

УДК 551.465

ВНУТРЕННИЙ ПРИЛИВ В ПРОЛИВЕ КАРСКИЕ ВОРОТА© 2017 г. Е. Г. Морозов¹, И. Е. Козлов^{2,3}, С. А. Шука¹, Д. И. Фрей¹¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия³ Университет Клайпеды, Литва

e-mail: egmorozov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.2016 г.

В проливе Карские ворота наблюдаются интенсивные внутренние приливы, которые накладываются на систему среднего течения, направленного из Баренцева моря в Карское. Измерения внутренних волн в проливе проводились в 1997, 2007 и 2015 гг. В статье анализируются данные измерений буксируемым STD-зондом, выполненных в сканирующем режиме, спутниковые изображения 2015 г., а также расчеты генерации и распространения внутренних волн по численной модели. Показано, что внутренний прилив с периодом 12.4 ч генерируется за счет взаимодействия течений баротропного прилива с поперечным хребтом, который соединяет Новую Землю и континент через пролив Карские Ворота. Гребень хребта расположен на глубинах 30–40 м. Внутренний прилив распространяется в обоих направлениях от хребта. В Баренцевом море внутренние волны усиливаются за счет того, что они распространяются против течения, направленного в Карское море. При этом образуется внутренний бор, за которым следует пакет короткопериодных внутренних волн. Спутниковые снимки также показывают присутствие внутренних волн, распространяющихся в обе стороны от хребта, а также детальную структуру короткопериодных волн в проливе. По данным буксируемого зонда и численного моделирования, в восточной части пролива образуется гидравлический скачок. Результаты численного моделирования распространения внутреннего прилива согласуются с экспериментальными измерениями.

DOI: 10.7868/S0030157417010105

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении почти 20 лет Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводит систематические исследования внутренних волн в проливе Карские Ворота. Эти исследования были начаты в 1997 г. В этот год в проливе было установлено три буя [7, 15] и выполнена гидрологическая съемка. Исследования были продолжены в 2007 г. Через пролив был сделан разрез буксируемым STD-зондом в сканирующем режиме [14]. В 2015 г. вдоль и поперек пролива были продолжены измерения STD-зондом в сканирующем режиме. Схема исследований в разные годы показана на рис. 1.

Пролив Карские Ворота перекрыт подводным хребтом, гребень которого доходит до глубин 35–40 м. По обе стороны от хребта имеется крутой свал глубин до 200 м и более. Эти данные рельефа получены во время нескольких пересечений пролива и постановок в нем буев. Измеренные данные резко отличаются от цифровых массивов [19]. Согласно карте глубин, которые можно построить по данным [43] Интернета (http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi; <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>), глубины вокруг пролива близки к 50 м и не превышают 100 м.

Этот массив данных батиметрии не соответствует действительности и может вносить ошибки в модельные расчеты.

Известно [10], что среднее течение в Карских Воротах направлено из Баренцева моря в Карское. По наблюдениям на буях в 1997 г., скорость течения в ядре находится в пределах от 6 до 26 см/с, а максимальная скорость достигает 50 см/с. В 1997 г. в проливе по данным измерений на буях был обнаружен возвратный поток донных вод, аналогичный нижнему течению в Гибралтарском проливе. Измеренные средние скорости равнялись 11 см/с (максимальная скорость — до 43 см/с) на горизонте 215 м при глубине океана 230 м в юго-восточной части пролива. Существует слабое поверхностное течение из Карского моря вокруг юго-восточной оконечности Новой Земли, которое порождает течение Литке вдоль западного берега архипелага [13]. Оба возвратных потока значительно слабее потока в Карское море.

В работе [10] авторы пишут, что поток теплой воды из Баренцева моря в Карское усиливается зимой. Максимальный расход достигает 0.65 Св. Летом преобладают северные ветры и уменьшают этот поток. По их данным, средний поток за год равен 0.3 Св. В работе [18] авторы анализировали

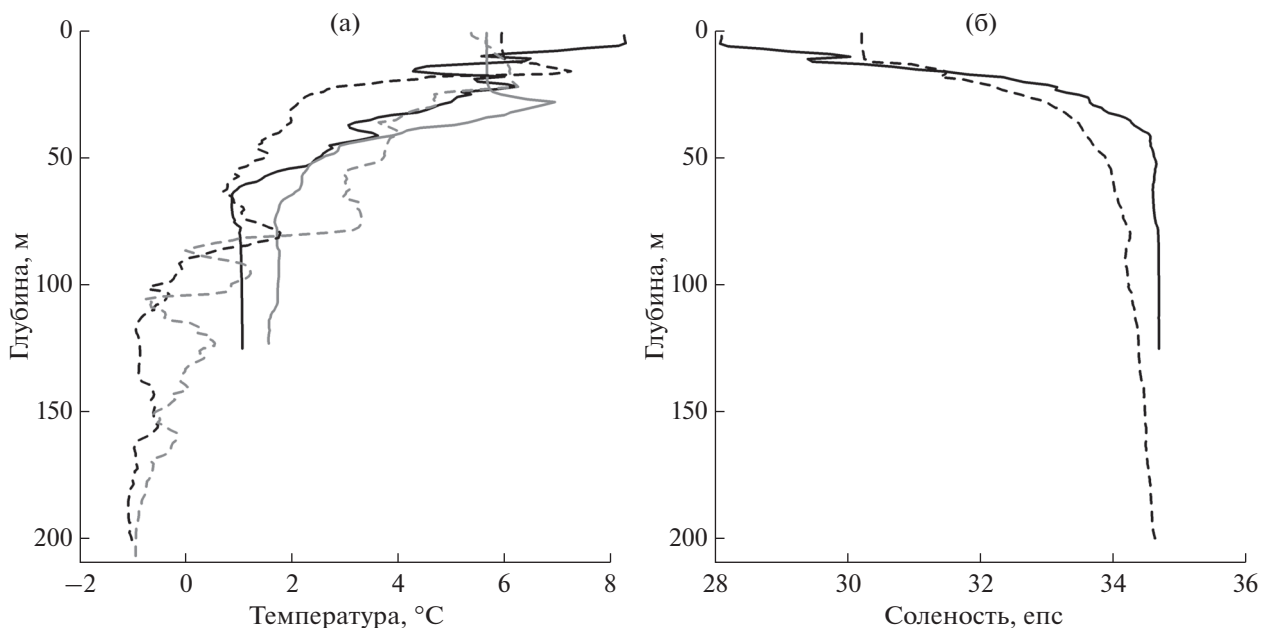


Рис. 1. Профили температуры (а) и солёности (б) в районе пролива Карские Ворота. Станция 5196-1 (Баренцево море) — черная сплошная линия, станция 5197-1 (Карское море) — серая сплошная линия, станция 5196-2 (Баренцево море) — черная штриховая линия, станция 5197-2 (Карское море) — серая штриховая линия.

измерения внутренних волн в Карском море и показали, что внутренние волны наблюдались только летом, когда имелась стратификация.

Амплитуда скорости течения баротропного прилива, по расчетам на основании спутниковых альтиметрических данных, равна 9 см/с [15]. Хорошее совпадение с динамикой течений и приливов в Карских воротах дает моделирование [15].

По данным предыдущих исследований [7, 14, 15], можно дать следующую характеристику внутренних приливных волн в проливе Карские Ворота. Амплитуды внутреннего прилива в районе пролива экстремально велики, и, по данным измерений на буйах, в периоды сизигии частицы воды могут совершать вертикальные движения с размахом до 70 м. Механизм генерации внутреннего прилива в проливе аналогичен механизмам в любых проливах. Большая схожесть с динамикой волн пролива обнаруживается с Гибралтарским и Баб-эль-Мандебским проливами [6, 15, 16]. Взаимодействие с течениями усиливает колебания.

В 2007 г. в проливе были проведены измерения буксируемым STD-зондом IDRONAUT 316 в режиме сканирования [14]. В этой же работе было показано, что результаты измерений были в согласии с расчетами внутренних волн по численной модели. Кроме того, при распространении внутреннего прилива на запад в Баренцево море против основного потока течения внутренний прилив усиливается и интенсивные волны разрушаются, генерируя высокочастотные внутренние волны. Поверхностные проявления этих волн

были зафиксированы радиолокационными наблюдениями.

В 2015 г. измерения буксируемым зондом были повторены и расширены. Цель данной работы — дать анализ новым результатам совместно со спутниковыми наблюдениями проявлений внутренних волн на поверхности и численным моделированием.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ФОН ВО ВРЕМЯ РАБОТ

Для определения гидрологического фона во время выполнения исследований в 2015 г. в 63-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” были выполнены четыре STD-зондирования прибором SBE-911 по обе стороны от пролива. Данные о станциях приведены в таблице. Графики температуры и солёности приведены на рис. 1. Температура воды на стороне Карского моря, в целом, ниже, чем на стороне Баренцева моря, особенно в глубоководной части. За 38 дней, которые прошли между измерениями, наблюдалось выхолаживание верхнего слоя до 20–30 м, особенно со стороны Баренцева моря. В верхнем слое Баренцева моря заметно распреснение воды, по всей видимости, за счет стока Печоры и переноса распресненных вод течением верхнего слоя. В Карском море в глубинных слоях обнаружена более пресная вода, чем в Баренцевом море. Это можно объяснить большим выносом пресных вод из Оби и Енисея, ветровым перемешиванием летом и конвективным перемешиванием при замерзании моря зимой.

Станции STD-зондирования в проливе

№ станции; дата	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, м
5196-1; 28.08.2015	70°12.2′	057°34.0′	128
5197-1; 29.08.2015	70°53.3′	059°01.0′	209
5197-2; 06.10.2015	70°53.2′	059°00.9′	205
5196-2; 07.10.2015	70°12.3′	057°34.2′	125

При изучении приливов и внутренних приливных волн важно знать фазы Луны. Полнолуние наблюдалось 29 августа и 28 сентября, последняя четверть – 5 октября, новолуние – 13 сентября. Лунное затмение было 28 сентября, а солнечное затмение – 13 сентября в полярных районах Южного полушария. Таким образом, первый этап работ проходил во время сизигийного прилива, а второй практически пришелся на квадратурный прилив. Эллипсы приливов M2 и S2 на даты выполнения разрезов через пролив рассчитаны с помощью усвоения данных спутниковой альтиметрии с использованием алгоритма OTPS орегонского университета (<http://volkov.oce.orst.edu/tides/otps.html>) [9]. Эллипсы изображены на рис. 2. Заметно увеличение скоростей во время сизигийных приливов и вытянутость эллипсов вдоль пролива. Скорости прилива в проливе, превосходящие 10 см/с, значительно больше обычных 1–2 см/с, поэтому в проливе происходит сильная генерация внутреннего прилива.

ИЗМЕРЕНИЯ БУКСИРУЕМЫМ ТЕРМОСОЛЕЗОНДОМ

В проливе были проведены измерения буксируемым STD-зондом в сканирующем режиме. Первый этап работ проводился 28–29 августа, второй – 6–7 октября 2015 г. Измерения выполнялись буксируемым прибором на базе зонда Idronaut 320 plus, установленного в хорошо обтекаемой и динамически стабилизированной конструкции. Частота измерений составляла 27 циклов в секунду. Сканирующий режим обеспечивался непрерывным изменением глубины погружения прибора. Во время движения прибор периодически опускался и поднимался лебедкой со скоростью около 1 м/с от глубины 1–2 м под поверхностью до глубины 1 м до дна. Каждый цикл продолжался около 5 минут в зависимости от глубины. Горизонтальное разрешение измерений (выходы прибора к поверхности) составляло несколько сот метров в зависимости от глубины моря. Данные о глубине моря выводились с параметрического эхолота-профилографа Knudsen Chirp 3212.

Во время исследований в проливе было выполнено несколько галсов измерений в различных направлениях вдоль пролива из Баренцева в

Карское море и назад, а также галс поперек пролива. Измерения 28–29 августа проводились от точки 70°12′ с.ш., 57°34′ в.д. до 70°45′ с.ш., 58°39′ в.д. Был выполнен поперечный галс от точки 70°21′ с.ш., 58°23′ в.д. до 70°24′ с.ш., 57°41′ в.д. Галс из Карского моря в Баренцево море был выполнен 6–7 октября от точки 70°45′ с.ш., 58°39′ в.д. до 70°12′ с.ш., 57°34′ в.д. Схема галсов показана на рис. 3.

АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ

Мы выполнили оценку длины полусуточной внутренней волны интегрированием уравнения для внутренних волн. При расчетах мы полагали, что дно океана плоское вдали от района генерации волн на хребте в проливе и что вдали от склона отсутствуют силы генерации. Длину волны можно оценить численным интегрированием

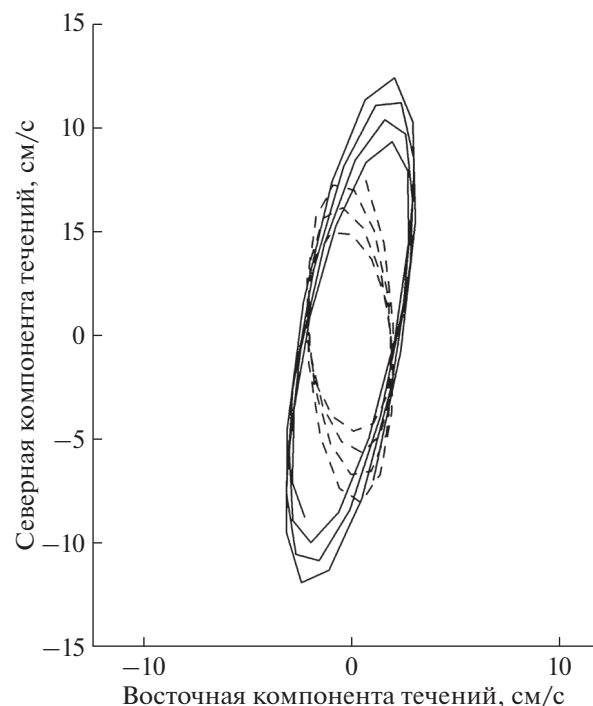


Рис. 2. Эллипсы приливов M2 и S2 на 28–29 августа (жирная линия) и 6–7 октября 2015 г. (штриховая линия). Расчет по спутниковой альтиметрии с дискретностью 1 час.

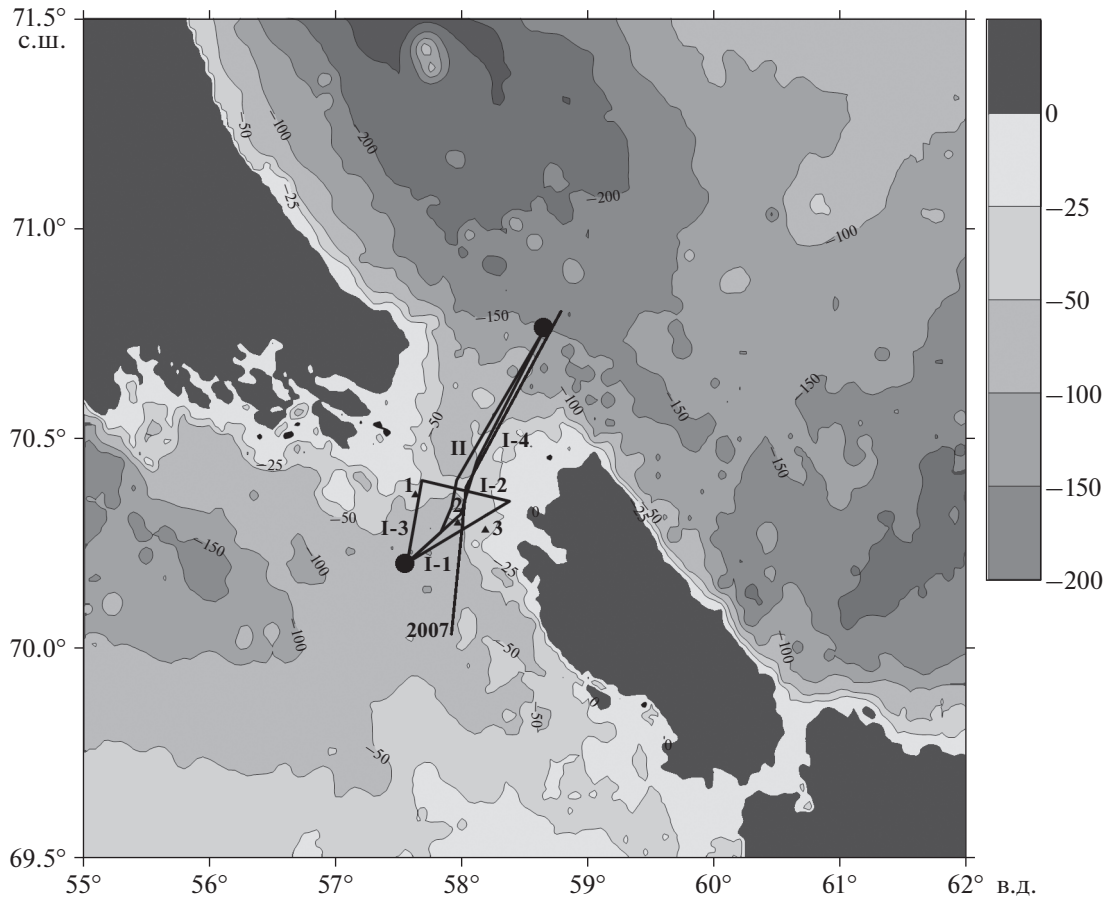


Рис. 3. Батиметрическая карта района исследований в проливе Карские Ворота по массиву данных [19] (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>), резко отличающаяся от реальной батиметрии непосредственно около пролива. Показаны галсы разрезов сканирующим зондом в направлении в Карское море: I-1, I-2 (поперечный), I-3, и I-4 (вдоль пролива), обратный галс (II), галс 2007 г., точки STD-зондирования (черные точки), и точки постановок буев в 1997 г. (треугольники 1, 2, 3).

уравнения для вертикальной скорости (w) во внутренней волне:

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{N^2(z) dw}{g dz} + \frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f^2} w k^2 = 0, \quad (1)$$

где $N(z)$ – частота Вайсяля-Брента, рассчитанная по STD-данным к западу и востоку от пролива; ω – полусуточная частота, f – параметр Кориолиса, а k – горизонтальное волновое число. Для этой задачи (на собственные значения с переменной по глубине частотой плавучести) граничными условиями для вертикальной скорости являются нули вертикальной скорости на поверхности и дне. Уравнение интегрировалось с шагом по вертикали 10 метров. В результате интегрирования получались волновые числа для различных мод и соответствующие фазовые скорости мод внутренней волны. Первая мода не имеет нулей по глубине (только нулевые скорости на поверхности и дне). Условия модели требуют ровного дна. При расчетах мы полагали, что средняя глу-

бина вдали от пролива со стороны Баренцева моря равна 120 м, а со стороны Карского моря – 160 м. Эти глубины близки к средним на разрезах (рис. 4, 5). Расчетная величина длины полусуточной внутренней волны оказалась равной 23 000 м. Расчет выполнен при нулевой средней скорости течений.

По результатам нашего зондирования в сканирующем режиме построены разрезы температуры, солености и плотности вдоль и поперек пролива (рис. 4–6). На разрезах вдоль пролива видны колебания температуры и солености, вызванные внутренней приливной волной, распространяющейся в Баренцево море (Баренцево море на рис. 4 и 5 расположено слева). На стороне Карского моря обнаружен гидравлический скачок: заглупление изотермических и изопикнических поверхностей до 100 м. В западной части разреза, который располагался в Баренцевом море, видны характерные колебания изотермических поверхностей, соответствующих длинам волн. Внутренний прилив лучше всего различим по колебаниям

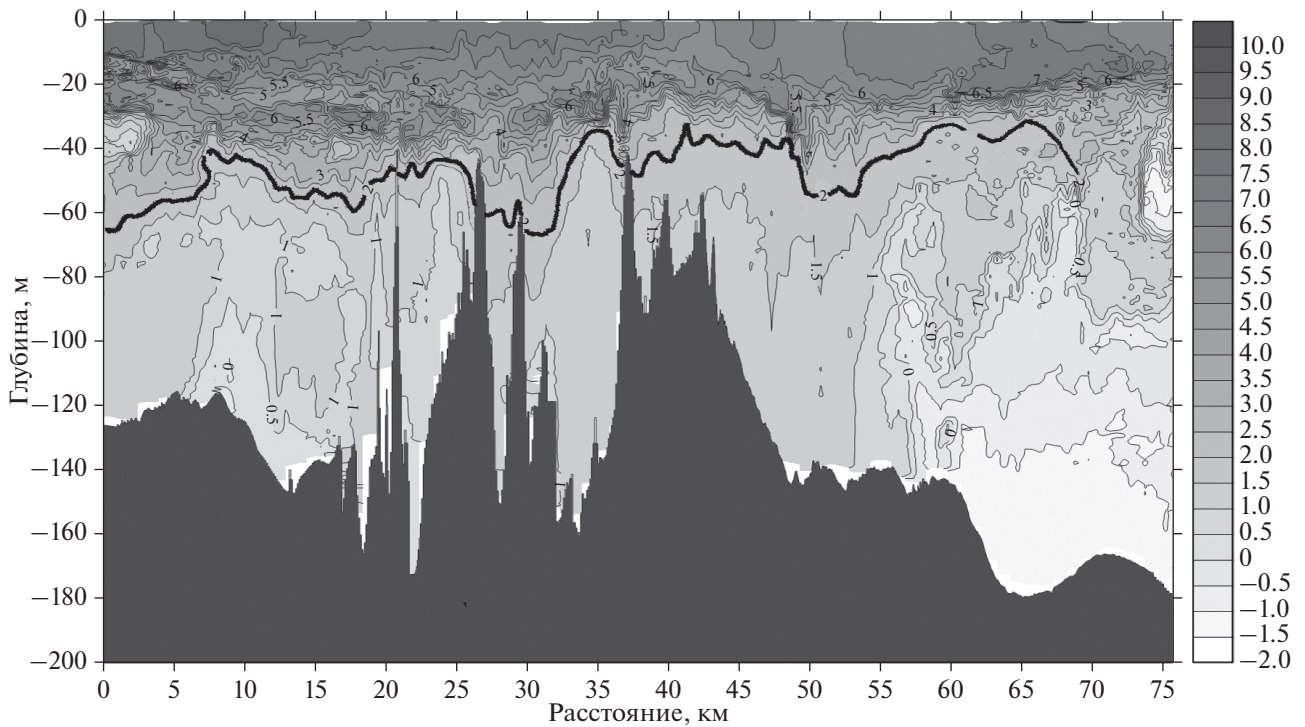


Рис. 4. Распределение температуры на разрезе буксируемым зондом вдоль пролива при движении из Баренцева моря в Карское. Изолинии температуры проведены с интервалом 0.5°C. Профиль дна показан темно-серым цветом. Изотерма 2°C выделена жирной линией.

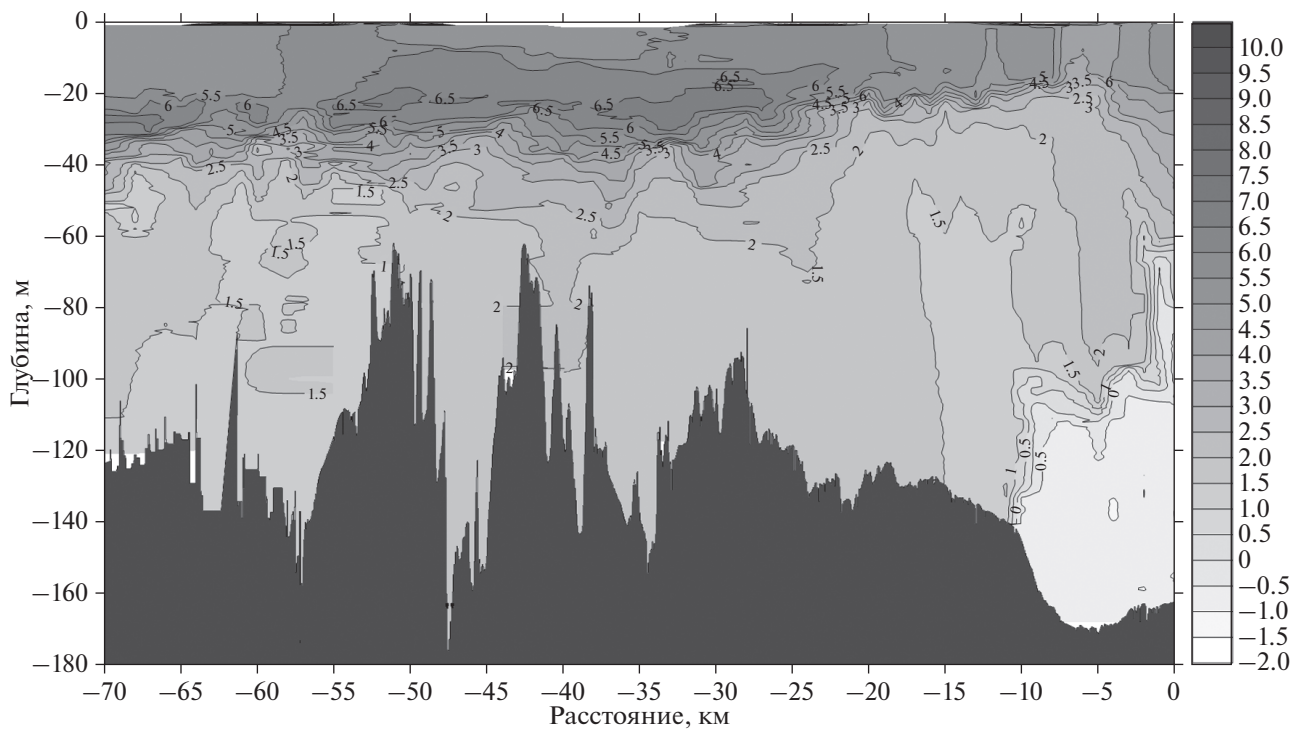


Рис. 5. Распределение температуры на разрезе буксируемым зондом вдоль пролива при движении из Карского моря в Баренцево. Изолинии температуры проведены с интервалом 0.5°C. Профиль дна показан серым цветом.

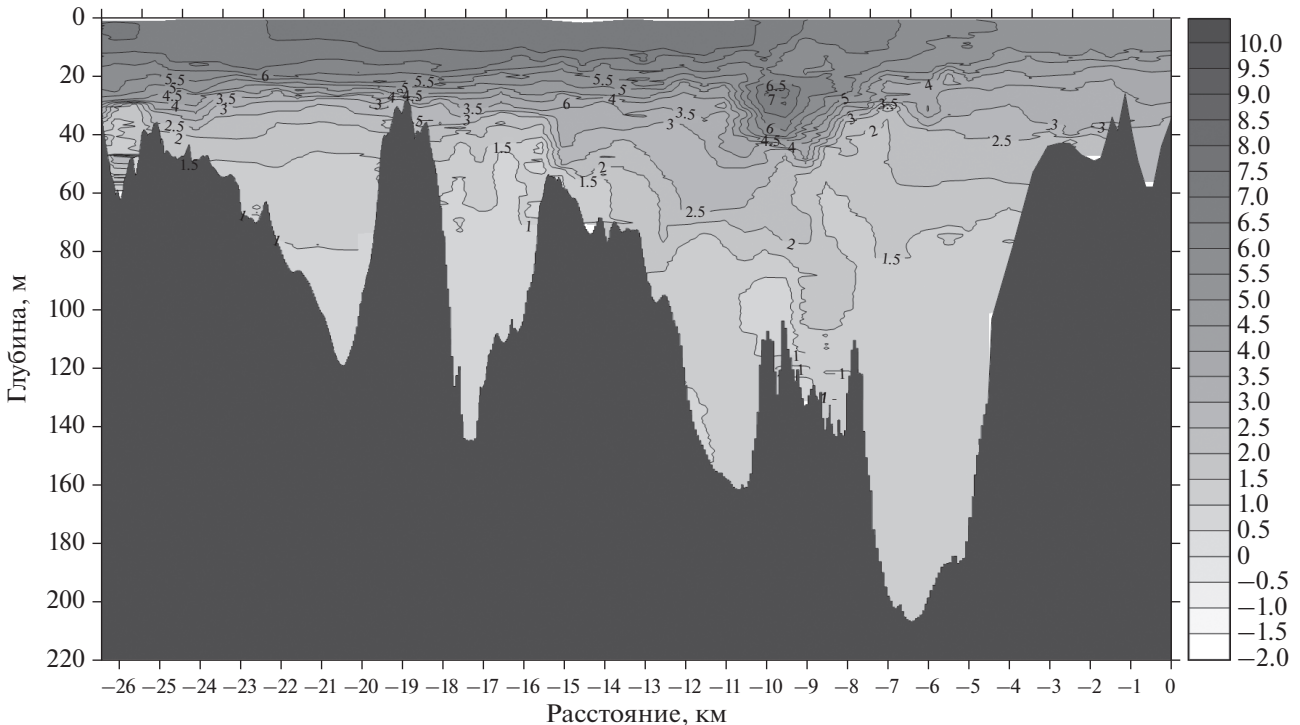


Рис. 6. Распределение температуры на разрезе буксирным зондом поперек пролива. Изолинии температуры проведены с интервалом 0.5°C . Профиль дна показан серым цветом.

изотерм $1.0\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$. По расстояниям между максимальными заглужениями изотерм на разрезах ближайшая к хребту волна имеет длину около 12 км, следующая — 15 км, а третья волна около — 18 км. В восточной части разреза наблюдается заглужение изотерм до 100 м (изотерма 1.5°C), что является гидравлическим скачком вследствие обтекания хребта средним течением из Баренцева моря.

Разрез выполнялся с юго-запада на северо-восток (рис. 3). На стороне Баренцева моря судно двигалось навстречу распространяющейся волне, что должно приводить к сокращению длины волны. Скорость судна U равнялась 6 узлам, то есть 3 м/с. Для длины волны $L = 23000$ м фазовая скорость c волны близка к 0.5 м/с. Согласно эффекту Доплера, при движении судна навстречу волне кажущаяся длина волны уменьшается и увеличивается, если волна при движении судна попутная. Поэтому длина волны в Баренцевом и Карском морях будет различаться при движении судна в одном направлении.

Измеряемый кажущийся период полусуточной волны T_D будет равен

$$T_D = L / (c + U),$$

а длина волны, измененная эффектом Доплера, окажется равна

$$L_D = UT_D = \frac{LU}{c \pm U} = \frac{23000 \text{ м} \times 3 \text{ м/с}}{3.4 \text{ м/с}} = 20294 \text{ м},$$

что близко к наблюдаемой величине. В знаменателе использован знак плюс, поскольку волна распространяется навстречу движения судна. Постоянная скорость во всей толще океана, противоположная распространению волны, сокращает длину волны на 2 км.

Выполнение галсов вдоль и поперек пролива показало неожиданные величины глубины моря, которых нет в цифровых массивах. Уже при постановке буй в 1997 г. и галсах вдоль пролива в 2007 г. стало ясно, что цифровые массивы глубин [19] не соответствуют действительности. При выполнении поперечного галса (1-2) в 2015 г. в юго-восточной части пролива было подтверждено наличие прохода с глубинами более 200 м (рис. 6). В этом проходе в 1997 г. ставился буй. Во время поперечного галса через пролив в 2015 г. были обнаружены еще три прохода с меньшими, но значительными глубинами 160, 150 и 120 м. В юго-восточном проходе температуры вода в глубинной части выше, чем в других проходах, и соленость также выше. Это говорит о том, что основное течение из Баренцева моря идет через этот юго-восточный проход. Спутниковый снимок (рис. 7) подтверждает этот факт. Эти подводные каналы обеспечивают возможность течений в проливе сквозь подводный хребет поперек пролива, который является продолжением Уральских гор.

Со стороны Карского моря, по измерениям СТД-зонда, видна внутренняя волна длиной око-

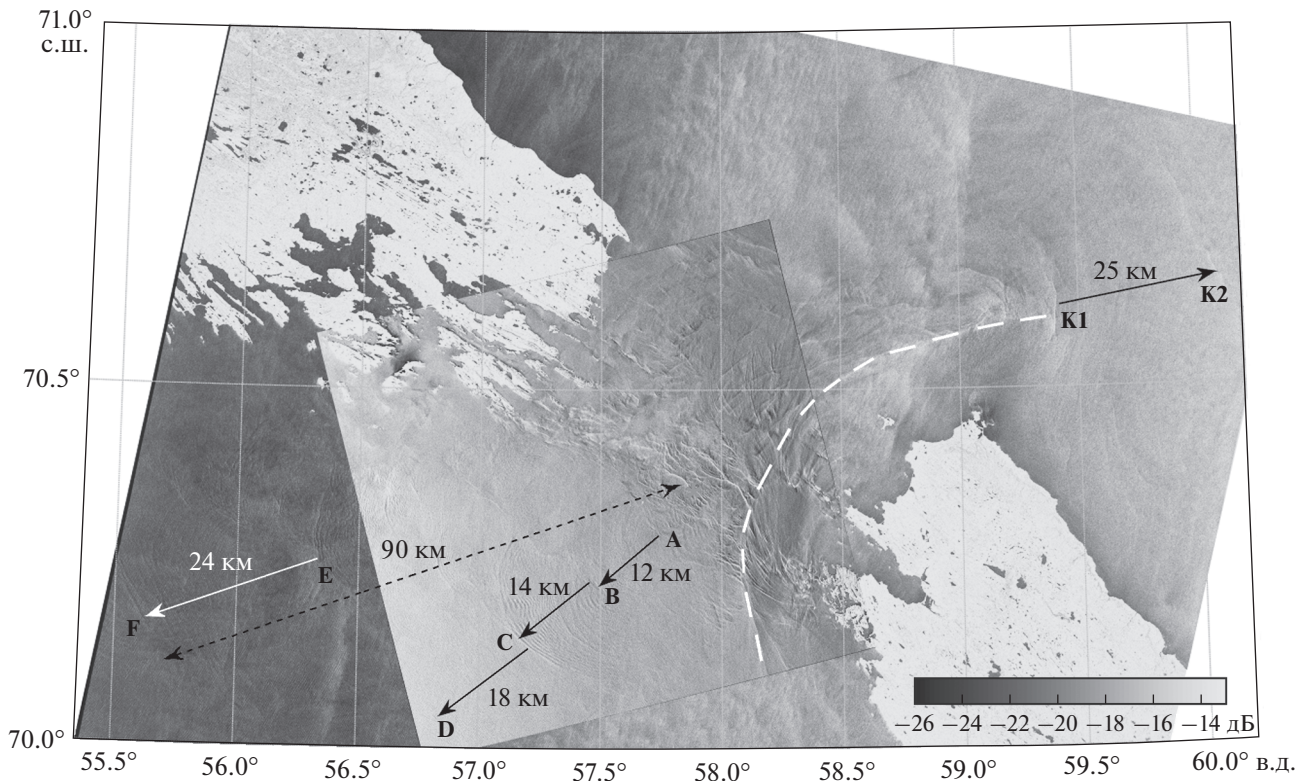


Рис. 7. Совмещенные спутниковые радиолокационные изображения Sentinel-1 SAR-C (02:43 UTC) и ALOS-2 PAL-SAR-2 (19:25 UTC) за 1 октября 2015 г. в районе пролива Карские Ворота. Символами А–F отмечены положения пакетов короткопериодных внутренних волн, К1–К2 – поверхностные проявления внутреннего прилива. Белая штриховая линия показывает положение границы основного течения из Баренцева моря в Карское. Изображения даны в терминах УЭПР в дБ. © ESA © JAXA

ло 25–27 км, но меньшей амплитуды, чем на стороне Баренцева моря. По данным буксируемых STD-измерений, виден гидравлический скачок на стороне Карского моря. Изотерма 1.5°C заглубляется с 50–60 м до 120 м. Это часто обнаруживаемое явление заглубления изотерм в той или иной степени интенсивности проявляется на стороне Карского моря от пролива в зависимости от скорости среднего потока.

Обратный галс выполнялся 6–7 октября. Это был период квадратурных приливов, и все особенности внутренних приливов были менее выражены. Разрез температуры буксируемым зондом показан на рис. 5. На стороне Карского моря обнаруживаются колебания температуры, связанные с внутренними приливными волнами малой длины, поскольку при движении судна навстречу волне длина волны, измененная эффектом Доплера, становится короче. Гидравлический скачок выражен слабее, чем при измерениях на первом этапе. На стороне Карского моря направление волны совпадает с направлением движения судна. Расстояние, на котором проводились измерения, близко к длине полусуточной волны,

поэтому можно здесь выделить только одну длину волны.

РАСЧЕТЫ ПО ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Численное моделирование генерации и распространения внутренних волн в проливе было проведено для изучения динамики внутренних волн и влияния на них среднего течения. Вынуждающей силой при численном моделировании является обтекание подводных склонов течениями баротропного прилива, которые создают периодические вертикальные смещения изопикнических поверхностей и тем самым генерируют приливную внутреннюю волну. Кроме того, численная модель позволяет анализировать распространение внутренней волны в обе стороны от пролива и изучить свойства и изменчивость волны.

Мы использовали численную модель, которую разработал В. Власенко [1, 2, 8, 17, 20]. Уравнения модели и детали ее использования в приложении к внутренним волнам в Карских воротах изложены в [1, 15]. В данном расчете мы использовали донную топографию, полученную по данным галсов буксировки. Стратификация плотности

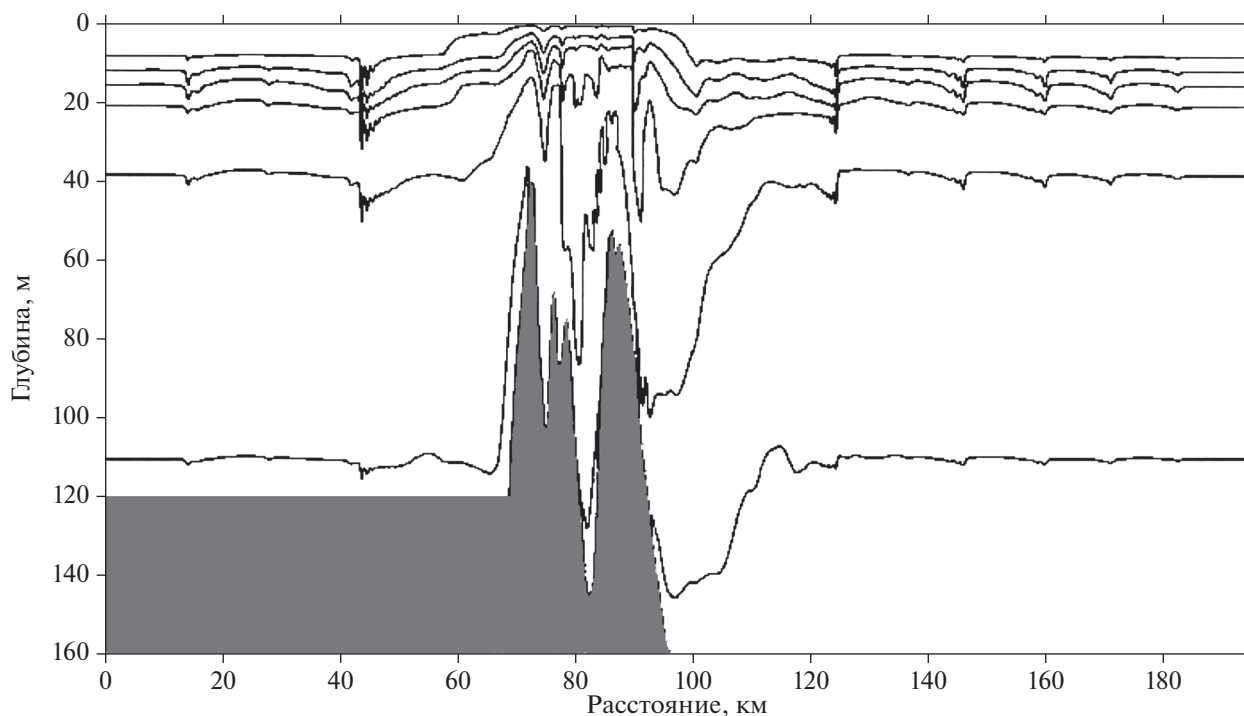


Рис. 8. Поле изопикнических поверхностей 23, 24, 25, 26 и 27 единиц условной плотности, возмущенное потоком через пролив и прохождением внутренних волн в соответствии с расчетами по численной модели. Серым цветом показан рельеф дна в проливе.

была также взята по данным измерений буксируемым STD-зондом. Амплитуда течений баротропного прилива была принята равной 9 см/с, что соответствует оценке по спутниковым альтиметрическим данным [9]. Длина расчетной области была 200 км, чтобы заведомо перекрыть несколько длин внутренних полусуточных волн. Шаг по горизонтали брался равным 75 м, по вертикали было 20 уровней. Временной шаг брался равным 1.5 с. Коэффициенты горизонтальной вязкости и диффузии плотности брались равными $12 \text{ м}^2/\text{с}$ над хребтом и $2 \text{ м}^2/\text{с}$ вне хребта. Коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии плотности равнялись $0.0001 \text{ м}^2/\text{с}$ над хребтом и вне хребта. При меньших коэффициентах возникает нестабильность при счете. Малый шаг по горизонтали увеличивает нелинейность, которая подавляет дисперсию в высоких широтах.

В модели вводился средний поток из Баренцева моря в Карское со скоростью 12 см/с над хребтом, который занимал всю толщу воды, и на него накладывались периодические течения баротропного прилива с амплитудой 9 см/с. Оценки скорости течения баротропного прилива сделаны по спутниковым данным. Эллипсы приливных течений брались по спутниковым данным на дату выполнения STD-разрезов [9]. В работе [15] показано, что эти данные хорошо совпадают с измерениями на буйках [15]. Между ними наблюдается хорошее совпаде-

ние. Примерно такие же эллипсы с амплитудой главной оси около 9 см рассчитаны в численной модели [4] непосредственно в проливе.

Возмущения поля плотности на рис. 8 показаны после расчетов по времени в течение трех периодов волн (36 часов). Периодические течения баротропного прилива набегают на подводный склон, получают вертикальные составляющие и возбуждают внутреннюю волну. Картина внутреннего прилива несимметрична по отношению к хребту в проливе. Из физических соображений понятно, что более сильный внутренний прилив должен наблюдаться в Баренцевом море, поскольку волна от хребта в проливе распространяется против течения. Именно это и показывает численный расчет. Когда внутренний прилив распространяется против течения, его амплитуда растет за счет сокращения длины волны при сохранении энергии одного периода волны. К западу и востоку от порога наблюдается внутренний бор (резкий скачок глубины изопикнических поверхностей по вертикали). Изотермические и изопикнические поверхности резко заглубляются на 10–15 м. Внутренний бор появляется почти сразу около гребня хребта в проливе. Непосредственно за внутренним бором возникает пакет короткопериодных внутренних волн. Слева от бора виден период внутренней приливной волны (длина волны равняется около 17–18 км). Ранее в работе было

показано, что длина волны, по численным расчетам по дисперсионному соотношению, равняется 23 км. Различия между расчетами по модели и по дисперсионному соотношению снимаются, если ввести поправку на эффект Доплера.

Со стороны Карского моря волна внутреннего прилива из пролива распространяется в том же направлении, что и течение. Это приводит к уменьшению амплитуды волны и увеличению ее длины. Со стороны Карского моря к северо-востоку от хребта в проливе наблюдается резкое заглубление изопикнических поверхностей, что является гидравлическим скачком, возникающим в потоке за препятствием (рис. 4, 5). По данным численных расчетов, изопикническая поверхность 27 заглубляется с 40 м до 100 м. По данным измерений наблюдается аналогичная картина (рис. 4).

Флуктуации поля плотности не являются симметричными по обе стороны от пролива (рис. 5). Из-за существования среднего потока из Баренцева моря в Карское, при встречных направлениях волны и течения в Баренцевом море длина волны сокращается, а амплитуда увеличивается. Передний фронт волны пологий, а задний крутой, что обычно наблюдается во внутренних волнах [17]. На заднем фронте внутренней волны формируется внутренний бор. Изопикны резко заглубляются, а за ними возникает пакет короткопериодных волн. Эти высокочастотные волны и внутренний бор вызывают неоднородные по пространству вертикальные движения, которые проявляются на поверхности в виде участков без ряби там, где на поверхности наблюдается дивергенция вертикальных потоков, и участков ряби в районах конвергенции.

К северо-востоку от пролива формируется гидравлический скачок за счет обтекания хребта средним течением в Карское море. Численные расчеты длины внутренней приливной волны примерно соответствуют расчетам по дисперсионному соотношению и наблюдениям.

За внутренним бором возникает пакет короткопериодных внутренних волн. Однако при принятой методике буксируемых измерений в сканирующем режиме, короткопериодные волны не наблюдаются из-за того, что цикл опускания и подъема прибора при буксировке примерно такой же, как и длина короткопериодной внутренней волны. Пространственное разрешение при буксировке близко к 900 м. Судно идет со скоростью 6 узлов, а цикл опускания и подъема зонда от поверхности до дна равняется около 5 мин. За это время судно проходит расстояние около 900 м. Длины короткопериодных внутренних волн в волновом пакете, который возникает за внутренним бором, примерно равны расстоянию, которое судно проходит за цикл подъема и опускания

прибора. Поэтому пространственное разрешение при таком сканировании недостаточно для описания столь короткопериодных волн. Однако такие волны видны на радарном изображении морской поверхности [14].

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Для получения дополнительной информации о структуре поля внутренних волн в проливе Карские Ворота были привлечены спутниковые данные высокого пространственного разрешения (съемки, близкие по времени ко времени проведения судовых измерений). Для анализа были использованы радиолокационные изображения (РЛИ) Sentinel-1 SAR-C с пространственным разрешением около 20 м (ГГ-поляризация, режим съемки Interferometric Wide Swath) и РЛИ ALOS-2 PALSAR-2 с пространственным разрешением около 10 м (ГГ-поляризация, режим съемки Fine Mode Dual polarization). Изображения были получены 1 октября 2015 г. в 02:43 UTC для Sentinel-1 и 19:25 UTC для ALOS-2, разница по времени между съемками составила 16 ч. 42 мин.

Поля удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) РЛ-сигнала (в дБ) приведены на рис. 7, 9. РЛИ Sentinel-1, имея больший размер (250 × 150 км), полностью охватывает район пролива Карские Ворота и прилежащие к нему области со стороны Баренцева и Карского морей. Изображение ALOS-2 размером 70 × 70 км покрывает центральную и юго-западную части пролива со стороны Баренцева моря. Совмещение обоих РЛИ позволило получить более полную картину приливной динамики в самом проливе и по обе стороны от него. На совмещенном изображении отчетливо идентифицируются поверхностные проявления пакетов короткопериодных внутренних волн (КВВ) в проливе, их распространение на юго-запад в Баренцево море, а также распространение внутренних приливных волн на северо-восток в Карское море. Кроме этого, на РЛИ отчетливо проявилась зона конвергенции течения, направленного из Баренцева моря в Карское. На рис. 7 она отмечена белой штриховой линией и, согласно данным спутниковых измерений в ИК-диапазоне, соответствует юго-восточной периферии теплого баренцевоморского течения.

На изображении ALOS-2 отчетливо видны поверхностные проявления пакетов внутренних волн, имеющих выраженную концентрическую форму и распространяющихся из пролива в западном и юго-западном направлениях (рис. 7). Анализ структуры проявлений внутренних волн на этом РЛИ позволяет выделить четыре последовательных пакета КВВ (отмечены символами А, В, С, D), расстояние между которыми увеличивается по мере их распространения в сторону Ба-

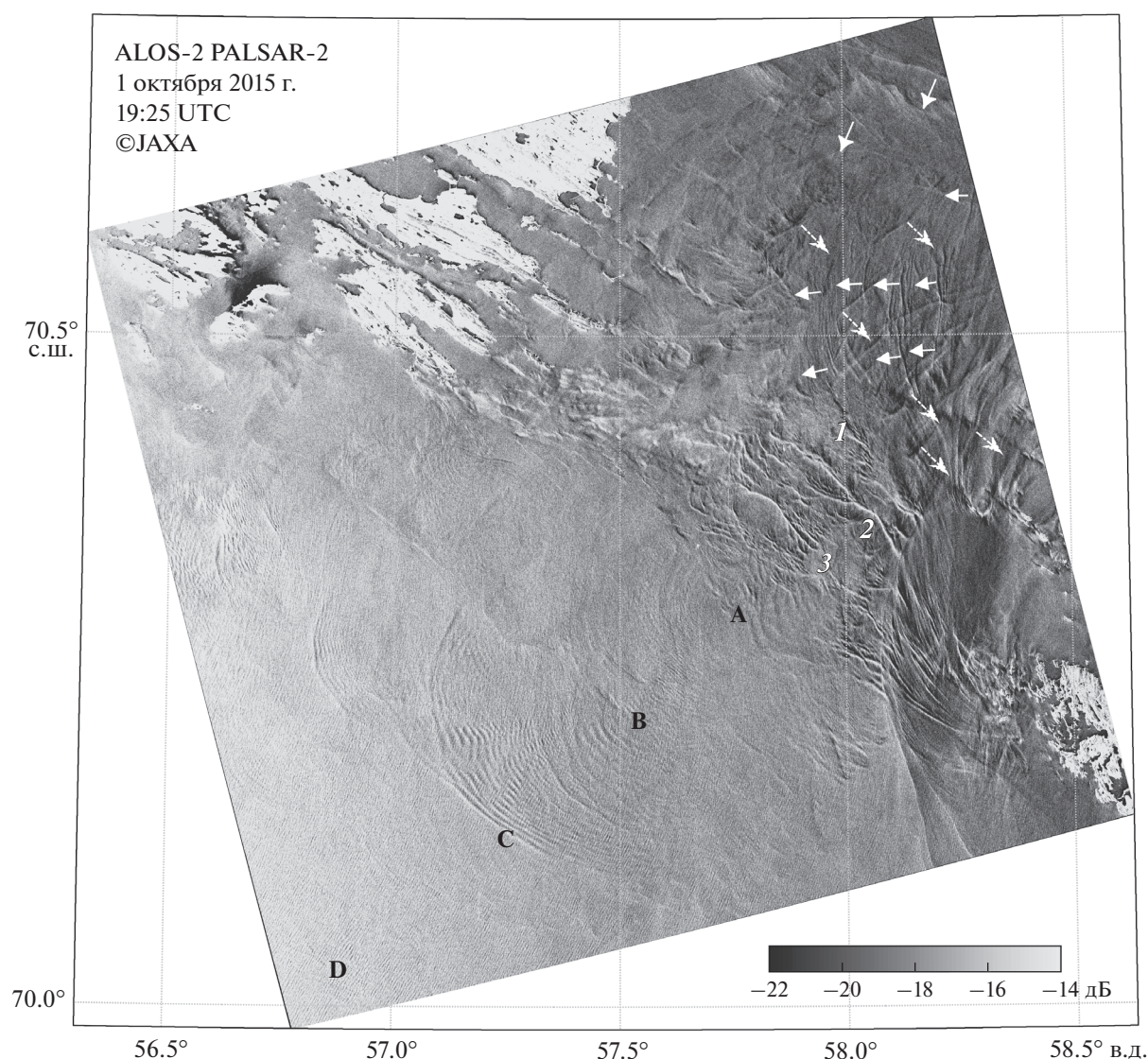


Рис. 9. Спутниковое радиолокационное изображение ALOS-2 PALSAR-2 за 1 октября 2015 г., показывающее детальную структуру поля внутренних волн в проливе Карские Ворота и со стороны Баренцева моря. Символами А–D и цифрами 1–3 отмечено положение пакетов внутренних волн, стрелками – направление их распространения. Изображения даны в терминах УЭПР в дБ. © JAXA

ренцева моря. Пакет А находится на расстоянии около 8 км от предполагаемого места генерации над порогом в проливе (отмечено * на рис. 7). Пакеты А–В, В–С и С–D находятся на расстоянии 12, 14 и 18 км друг от друга, что хорошо согласуется с измеренными длинами внутренних приливных волн к западу от пролива. На РЛИ наиболее явно выражен пакет С, насчитывающий около 30 солитонов, длина его фронта составляет около 40 км. В силу нелинейности КВВ максимальная длина волны в пакете соответствует лидирующей волне и варьируется вдоль ее фронта в пределах 400–800 м (см. рис. 9).

На РЛИ Sentinel-1 к западу от пролива отчетливо видны еще два пакета внутренних волн, Е и F, расстояние между ними – около 24 км. Согласно

спутниковым данным, пакеты короткопериодных волн распространяются на расстояние 90–100 км от предполагаемого места генерации в проливе (см. рис. 7). Эти наблюдения подтверждают тот факт, что обнаруженные ранее на РЛИ Алмаз-1 пакеты внутренних волн в этом районе вызваны не локальной генерацией [3], а берут свое начало в проливе Карские Ворота [5]. Таким образом, спутниковые изображения позволяют проследить 5–6 последовательных приливных циклов генерации и распространения высокочастотных внутренних волн из пролива в сторону Баренцева моря.

Со стороны Карского моря на расстоянии около 30 км к востоку от пролива и далее отчетливо видны характерные узкие выгнутые полосы ло-

кального усиления/ослабления ветровой ряби, ориентированные на северо-восток (отмечены K1, K2 на рис. 7). Эти проявления не имеют выраженной пакетной структуры, как в Баренцевом море и, по-видимому, являются проявлением внутреннего прилива на морской поверхности. На изображении отчетливо видны две последовательные сигнатуры K1 и K2, расстояние между ними – около 24–26 км, что хорошо согласуется с длиной внутреннего прилива со стороны Карского моря, полученной на основе контактных STD-измерений (рис. 4). Интересно отметить, что направление распространения внутренних волн по обе стороны от пролива находится примерно на одной оси – под углом 30°–40° по часовой стрелке относительно основной оси пролива (см. рис. 7).

Изображение ALOS-2 также позволяет рассмотреть детальную структуру внутренних волн в самом проливе (рис. 9). На входе в пролив со стороны Карского моря наблюдается несколько солитонов юго-западного направления. В северо-западной части пролива со стороны Новой Земли выраженные проявления КВВ почти не встречаются. В центре пролива наблюдается несколько групп короткопериодных волн противоположного направления, ориентированных поперек пролива (отмечены стрелками на рис. 9). Ширина пакетов, направленных от острова Вайгач в сторону Новой Земли, составляет 20–25 км, пакетов противоположного направления (в сторону о. Вайгач) – около 10 км. Расстояние между соседними пакетами в обоих случаях не превосходит 3–5 км. Генерация волн, распространяющихся поперек пролива, по-видимому, объясняется взаимодействием приливного течения со сложной топографией и наличием подводных хребтов вдоль и поперек пролива.

В юго-западной части пролива наблюдается серия направленных в Баренцево море коротких пакетов внутренних волн. Судя по всему, это именно те пакеты, которые дают начало пакетам А-Ф, рассмотренным выше. Выделить их точные границы достаточно сложно, но из общей структуры можно выделить три основных пакета (отмечены как 1, 2, 3 на рис. 9). Их длина составляет 1–2 км, ширина – 20–25 км, в пакетах насчитывается по 3–5 волн, а расстояние между ними – около 4–6 км. Эти пакеты занимают почти всю центральную часть пролива вплоть до мелководных районов вблизи о. Вайгач. Примерно в 10 км от северо-западной оконечности о. Вайгач в структуре внутренних волн наблюдается характерный разрыв из-за сдвига скорости на границе течения, направленного из Баренцева моря в Карское. Восточнее границы течения поверхностные проявления КВВ сильно размыты.

Отметим, что лидирующие волны в пакетах 1–3 имеют очень высокие РЛ-контрасты. Расстояния

между пакетами 1–3 примерно совпадает с расстояниями между соседними вершинами подводных хребтов в этой части пролива (см. разрез 1–4 на рис. 4). Генерация этих пакетов, очевидно, происходит при обтекании подводных склонов течениями баротропного прилива, как показано в модельном расчете на рис. 7. Высокие РЛ-контрасты наблюдаемых волн вызваны формированием интенсивных участков конвергенции вертикальных потоков, в которых происходит резкое усиление обратного рассеяния на короткой ветровой ряби и обрушениях волн [11, 12]. Особенная резкость зон конвергенции в этом районе, очевидно, объясняется высокими скоростями орбитальных течений на поверхности при заглужении приливного потока за препятствием и встречным движением баренцевоморского течения.

ВЫВОДЫ

Анализ измерений буксируемым STD-зондом, спутниковых снимков и результаты численного моделирования показывают, что в районе пролива Карские Ворота существуют интенсивные внутренние приливы. За счет присутствия постоянного среднего течения из Баренцева моря в Карское море внутренний прилив, распространяющийся в Баренцево море, усиливается. За счет встречного течения длина волны сокращается, а амплитуда растет. В районе пролива происходит нелинейная трансформация волны и образование пакетов короткопериодных волн, которые видны на поверхности по спутниковым изображениям. В восточной части пролива на стороне Карского моря обнаруживается гидравлический скачок с заглужением изотерм и изопикн до 100 м. Рельеф дна в проливе сильно отличается от цифрового массива рельефа дна различных баз данных. Отличие заключается в существовании четырех глубоководных (от 120 до 210 м) проходов в подводном хребте поперек пролива, который является продолжением Уральских гор.

Данная работа (анализ данных судовых измерений и моделирование) поддержана РНФ (грант № 14-05-00095). Полевые работы поддержаны грантами РФФИ № 14-05-05003Кар_а и № 14-05-05006.

Авторы благодарят экипаж НИС “Академик Мстислав Келдыш” за помощь в проведении полевых работ. Обработка и анализ спутниковых изображений выполнены при поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-35-60072 мол_а_дк, а также в рамках проектной части государственного задания № 5.2483.2014/К.

Идентификация и анализ внутренних волн выполнены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-5562.2016.5.

Спутниковые данные ALOS-2 PALSAR-2 получены авторами от Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) в рамках исследовательских проектов PI № 1193, PI № 3395 (4th & 6th ALOS RA for ALOS-2). Спутниковые данные Sentinel-1 являются собственностью Европейского космического агентства и Еврокомиссии и получены авторами на условиях свободного доступа для выполнения научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власенко В.И.* Нелинейная модель генерации бароклинных приливов над протяженными неоднородностями рельефа дна // Морской гидрофизический журнал. 1991. № 6. С. 9–16.
2. *Власенко В.И., Морозов Е.Г.* Генерация полусуточных внутренних волн около подводного хребта // Океанология. 1993. Т. 33. № 3. С. 327–332.
3. *Дикинис А.В., Иванов А.Ю., Мальцева И.Г. и др.* Дешифрирование внутренних волн на радиолокационных изображениях КА “Алмаз-1” с привлечением гидрометеорологических и гидрографических данных // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 5. С. 47–59.
4. *Каган Б.А., Тимофеев А.А.* Моделирование стационарной циркуляции и полусуточных поверхностных и внутренних приливов в проливе Карские Ворота // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 3. С. 72–79.
5. *Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В. и др.* Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 44–59.
6. *Морозов Е.Г.* Внутренние приливы в Гибралтарском и Баб-эль-Мандебском проливах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 3. С. 26–30.
7. *Морозов Е.Г., Нейман В.Г., Щербинин А.Д.* Внутренний прилив в проливе Карские ворота // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 5. С. 688–690.
8. *Морозов Е.Г., Писарев С.В.* Внутренний прилив в арктических широтах (численные эксперименты) // Океанология. 2002. Т. 42. № 2. С. 165–173.
9. *Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Atmos. Oceanic Technol. 2002. V. 19. № 2. P. 183–204.
10. *Harms I.H., Karcher M.J.* Modeling the seasonal variability of the hydrography and circulation in the Kara Sea // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. C6. P. 13431–13448.
11. *Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J.A.* Quad-polarization SAR features of ocean currents // J. Geophys. Res. 2014. V. 119 № 9. P. 6046–6065. doi 10.1002/2014JC010173
12. *Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J.A.* Quad-polarized SAR measurements of ocean currents in C- and L-bands // Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2015. P. 4212–4215. doi 10.1109/IGARSS.2015.7326755
13. *McClimans T.A., Johnson D.R., Krosshavn M. et al.* Transport processes in the Kara Sea // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, P. 14121–14139.
14. *Morozov E.G., Paka V.T., Bakhanov V.V.* Strong internal tides in the Kara Gates Strait // Geophys. Res. Letters. 2008. V. 35. P. L16603.
15. *Morozov E.G., Parrilla-Barrera G., Velarde M.G., Scherbinin A.D.* The Straits of Gibraltar and Kara Gates: A comparison of internal tides // Oceanologica Acta. 2003. V. 26. № 3. P. 231–241.
16. *Morozov E.G., Trulsen K., Velarde M.G., Vlasenko V.I.* Internal tides in the Strait of Gibraltar // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. P. 3193–3206.
17. *Morozov E.G., Vlasenko V.I.* Extreme tidal internal waves near the Mascarene Ridge // J. Marine Systems. 1996. V. 9. № 3–4. P. 203–210.
18. *Pavlov V.K., Pfirman S.L.* Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // Deep-Sea Res. 1995. V. 42. P. 1369–1390.
19. *Smith W.H.F., Sandwell D.T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. 1997. V. 277. P. 1956–1962. http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi.
20. *Vlasenko V., Hutter K.* Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over a slope-shelf topography // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. P. 1779–1793.

Internal Tide in the Kara Gates Strait

E. G. Morozov, I. E. Kozlov, S. A. Shchuka, D. I. Frey

We observed strong internal tidal waves in the Kara Gates Strait. Internal tides are superimposed over a system of mean currents from the Barents to the Kara Sea. Field studies of internal tides in the Kara Gates were performed in 1997, 2007, and 2015. In 2015, we analyze the data from towed CTD measurements, numerical model calculations, and satellite images in the region. Internal tidal wave with a period of 12.4 h is generated due to the interaction between the currents of the barotropic tide and bottom topography on the slopes of a ridge that crosses the strait from the Novaya Zemlya to the continent. The depths of the ridge crest are 30–40 m. A permanent current of relatively warm water flows from the Barents Sea to the Kara Sea. Internal wave propagates in both directions from the ridge. In the Barents Sea, internal waves are intensified by the opposite current from the Barents Sea to the Kara Sea. Internal bores followed by a packet of short-period internal waves are found in both directions from the strait. Satellite images show that short-period internal waves are generated after the internal bore. A hydraulic jump was found on the eastern side of the strait. Numerical modeling agrees with the experimental results.