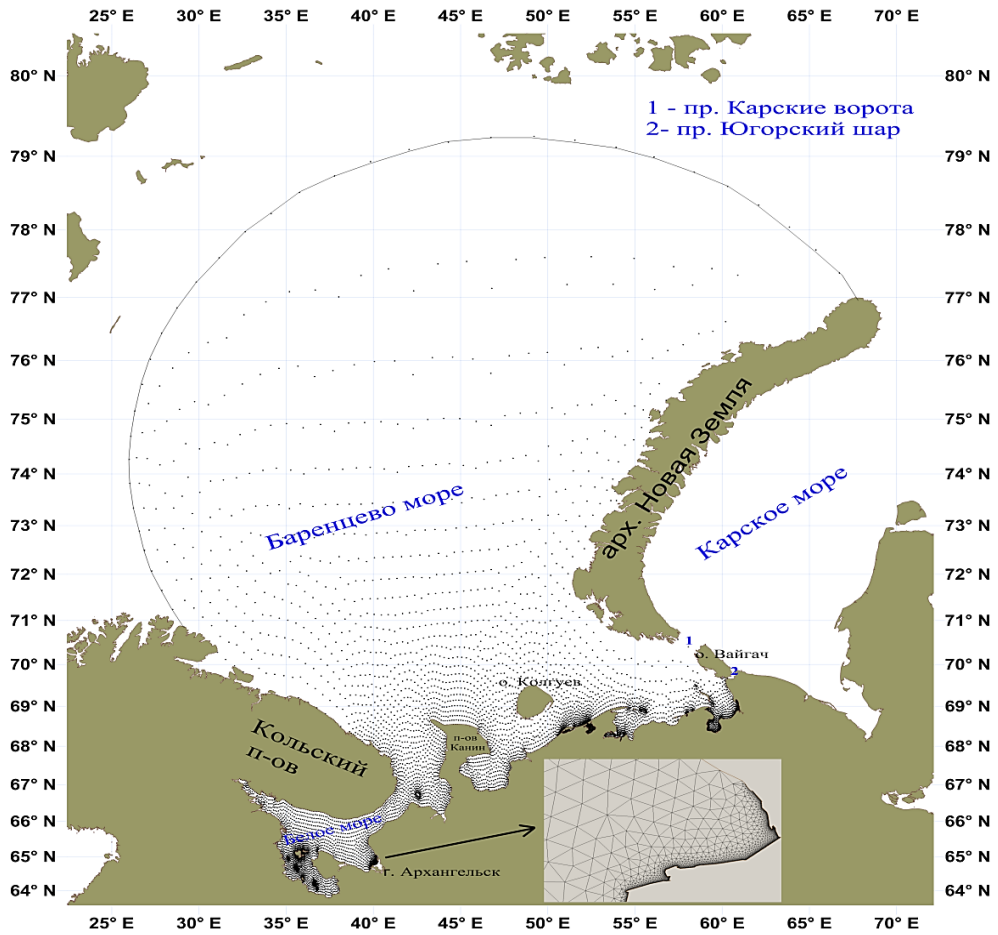


Рисунок 3. Нерегулярная расчётная триангуляционная сетка для исследования нагонов в Белом и Баренцевом морях. Точками обозначены узлы сетки (вверху). Цифровая модель рельефа, цветом показана глубина (внизу).

Таблица № 1. Сравнительная характеристика высоты нагона по данным наблюдений и модели ADCIRC (Korablina et al., 2017). Нуль постов равен минус 5,0 м.

Дата	Пункт	ζ_{obsM} , (см)	Z_{max} , (см)	ζ_{modM} , (см)	γ	$\frac{\sigma_{modD}}{\sigma_{month}}$, (см)	$\frac{r_D}{r_{month}}$
06.11.2010	Северодвинск	96	155	55	0,57	18 / 22	0,92 / 0,58
	Соловки	61	112	43	0,70	15 / 14	0,76 / 0,59
	Сосновец	54	248	54	1,0	16 / 17	0,62 / 0,53
15.11.2011	Северодвинск	154	201	108	0,70	21 / 24	0,97 / 0,85
	Соловки	112	153	90	0,80	14 / 21	0,95 / 0,78
29.11.2013	Северодвинск	81	116	62	0,76	20 / 17	0,87 / 0,73
	Соловки	56	97	50	0,89	14 / 15	0,77 / 0,64
	Сосновец	35	153	40	1,14	10 / 13	0,80 / 0,65
23.04.2014	Северодвинск	63	103	45	0,71	14 / 13	0,80 / 0,77
	Соловки	45	66	32	0,71	14 / 14	0,65 / 0,55
	Сосновец	64	145	40	0,62	14 / 18	0,78 / 0,51
07.05.2014	Северодвинск	76	98	67	0,88	9 / 16	0,95 / 0,71
	Соловки	55	57	60	1,09	9 / 14	0,92 / 0,71
	Сосновец	44	97	48	1,09	9 / 11	0,81 / 0,70

Анализ модельных и натуральных данных во время пяти нагонов, произошедших 7 мая и 23 — 24 апреля 2014 г., 29 ноября 2013 г., 15 ноября 2011 г. и 6 ноября 2010 г., показал, что модель ADCIRC вполне удовлетворительно отражает высоту нагонов (Korablina et al., 2017). Это подтверждают высокие значения коэффициента корреляции r_D для декадных временных рядов модельных и натуральных данных. Для станции Северодвинск r_D находится в диапазоне от 0,87 до 0,97, при СКО σ_{modD} от 0,09 м до 0,21 м (максимум при перепаде высот более 1,70 м 15 ноября 2011 г.); для станции Соловки $r_D = 0,65 \div 0,95$, при $\sigma_{modD} = 0,09 \text{ м} \div 0,15 \text{ м}$; для станции Сосновец $r_D = 0,62 \div 0,81$, при $\sigma_{modD} = 0,09 \text{ м} \div 0,16 \text{ м}$. Причём в мае 2014 г. величина СКО σ_{modD} оказалась минимальна на всех трёх станциях и составила 0,09 м, а коэффициент корреляции для декады изменялся от 0,81 (Сосновец) до 0,95 (Северодвинск). Коэффициент корреляции r_D , рассчитанный для декады, во всех трёх пунктах существенно выше, чем коэффициент r_{month} , рассчитанный для целого месяца. Это означает, что модель достаточно хорошо воспроизводит ВН именно во время самого нагона.

Данные модели ADCIRC занижают высоту нагона на станции Северодвинск, где $\gamma = 0,57 \div 0,88$, следовательно, модель нуждается в некотором уточнении параметров, в частности, скорости приземного ветра и ветрового волнения, которое здесь не учитывалось. Возможно, повышение точности модельных данных связано с необходимостью более тонко задавать геометрию береговой линии и батиметрию, а также с качеством данных реанализа CFSR.

Глава 4 посвящена изучению закономерностей формирования нагонов в Белом и Баренцевом морях. В **разделе 4.1** представлен анализ типов атмосферной циркуляции во время наибольших нагонов при помощи моделирования

конкретных случаев на основе классификации, приведенной в разделе 2.2. Для анализа атмосферной циркуляции во время нагонов за 37-летний период в Белом море были выбраны нагоны высотой более 0,5 м (107 случаев). В Белом море 47 % нагонов образуется после прохождения «ныряющих» циклонов и 33 % после прохождения западных циклонов. При этом в первом случае средняя высота нагона составляет 0,64 м, а во втором — в среднем на 2 см меньше по данным численного моделирования. В целом, при формировании нагона в Белом море не наблюдается выраженного характерного направления ветра, однако для образования нагона в конкретном месте важно учитывать скорость и направление местного ветра. Например, нагонный ветер для Двинской губы имеет направление от СЗ до северного.

Для анализа атмосферной циркуляции во время нагонов за 37-летний период в Баренцевом море выбраны нагоны высотой более 1,0 м (76 нагонов). Здесь нагоны образуются при господствующем западном направлении ветра. В целом, направление ветра изменяется от ЗЮЗ (265°) до западных румбов (278°) (таблица № 2), средняя скорость которого равна 15 — 16 м/с. Причём при западных циклонах ветер достигает наибольшей скорости в 23 м/с. А во время прохождения «ныряющего» циклона наблюдается как самое минимальное, так и самое максимальное атмосферное давление в центре циклона (966 и 1014 гПа соответственно). Схема движения циклонов, после которых здесь образуются нагоны, следующая. Циклоны начинают формироваться в районе архипелага Шпицберген или чуть южнее него. Затем они пересекают акваторию Баренцева моря. После этого циклоны разрушаются либо в центральной, либо в южной части Карского моря.

Таблица № 2. Характеристика нагонов в Белом и Баренцевом морях по данным численного моделирования в зависимости от траектории циклонов. Цифрами обозначено: 1 — количество нагонов (%), 2 — средняя высота нагона (м), 3 — среднее направление ветра (°) за шесть часов перед максимумом нагона.

<i>Траектории циклонов (Белое море)</i>	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
<i>Траектории циклонов (Баренцево море)</i>			
Аномальные	16	1,22	278
Западные	21	1,26	265
«Ныряющие»	63	1,23	276

В разделе 4.2 описана пространственно-временная изменчивость нагонов. С помощью модели ADCIRC нагоны с 1979 по 2015 года исследовались в следующих шести пунктах: Варандей (57,97° в. д., 68,80° с. ш.), Печорская (54,50° в. д., 68,60° с. ш.), Чёшская (47,59° в. д., 67,06° с. ш.) и Хайпудырская губы (59,86° в. д., 68,45° с. ш.) в Баренцевом море; Онежская губа (37,75° в. д., 63,95° с. ш.), Северодвинск (39,76° в. д., 64,62° с. ш.) и Соловки (35,67° в. д.,

65,01°с. ш.) в Белом море. В указанных точках выделены все нагоны высотой более 0,3 м за указанный период. Затем они были распределены по диапазонам высот 0,3 — 0,6 м, 0,6 — 0,9 м, 0,9 — 1,2 м и более 1,2 м. В Белом море доля нагонов высотой от 0,9 до 1,2 м составляет всего 1 %, а нагонов высотой более 1,2 м в Белом море по данным численного моделирования не зафиксировано. Наибольшее количество нагонов в Белом море отмечается в Онежской губе, где максимальная высота нагона фиксируется в диапазоне от 0,9 до 1,2 м. В Баренцевом море нагонов высотой более 1,2 м насчитывается уже 3 % от всех нагонов. Причём наибольшее количество нагонов возникает в Хайпудырской губе высотой более 1,2 м. Впрочем, здесь по всем диапазонам высот зафиксировано наибольшее количество нагонов.

Дана оценка вклада высоты нагона в общий уровень моря. По натурным данным вклад изменяется: от 61 до 78 % (Северодвинск), от 54 до 96 % (Соловки), от 22 до 45 % (Сосновец). По модельным данным этот вклад рассчитывался по модулю, поэтому есть случаи в диапазоне более 100 %, когда общий уровень мог быть отрицательным (нагон попадает на фазу отлива). Наибольшее количество нагонов в этом диапазоне (≥ 100) отмечается на всех станциях кроме станций Северодвинск, Онежская и Хайпудырская губы (вклад для станций в Белом море составляет 55 — 74 %, в Баренцевом — 75 — 99 %). На основании рассмотренных количественных характеристик нагонов и вклада высоты нагона в общий уровень моря по модельным данным можно допустить критические отметки величины нагона для конкретных станций, при которых по вышеописанной методике выделяется нагон. Так, для исследуемых пунктов критические отметки высоты нагона следующие: более 0,3 м (Соловки), более 0,5 м (Онежская губа и Северодвинск), более 0,7 м (Печорская губа), более 0,8 м (Чёшская губа) и более 1,0 м (Варандей и Хайпудырская губа).

В этом разделе проведён расчёт продолжительности нагонов относительно нулевого уровня и уровня без учёта приливных и высокочастотных колебаний, а затем анализ соотношения первой продолжительности ко второй. Выявлено, что чем меньше это отношение, тем продолжительнее и сильнее нагоны высотой более 0,3 м. Так, в Белом море это соотношение равно пяти (Онежская губа), а в Баренцевом — трём (Варандей и Хайпудырская губа).

Рассчитанная экстремальная высота нагона, возможная раз в сто лет, на основе данных, полученных с помощью модели ADCIRC, имеет следующие значения: 1,2 м (Соловки), 1,6 м (Северодвинск), 1,9 м (Онежская губа); 2,3 м (Чёшская и Печорская губы), 3,7 м (Варандей), 4,9 м (Хайпудырская губа).

По шести пунктам, описанным выше, нагоны высотой более 0,3 м распределены по сезонам: зима (декабрь, январь, февраль и так далее), весна, лето и осень, а также в процентах по месяцам. В Белом море наибольшее количество нагонов возникает в осенне-зимний период: 33 % — осенью (наибольшее количество в октябре; в Онежской губе — в ноябре), 31 % — зимой (февраль). На весенний период попадает также значительное количество нагонов — 25 %. В летний период количество нагонов наименьшее — 11 % (наименьшее количество в июле). В Баренцевом море нагоны по сезонам распределяются следующим образом: 30 % (осень), 27 % (весна), 25 % (зима) и 18 % (лето). Причём Чёшская губа — это переходная зона между Белым и Баренцевым морем по ха-

рактору сезонного распределения нагонов. Такая сезонная изменчивость связана с усилением циклонической деятельности на арктическом фронте, который в холодное время года усиливается и смещается к югу, проходя над средней по широте частью Баренцева моря.

По полученным модельным данным межгодовой изменчивости (рисунок 4) количества нагонов за 37-летний период проведён дисперсионный анализ линейных трендов, показавший статистическую значимость линейной регрессии лишь на станции в Соловках. Сравнение и поиск значимой зависимости изменчивости количества нагонов и их высоты с индексом североатлантической осцилляции (NAO) показал отрицательный результат. В целом, индекс NAO не является мерой повторяемости штормовых ветров над Белым и Баренцевым морями.

Раздел 4.3 посвящён результатам оценки вклада ветрового воздействия, атмосферного давления, ветрового волнения и концентрации льда. Анализ вклада ветра и атмосферного давления в формирование нагона показал следующее. Значительное количество нагонов образуется под действием ветрового напряжения (вклад $> 75\%$) на всех станциях кроме Северодвинска, Чёшской губы и Печорской губы, где вклад ветра составляет 55 — 75 % (рисунок 7). При этом в Баренцевом море наибольшая средняя высота (0,70 м) наблюдается в Хайпудырской губе (диапазон вклада ветра 55 — 75 %).

В Белом море, в Северодвинске и Онежской губе, зафиксирована наибольшая средняя высота (0,6 и 0,8 м (!) соответственно) при воздействии атмосферного давления более 75 %. Последние нагоны определяются расчётами и методикой выделения высоты нагона. В природе этих нагонов не наблюдалось, так как они попадали на фазу отлива. Эти девять случаев показали, что при прочих равных условиях только атмосферное давление (вклад более 75 %) в Белом море может формировать нагоны наибольшей высоты. Однако нагонов, возникающих вследствие действия только атмосферного давления, в разы меньше: 3 % от общего количества (Соловки), 6 %, (Онежская губа), 8 % (Северодвинск), 9 % (Варандей и Хайпудырская губа), 10 % (Чёшская губа), 11 % (Печорская губа).

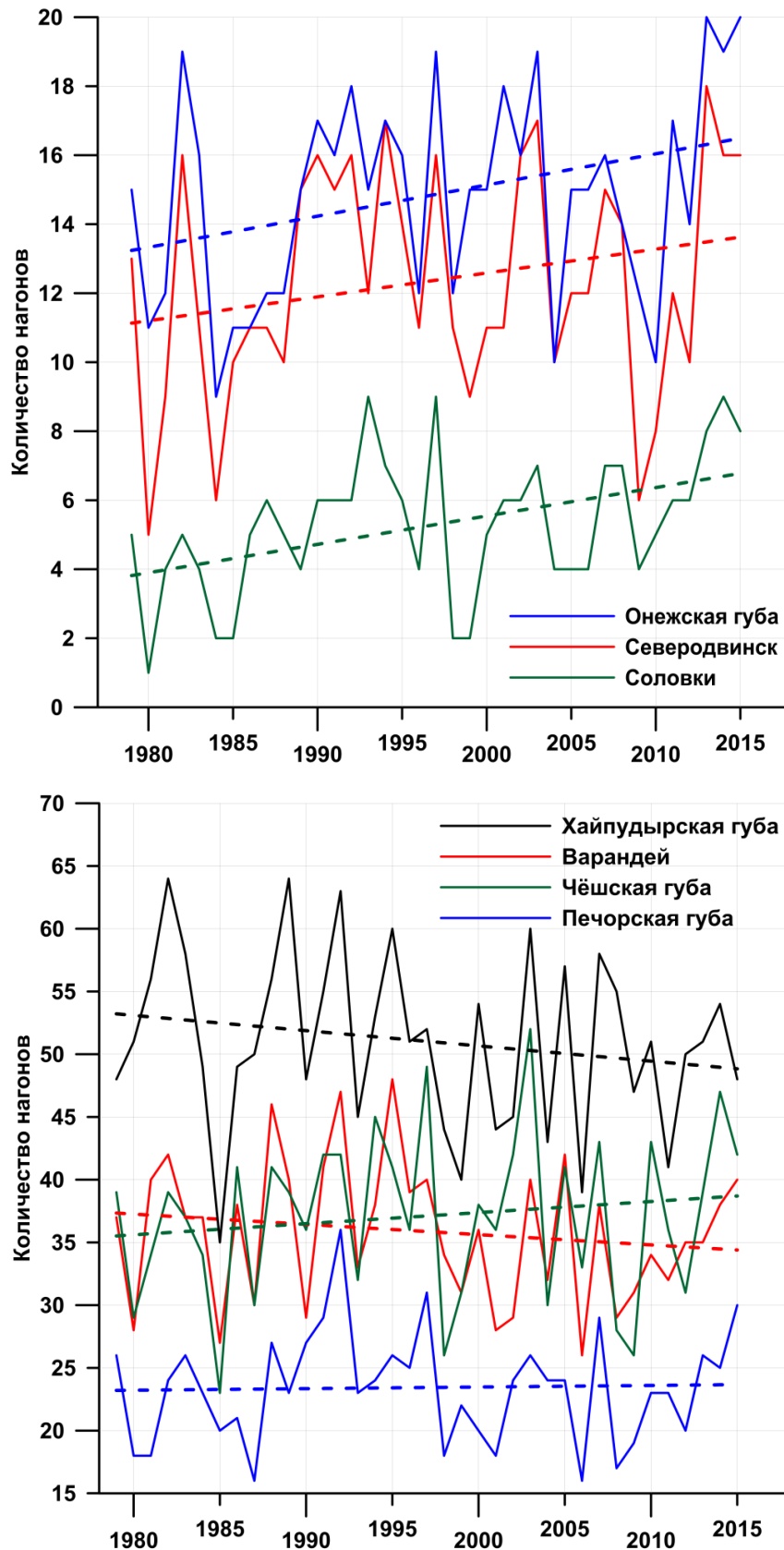


Рисунок 4. Многолетняя изменчивость количества нагонов высотой более 0,3 м в Белом море (вверху) и в Баренцевом море (внизу) (пунктир — линейный тренд) по данным численного моделирования в период с 1979 по 2015 года.

Оценки вклада ветрового волнения и льда (для зимних месяцев) проводились для нагонов в Варандее, Печорской и Хайпудырской губ (таблица № 3). Вклад ветрового волнения в уровень моря может составлять до 5 % (до 10 см), а отсутствие вклада концентрации ледового покрова в зимние месяцы повышает уровень на 2 — 5 % (до 8 см). Однако такого количества расчётов недостаточно для полной оценки воздействия ветрового волнения и ледового покрова на уровень моря. Данные ветрового волнения в Белом море показывают, что сильное ветровое волнение не достигает побережья Двинской и Онежской губ (Архипкин и др., 2015). А на приливной осушке там, где расположены наши опорные станции, находится подвижный припай, испытывающий наибольшие деформации. Подвижный припай характеризуется наличием большого количества трещин различных направлений и протяжённости. От так называемого неподвижного припая он отделяется приливными трещинами, которые параллельны побережью. Установлено, что во время нагона подвижный припай отрывается от берега, что часто наблюдается в Белом море, и на других побережьях приливных морей Северного Ледовитого океана (Романенко и др., 2013). Поэтому расчёты оценки вклада ветрового волнения и ледового покрова в формирование нагонов в Белом море различаются только на уровне систематической ошибки или менее её.

Таблица № 3. Данные уровня моря (м), рассчитанные с помощью ADCIRC и ADCIRC+SWAN для оценки вклада ветрового волнения и ледового покрова в формирование нагона на станциях Варандей, Печорская губа, Хайпудырская губа во время нагонов.

Дата, время (BCB)	ADCIRC (без SWAN), (уровень, м)	ADCIRC+SWAN, (уровень, м)	ADCIRC+SWAN безо льда, (уровень, м)
<i>Варандей</i>			
27.01.2010, 06:00	2,13	2,15	2,23
25.04.2010, 19:00	1,77	1,78	1,79
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
<i>Печорская губа</i>			
27.01.2010, 12:00	1,02	1,04	1,11
25.04.2010, 23:00	1,24	1,25	1,27
24.07.2010, 09:00	1,73	1,87	
17.08.2010, 03:00	1,39	1,48	
18.11.2010, 20:00	1,30	1,38	
3.12.2010, 09:00	1,16	1,20	
<i>Хайпудырская губа</i>			
27.01.2010, 12:00	2,30	2,31	2,36
26.04.2010, 02:00	1,90	1,90	1,90
24.07.2010, 11:00	4,04	4,11	
17.08.2010, 06:00	1,99	2,02	
18.11.2010, 20:00	2,24	2,25	

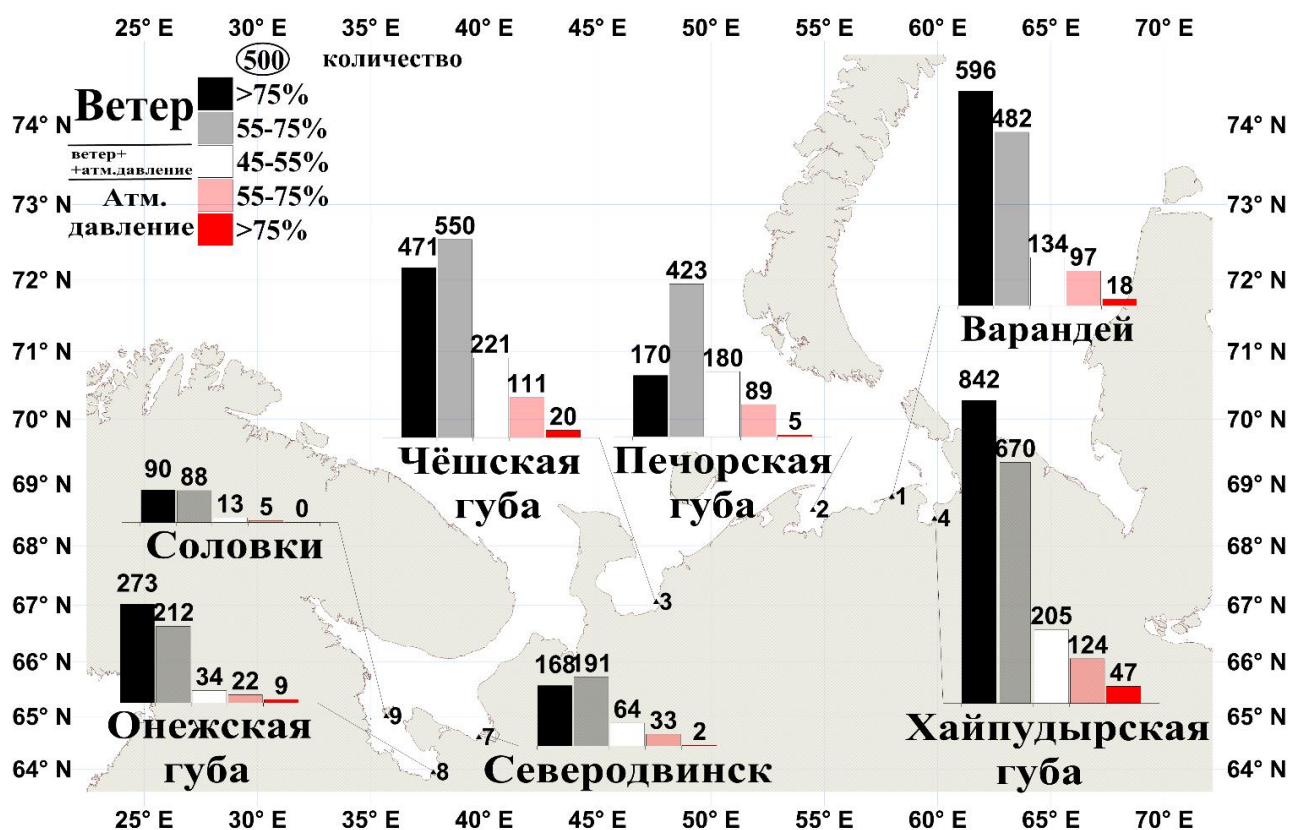


Рисунок 7. Количество нагонов высотой более 0,3 м в зависимости от вклада ветра (55 — 75 % и более 75 %), атмосферного давления (55 — 75 % и более 75 %) и их совместного воздействия в диапазоне от 45 до 55 % в формирование высоты нагона в Белом и Баренцевом морях по данным моделирования в период с 1979 по 2015 года.

В заключении сформулированы следующие основные **выводы**.

1. Верификация модели ADCIRC и совместной модели ADCIRC+SWAN, реализованная на оригинальной нерегулярной (unstructured) расчётной сетке, охватывающей Белое и Баренцево моря, с минимальным шагом 50 м в прибрежной зоне, показала, что колебания уровня в изучаемых бассейнах, рассчитанные с помощью модели ADCIRC, достоверно описывают наблюдаемые изменения уровня в пространстве и во времени.

2. Разработанная методика выделения нагонов при помощи исключения приливных и длиннопериодных колебаний (период более 35 — 40 сут) из общего уровня моря позволила рассчитать статистические характеристики нагонов за продолжительный период с 1979 по 2015 гг. в исследуемой акватории.

3. Большинство нагонов образуется под действием ветрового напряжения после прохождения «ныряющих» циклонов: 1) в Баренцевом море с преобладающим западным направлением; 2) в Белом море нужно учитывать взаимодействие нагонной баренцевоморской волны с направлением местного ветра в Бассейне, а также здесь в 1 % случаев наибольшая средняя высота нагона (до 0,8 м) формируется исключительно под воздействием атмосферного давления. В отдельных случаях: 1) в Баренцевом море вклад ветрового волнения составляет до 5 % (до 10 см), а отсутствие ледового покрова повышает уровень до

2 — 5 % (до 8 см); 2) в Белом море вклад ветрового волнения и ледового покрова незначителен в виду особенностей ветрового климата и подвижного припая на побережье.

4. В Белом и Баренцевом морях сезонная изменчивость количества нагонов определяется характером циклонической деятельности на арктическом фронте с наибольшим и наименьшим количеством нагонов в октябре и июле соответственно, за исключением Чёшской губы, являющейся переходной зоной между Белым и Баренцевым морями, ввиду отсутствия второго явного пика с наибольшим количеством нагонов. В период с 1979 по 2015 гг. межгодовая изменчивость формирования нагонов не имеет значимых линейных трендов, а её связь с индексом североатлантической осцилляции не обнаружена.

5. За 37 лет в Белом море на нагоны высотой 0,90 — 1,20 м приходится 1 % от их общего количества; в Баренцевом море — 6 %, а на нагоны высотой более 1,20 м — 3 %. Наибольшее количество нагонов образуется в Хайпудырской губе (Баренцево море) и Онежской губе (Белое море), причём наибольшая рассчитанная высота нагона здесь составила 2,39 и 1,19 м соответственно.

6. В Баренцевом море нагоны продолжительнее, чем в Белом море. Наибольшая суммарная продолжительность нагона без учёта прилива и высокочастотных колебаний составляет 55 сут в Хайпудырской губе за 1992 год и 22,2 сут в Онежской губе за 2015 год. Наибольшая рассчитанная продолжительность нагона без учёта приливных и высокочастотных колебаний зафиксирована 15 — 20 декабря 2001 года в Варандее и составляет 6 сут и 12 — 15 мая 2000 года в Онежской губе — 4,6 дня.

7. Вклад высоты нагона в общий уровень моря составляет более 55 %. После анализа количества нагонов и их высоты, предлагаются следующие критические отметки высоты для выделения нагона как океанологического события: для станции Соловки более 0,30 м, для Онежской губы и Северодвинска более 0,50 м, для Печорской губы более 0,70 м, для Чёшской губы более 0,80 м, для Варандея и Хайпудырской губы более 1,0 м.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определённых п. 2.3. Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Кораблина А.Д.**, Архипкин В.С., Самборский Т.В. Особенности формирования штормовых нагонов в динамической системе Белое море — устьевая область р. Северная Двина // Вест. Моск. Ун. Сер. 5: География. — 2016. — № 1. — С. 78–86.

2. **Кораблина А.Д.**, Кондрин А.Т., Архипкин В.С. Моделирование нагонов в Белом и Баренцевом морях за период 1979-2015 гг. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2017. — № 364. — С. 144–158.

3. Arkhipkin V., **Korablina A.**, Myslenkov S., Kondrin A. The White and Barents seas surges modelling for period 1979 - 2015 // Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 17, 31 Oct -04 Nov 2017, Mellieha, Malta, E. Ozhan (Editor). — Vol. 2 of ISBN 978-605-85652-8-9. — MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation Dalyan, Mugla, Turkey, 2017. — P. 1131–1142.

4. **Korablina A.D.**, Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. Numerical simulations and statistics of surges in the White and Barents Seas // Russian Journal of Earth Sciences. — 2017. — 17, ES4004. — PP.1-11. doi:10.2205/2017ES000608.

Публикации в рецензируемых сборниках

5. Архипкин В. С., Добролюбов С. А., Мысленков С. А., **Кораблина А. Д.** Волновой климат Белого моря // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики / Под ред. С. А. Сократов. — Т. 1. — Лига-Вент, Москва, 2015. — С. 48–58.

6. **Korablina A.**, Arkhipkin V., Dobrolyubov S., Myslenkov S. Modeling storm surges and wave climate in the white and Barents seas // Proceedings of International Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" (EMECs'11 - SeaCoasts XXVI, St. Petersburg, 22-27.08.2016). — RIOR Publ Moscow, 2016.

12 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях