

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ТРАНСКРИТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ В ПРОЛИВЕ КАРСКИЕ ВОРОТА

И. О. Копышов^{*1,2}, И. Е. Козлов¹ и А. В. Зимин³

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

* **Контакт:** Илья Олегович Копышов, kopyshov.io@phystech.edu

В настоящей работе исследуется процесс образования нелинейных внутренних волн (НВВ) при числе Фруда около 1 (называемый также транскритический режим) в проливе Карские Ворота. Анализ механизмов генерации НВВ выполнен на основе обработки данных натурных измерений экспедиции «Плавучий университет-2023» в июле 2023 г., а также данных приливной модели Arc2kmTM. Используя рассчитанные по натурным данным линейные фазовые скорости внутренних волн первой моды и результат приливной модели были оценены значения числа Фруда в проливе и определена его времененная изменчивость. На протяжении приливного цикла площадь участков пролива с транскритическими и сверхкритическими ($Fr > 1$) значениями числа Фруда может существенно увеличиваться. В ряде районов пролива благоприятные для генерации НВВ условия наблюдаются дважды за приливной период главной полусуточной гармоники M_2 (12,42 ч) или 4 раза в сутки. Анализ синхронных измерений с борта дрейфующего судна показал, что режим потока в ходе 8-часового периода последовательно изменился от докритических ($Fr < 1$) к транскритическим и далее вернулся к докритическим значениям. Общее количество пугов НВВ и выраженных уединенных колебаний, а также их высота и крутизна существенно увеличились в период ослабления приливных течений при докритических значениях числа Фруда, качественно соответствуя теории образования и распространения НВВ в транскритическом режиме.

Ключевые слова: нелинейные внутренние волны, механизмы генерации внутренних волн, транскритический режим, запрепятственные волны, число Фруда, пролив Карские Ворота, Арктика.

Цитирование: Копышов И. О., Козлов И. Е., Зимин А. В. Генерация нелинейных внутренних волн в транскритическом режиме в проливе Карские Ворота // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES6019. — DOI: 10.2205/2025es001021 — EDN: OKDYJG

Введение

Пролив Карские Ворота (КВ) располагается на широте $\sim 70,5^\circ$ с. ш., соединяя два крупных бассейна Карского моря и Баренцева моря. Активная генерация внутренних волн в этом районе, наблюдаемая по спутниковым и натурным наблюдениям, отмечалась многими научными группами [Лавренов и Морозов, 2002; Свергун и др., 2018; Kozlov et al., 2015; Kozlov et al., 2023; Li et al., 2019; Morozov, 2018], а их характерный временной масштаб составляет менее 0,5 ч [Bukatov et al., 2021]. Однако сам процесс генерации нелинейных внутренних волн (НВВ) в проливе изучен недостаточно.

Ранее было показано, что аномально высокие НВВ образуются в проливе при обрушении внутреннего прилива на неоднородной топографии [Li et al., 2019; Morozov et al., 2017, 2003]. Поверхностные проявления НВВ, регистрируемые в данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA), демонстрируют большое

<https://elibrary.ru/OKDYJG>

Получено: 19 февраля 2025 г.

Принято: 6 мая 2025 г.

Опубликовано: 30 декабря 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

разнообразие направлений распространения пакетов волн, которое плохо объясняется данным механизмом [Kopyshov *et al.*, 2023; Kozlov *et al.*, 2015]. Как отмечается в работе [Kopyshov *et al.*, 2023], за генерацию НВВ в проливе могут отвечать несколько конкурирующих механизмов. В настоящей работе мы подробно останавливаемся на механизме генерации НВВ в транскритическом режиме, теоретически обоснованном и описанном в работах [da Silva and Helfrich, 2008; Maxworthy, 1979; Melville and Helfrich, 1987]. Согласно классификации механизмов генерации внутренних волн, в транскритическом режиме происходит генерация посредством запрепятственного и резонансного механизмов [Jackson *et al.*, 2012]. Генерация возмущений в первом случае происходит на неоднородности дна, а во втором случае при резком сужении канала, например, как в эксперименте у мыса Кейп Код [da Silva and Helfrich, 2008].

В обоих случаях определяющим параметром является безразмерное число Фруда как отношение скорости потока U к фазовой скорости линейных внутренних волн c_0 . Когда фазовая скорость оказывается равна скорости течения ($Fr \sim 1$) поток находится в так называемом транскритическом режиме и происходит резонансная перекачка энергии из баротропного движения в колебание изопикин (формирование уединённого колебания или солитона). После выхода течения из транскритического режима ($Fr < 1$ – докритический режим) происходит «освобождение» образовавшегося солитона, который начинает распространяться с фазовой скоростью близкой к скорости потока в переходной фазе [Gerkema and Zimmerman, 2008]. В этом случае направление распространения НВВ будет в основном зависеть от направления суммарного потока в период транскритического режима. Согласно классической теории подветренных волн (lee waves) [da Silva and Helfrich, 2008; Maxworthy, 1979], при переходе к докритическому режиму ($Fr < 1$) область волновых колебаний смещается вверх по течению, а при сверхкритическом режиме ($Fr > 1$) – вниз по течению. В проливе, где фоновое течение в поверхностном слое устойчиво направлено из Баренцева в Карское море, изменчивость направлений распространения НВВ в основном определяется вариациями приливных течений и ориентацией донной топографии. Таким образом, данный механизм может объяснить картину, наблюдаемую на спутниковых радиолокационных изображениях [Kopyshov *et al.*, 2023; Kozlov *et al.*, 2015].

Важной вехой в изучении НВВ в проливе КБ стало выполнение комплексных экспедиционных наблюдений в рамках программы «Плавучий университет» [Kozlov *et al.*, 2023]. В результате анализа данных натурных измерений летом 2021 г. было показано существование интенсивных НВВ с высотой до 40 м, и определены условия их формирования в проливе. Эти работы были продолжены позднее в рамках экспедиций 2023 и 2024 гг.

В настоящей работе представлены результаты анализа натурных измерений на полигоне Карские Ворота, выполненных в рамках экспедиции «Плавучий университет-2023» в июле 2023 г. На основе анализа данных высокочастотных измерений различными зондами исследован процесс генерации НВВ в транскритическом режиме.

Материалы и методы

Исходными данными для работы послужили измерения с борта НИС «Дальние Зеленцы», полученные на полигоне в проливе Карские Ворота 18–20 июля 2023 года. Комплекс измерений на полигоне включал в себя несколько свободных дрейфов судна для оценки пространственных и вертикальных характеристик НВВ, заложенные изменения в центре пролива и выполнение стандартных гидрологических станций вдоль и поперек пролива с шагом в ~ 5 км (рис. 1).

Измерения пространственно-временной изменчивости термохалинной структуры в проливе проводились синхронно с помощью термопрофилера «термокоса» [Свергун и др., 2022] и учащённых СТД-зондирований зондом СТД48М (Sea&Sun Technology) в кормовой и носовой частях судна. Учащённые СТД-измерения проводились до горизонтов 60–70 м с периодичностью раз в 2–3 минуты. Непрерывное термопрофилирование выполнялось с дискретностью 20 с до глубины 50 м.

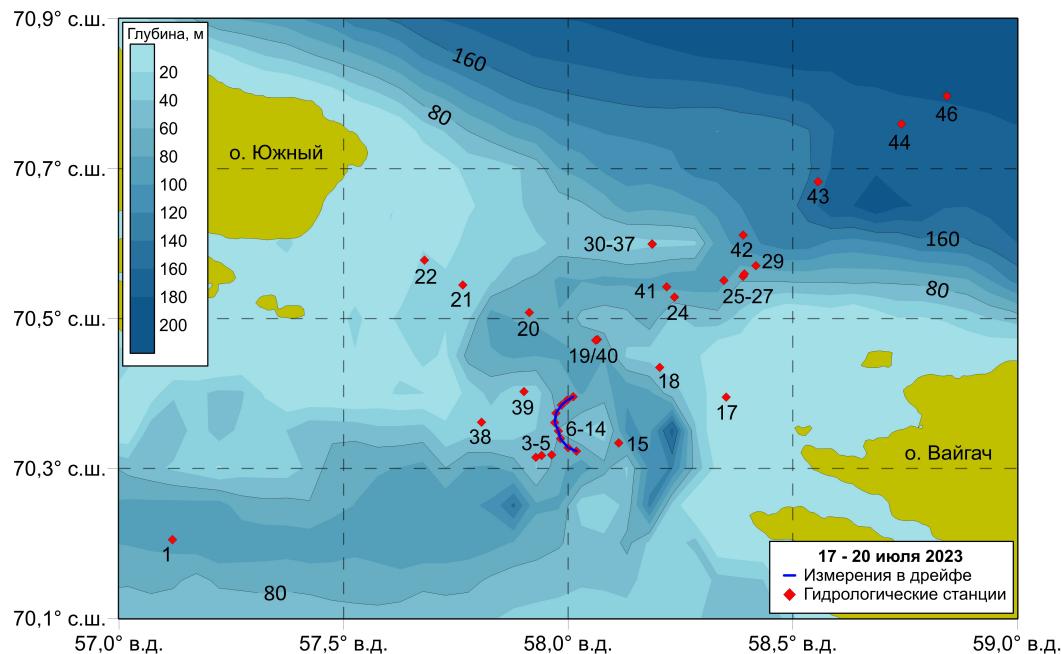


Рис. 1. Карта положения гидрологических станций в проливе Карские Ворота в июле 2023 г. в рамках экспедиции «Плавучий университет-2023» на НИС «Дальние Зеленцы».

Как было сказано выше, определяющим параметром генерации НВВ в транскритическом режиме является безразмерное число Фруда, которое в данной работе определяется как $Fr = \frac{\langle U \rangle_z}{c_0}$, где $\langle U \rangle_z$ – средняя по глубине скорость течения, c_0 – линейная фазовая скорость внутренних волн первой моды. В общем случае, величина скорости течения есть сумма фоновой и приливной компонент. В работе [Morozov *et al.*, 2003] показано, что фоновая компонента скорости не превышает 0,1 м/с, в то время как приливная составляющая может достигать существенно более высоких значений, формируя течения до 1 м/с в отдельных частях пролива [Kozlov *et al.*, 2023]. Таким образом, в первом приближении мы можем пренебречь фоновым течением и определить $\langle U \rangle_z$ как скорость баротропного прилива, рассчитанную по модели Arc2kmTM [Greene *et al.*, 2024]. Линейная фазовая скорость внутренних волн первой моды c_0 рассчитывалась по непрерывной стратификации измеренных профилей плотности $\rho_0(z)$, путём решения краевой задачи на собственные значения [Cushman-Roisin and Beckers, 2011].

Измерения фоновой стратификации в проливе проводились с хорошим пространственным разрешением, однако они дают более фрагментарные знания о распределении плотности на акватории (рис. 1). Здесь стоит пояснить методы экстраполяции данных фазовой скорости c_0 (рис. 2). Основная градуировка значений производилась на сетке с шагом 2 км (для дальнейшей работы приливной модели), поэтому границы районов постоянной величины весьма резкие. Область значения $c_0 = 0,50 \pm 0,05$ м/с в юго-западной части пролива в основном ограничена изобатой 100 м. Такая привязка есть следствие сильной зависимости значения c_0 от глубины: для двуслойного приближения $c_0 \propto \sqrt{H}$ [формула 5.19 в Gerkema and Zimmerman, 2008], где H – общая глубина в точке. Поэтому было рассчитано, что в этой части пролива при значениях глубины 100–120 м фазовая скорость должна меняться незначительно и укладываться в диапазон погрешностей.

Результаты и обсуждения

Генерация НВВ в транскритическом режиме происходит, когда значения $Fr = 1 \pm \Delta Fr \approx 1$. В этот момент происходит «блокировка» горизонтального движения всех вертикальных возмущений (солитонов) и осуществляется резонансная перекачка энергии от баротропного потока к уединённому колебанию, в ходе эволюции которого

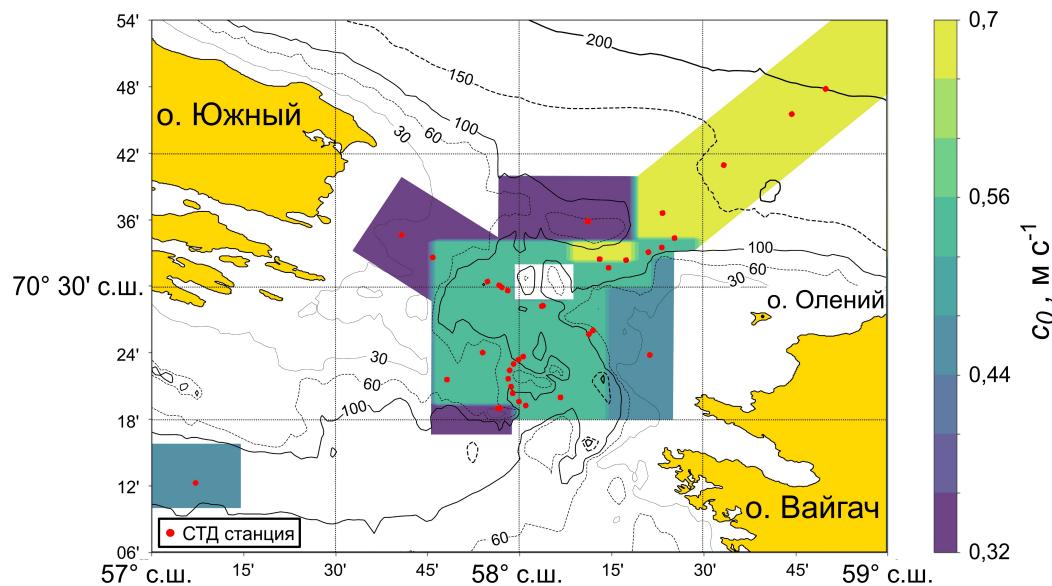


Рис. 2. Пространственное распределение линейной фазовой скорости внутренних волн в проливе Карские Ворота по данным гидрологических измерений в июле 2023 г.

происходит образование пакетов коротких НВВ [Clarke and Grimshaw, 1994; Grimshaw and Smyth, 1986]. Пространственные характеристики, такие как высота и длина волны, а также дальнейшая скорость распространения волновых структур зависят от фоновой стратификации [см., например, Gerkema and Zimmerman, 2008].

Важным параметром при генерации НВВ является линейная фазовая скорость малых возмущений c_0 , поскольку она стоит в знаменателе безразмерного числа Фруда. Именно c_0 , которая определяется стратификацией, регулирует диапазон генерации НВВ. Если, например, фоновые условия претерпели изменение и c_0 увеличилось, то при неизменной скорости течения генерация солитонов перестанет происходить вследствие того, что режим потока станет докритическим. В ходе анализа данных натурных измерений за июль 2023 г. было получено, что на масштабах пролива значения c_0 находятся в диапазоне от 0,3 до 0,7 м/с (рис. 2).

В центральной части пролива ($\sim 58^\circ$ в. д., $\sim 70^\circ 30'$ с. ш.) белым цветом отмечено резкое изменение глубины. На этой отмели глубина изменяется от более чем 100 м до менее чем 50 м. Последнее означает и изменение фазовой скорости. Несмотря на это, подробных измерений здесь проведено не было, и для большей достоверности интерпретацию результатов в этой локальной области необходимо не учитывать при подведении результатов.

На масштабах пролива геометрия приливных эллипсов достаточно разнообразна [см. рис. 4в Kozlov *et al.*, 2023], а вклад второстепенных гармоник (помимо гармоники M_2) может существенно влиять на результирующее поле приливных течений. Для дат экспедиции был проведён расчёт поля скорости баротропного прилива $\langle U \rangle_z$ для 8 основных полусуточных и суточных гармоник. Геометрия эллипсов 4 основных гармоник для пролива приведена на рис. 3.

Далее на основе полученных значений $\langle U \rangle_z$ и c_0 были рассчитаны значения чисел Фруда на 18–20 июля 2023 г. Пример расчётов для 18.07.2023 представлена на рис. 4.

Проанализируем различные режимы потока в проливе (рис. 4). Стадия, когда большая часть пролива была занята транскритическим ($Fr \sim 1$) и сверхкритическим ($Fr < 1$), которая показана на рис. 4а) сопровождается фазой низкой воды. После этого происходит изменение скоростей течений так, что вся акватория пролива переходит в докритический режим с $Fr < 1$ (рис. 4в). Описанная периодичность возобновляется чуть более, чем через сутки, таким образом можно говорить о важном вкладе суточных приливных гармоник как дополнение к полусуточным.

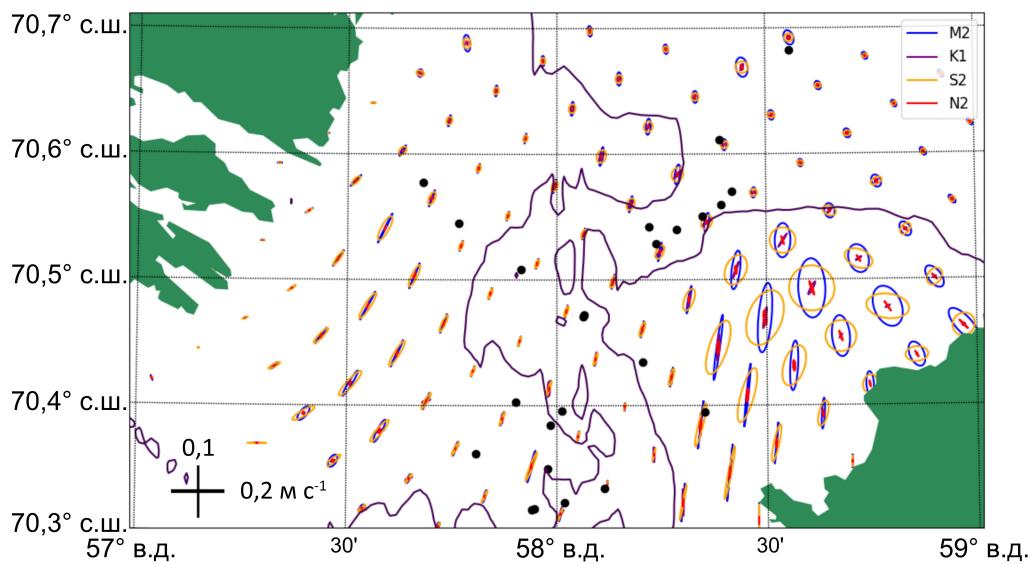


Рис. 3. Геометрия и магнитуда приливных эллипсов для наиболее значимых гармоник M_2 (12,42 ч), K_1 (23,93 ч), S_2 (12 ч), N_2 (12,66 ч) на масштабе пролива Карские Ворота по модели Arc2kmTM. Точками отмечены гидрологические станции, сплошной линией отмечена изобаты 90 м.

Вблизи юго-восточной оконечности о. Южный и в прибрежной части о. Олений число Фруда достигает сверхкритических значений (рис. 4а, б) чаще, чем в глубоководной части пролива. В этих районах пролива поток находится в транскритическом режиме каждый раз при наступлении малой воды и полной воды. Следовательно, благоприятные условия для генерации НВВ наблюдаются здесь 4 раза в сутки, т. е. дважды за приливной период M_2 . Отметим, что этот результат хорошо согласуется с наблюдаемыми в юго-западной части расстояниями между последовательными пакетами НВВ около 8–12 км [см. рис. 7в *Morozov et al., 2017*]. Предполагая, что пакеты НВВ образуются здесь в транскритическом режиме дважды за приливной цикл, фазовая скорость НВВ, определенная по данным спутниковых наблюдений будет находиться в диапазоне 0,36–0,54 м/с, что согласуется с результатами на рис. 2.

Рассмотрим теперь более детально данные натурных наблюдений, полученных в ходе дрейфа судна (станции 6–14) на входе в пролив со стороны Баренцева моря (синяя кривая на рис. 1, зеленая кривая на рис. 4а, б, в). Набор данных включал в себя разнесенные в пространстве вдоль правого борта судна высокочастотные измерения СТД-зонда и записи термопрофилемера за 18 июля 2023 г. (рис. 5).

Вертикальное распределение температуры показывает наличие двух основных термоклинов на глубине ~ 12 м и ~ 35 м (изотермы 3 °C и 7 °C на рис. 5). За почти 8-ми часовой период измерений было зарегистрировано более 30 колебаний основного термоклина высотой от нескольких метров до 20–30 м с продолжительностью от 4–5 минут до 40 минут. Перепад температуры во втором термоклине был менее выражен, что объясняет более интенсивные колебания изотермических поверхностей при прохождении внутренних волн понижения. Наиболее интенсивные колебания изотерм были зарегистрированы в 5:00, 9:30 и 11:00 GMT.

Исходя из значений числа Фруда всю запись можно разделить на несколько основных периодов. В начале записи с 4:40 до 6:00 GMT наблюдался докритический режим ($Fr < 1$), в этот момент в данных отчетливо видно выраженное одиночное заглубление изотерм высотой около 15 м, по своей структуре напоминающее гидравлический прыжок, формирующийся за препятствием.

Далее с 6:00 до 7:10 GMT в записи наблюдается относительно спокойный переходный период, когда поток находился в транскритическом режиме ($Fr = 0,8–1,2$). Здесь мы рассматриваем диапазон ширины транскритического режима $\Delta Fr = 0,2$ что несколь-

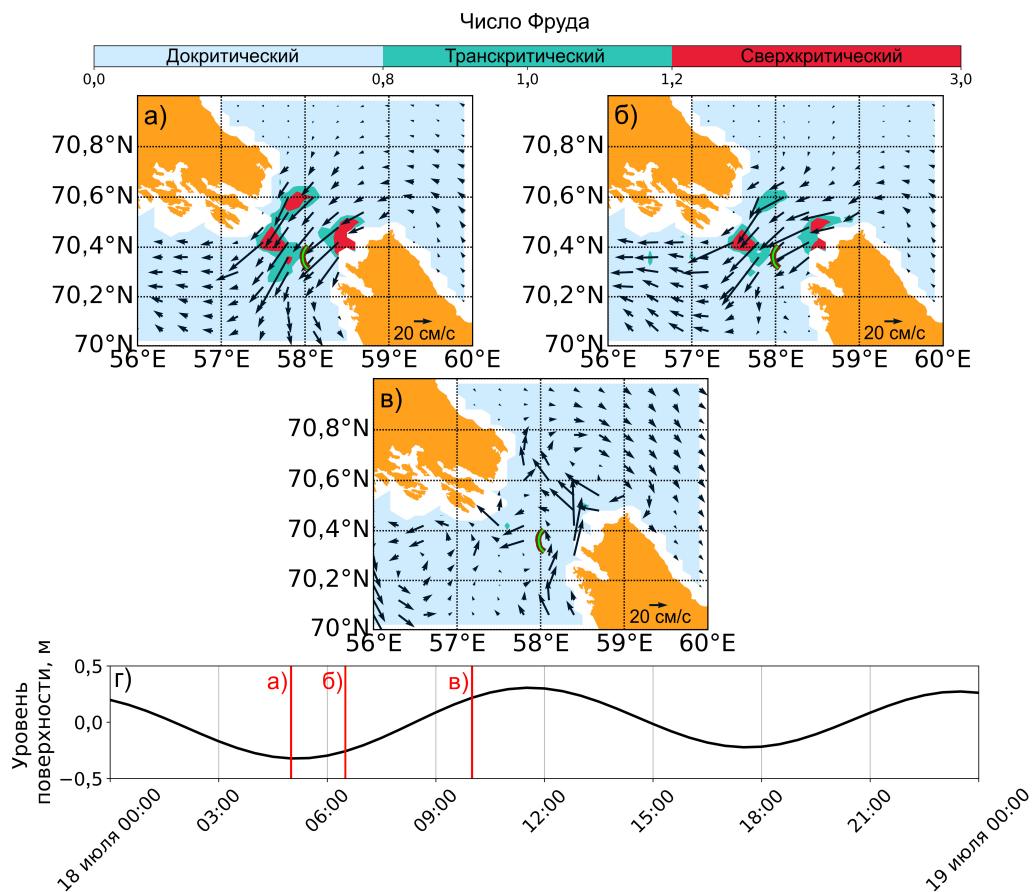


Рис. 4. Пространственное распределение значений числа Фруда в разные приливные периоды в проливе Карские Ворота по данным гидрологических измерений и приливной модели Arc2kmTM. Моменты времени, для которых получены значения числа Фруда на рисунках а), б), в) соответствуют положению красных линий на рисунке г), где показана временная изменчивость приливных колебаний уровня моря в центре пролива (58° в. д., $70,5^{\circ}$ с. ш.). Зелёной кривой на а), б), в) показан дрейф судна.

ко больше, чем в аналогичной работе *da Silva and Helfrich* [2008], что связано с более выраженным топографическими неоднородностями в проливе. В общем виде ΔFr зависит от отношения локальной величины топографической неоднородности к общей глубине местности [Maxworthy, 1979; Melville and Helfrich, 1987]. В переходный момент между транскритическим и докритическим режимами потока около 07:00 в обеих записях видно выраженное заглубление изотерм высотой около 15 м.

Начиная примерно с 08:00 GMT приливные течения заметно ослабли (менее 0,4 м/с), значения числа Фруда были докритическими ($Fr < 0,8$), однако число регистрируемых НВВ не стало меньше. Наоборот, в записи видны регулярно повторяющиеся пуговобразные структуры (8:20–8:40, 10:20–10:50, 11:30–12:00) и выраженные уединённые колебания высотой до 30 м (09:05, 11:00). Их высота и крутизна существенно выше, чем в начале записи. Согласно [Jackson *et al.*, 2012], свободное распространение пугов НВВ как раз должно наблюдаться при докритических значениях числа Фруда, когда фазовая скорость внутренних волн превышает скорость фонового потока. Более того, структура чёткой стратификации (рис. 5в) подвергается наибольшей изменчивости после выхода потока из транскритического режима. В этом смысле выполненные наблюдения качественно согласуются с теорией образования и распространения НВВ в транскритическом режиме.

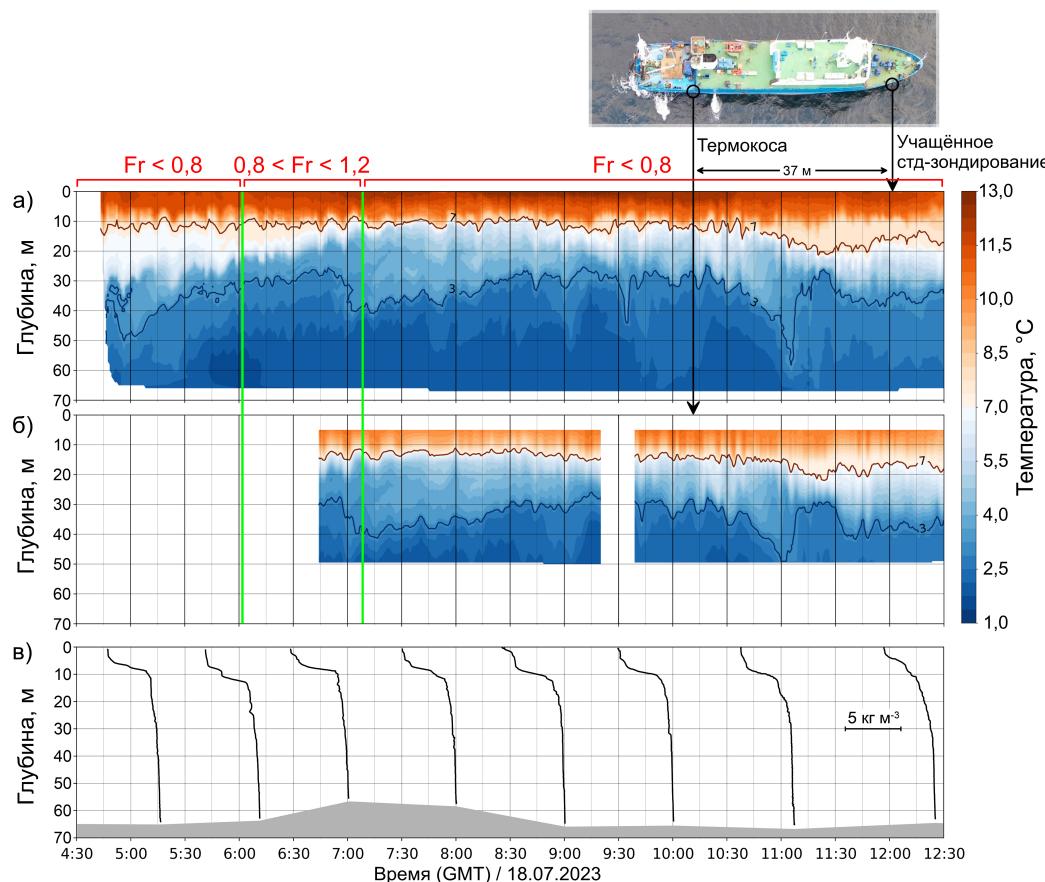


Рис. 5. Временная изменчивость вертикального распределения температуры морской воды во время дрейфа судна 18 июля 2023 г. по данным а) учащенных СТД-зондирований и б) термопрофилемера, а также эволюция в) профилей плотности во время дрейфа. Серым на в) изображён рельеф дна.

Заключение

На основе обработки комплексных судовых измерений летом 2023 г. выполнен анализ физических механизмов генерации нелинейных внутренних волн в проливе Карские Ворота. Помимо ранее предложенного различными авторами механизма генерации НВВ в ходе нелинейной эволюции внутреннего прилива, рассмотрен механизм образования внутренних волн в транскритическом режиме.

Сам факт возможности образования НВВ под действием различных механизмов обусловлен как близостью района исследований к критической широте для доминирующей приливной компоненты M_2 ($\sim 74,5^\circ$ с. ш.), что располагает к прямой передаче энергии баротропного прилива к коротким НВВ [Rippeth *et al.*, 2017; Vlasenko *et al.*, 2003], так и наличием весьма неоднородного во времени и пространстве приливного форсинга над неоднородной топографией в проливе [Morozov, 2018; Morozov *et al.*, 2017].

Значения линейной фазовой скорости внутренних волн первой моды, оценённые на основе решения задачи на собственные значения для непрерывной стратификации по данным натурных измерений в июле 2023 г., составили от 0,3 до 0,7 м/с. Далее полученные поля фазовой скорости внутренних волн и скорости баротропных приливных течений по данным модели Arc2kmTM были использованы для оценки пространственного распределения значений числа Фруда в проливе и его временной изменчивости в ходе приливного цикла.

Показано, что в ходе приливного цикла площадь участков пролива с транскритическими ($Fr = 0,8-1,2$) и сверхкритическими ($Fr > 1$) значениями числа Фруда может

существенно увеличиваться. Кроме того, в ряде районов фоновый поток находится в транскритическом режиме каждый раз при переходе от малой воды к полной и наоборот, т. е. благоприятные для генерации НВВ условия наблюдаются здесь дважды за приливной период M_2 или 4 раза в сутки. Этот вывод приводит к качественному согласию между оценками фазовой скорости внутренних волн по данным спутниковых и контактных наблюдений. Наличие нескольких механизмов генерации может объяснить сложную картину поверхностных проявлений пакетов НВВ, наблюданную в спутниковых данных в ранних исследованиях [Kopyshov *et al.*, 2023].

Анализ синхронных измерений с борта дрейфующего судна в южной части пролива показал, что в терминах значений числа Фруда режим потока в ходе 8-часового периода последовательно изменился от сверхкритических к транскритическим и далее к докритическим значениям. Общее количество пугов НВВ и выраженных уединённых колебаний, а также их высота и крутизна существенно увеличились в период ослабления приливных течений при докритических значениях числа Фруда, качественно соответствуя теории образования и распространения НВВ в транскритическом режиме.

Несмотря на то, что область исследования ограничена акваторией пролива Карские Ворота, предполагается, что аналогичные условия могут существовать и в других районах Арктики, поскольку выявленные механизмы не привязаны строго к конкретным географическим особенностям.

В настоящей работе используются данные о вертикальных измерениях температуры, электропроводности и давления на стандартных гидрологических станциях, а также непрерывные измерения термопрофилемом «термокоса» [Zimin *et al.*, 2026].

Благодарности. Авторы благодарят научную команду первого этапа экспедиции «Плавучий университет-2023» на борту НИС «Дальние Зеленцы» за помощь в выполнении натурных измерений. Экспедиция по программе «Плавучий университет-2023» проведена в рамках соглашения № 075-03-2024-117. Натурные измерения выполнены в рамках государственного задания FMWE-2024-0028. Анализ характеристик поля внутренних волн выполнен в рамках государственного задания FNNN-2024-0017.

Список литературы

- Лавренов И. В. и Морозов Е. Г. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. — СПб. : Гидрометеоиздат, 2002. — 364 с.
- Свергун Е. И., Зимин А. В., Атаджанова О. А. и др. Изменчивость фронтальных разделов и короткопериодные внутренние волны в Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых наблюдений за тёплый период 2007 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15, № 4. — С. 181–188. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-181-188>.
- Свергун Е. И., Коник А. А., Родионов А. А. и др. Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и процессов в Четвёртом Курильском проливе по данным экспедиционных исследований // Подводные исследования и робототехника. — 2022. — Т. 42, № 4. — С. 53–61. — https://doi.org/10.37102/1992-4429_2022_42_04_05.
- Bukatov A. A., Solovei N. M. and Pavlenko E. A. Free Short-Period Internal Waves in the Arctic Seas of Russia // Physical Oceanography. — 2021. — Vol. 28, no. 6. — P. 599–611. — <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-6-599-611>.
- Clarke S. R. and Grimshaw R. H. J. Resonantly generated internal waves in a contraction // Journal of Fluid Mechanics. — 1994. — Vol. 274. — P. 139–161. — <https://doi.org/10.1017/s0022112094002077>.
- Cushman-Roisin B. and Beckers J. M. Introduction to geophysical fluid dynamics physical and numerical aspects. — Academic Press, 2011. — 828 p.
- da Silva J. C. B. and Helfrich K. R. Synthetic Aperture Radar observations of resonantly generated internal solitary waves at Race Point Channel (Cape Cod) // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2008. — Vol. 113, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2008jc005004>.
- Gerkema T. and Zimmerman J. T. F. An introduction to internal waves. — Texel : Royal NIOZ, 2008. — 207 p.
- Greene C. A., Erofeeva S., Padman L., et al. Tide Model Driver for MATLAB // Journal of Open Source Software. — 2024. — Vol. 9, no. 95. — P. 6018. — <https://doi.org/10.21105/joss.06018>.
- Grimshaw R. H. J. and Smyth N. Resonant flow of a stratified fluid over topography // Journal of Fluid Mechanics. — 1986. — Vol. 169. — P. 429–464. — <https://doi.org/10.1017/s002211208600071x>.

- Jackson C. R., Silva J. C. B. Da and Jeans G. The Generation of Nonlinear Internal Waves // *Oceanography*. — 2012. — Vol. 25, no. 2. — P. 108–123. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.46>.
- Kopyshov I. O., Kozlov I. E., Shiryborova A. I., et al. Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2023. — Vol. 23, no. 5. — ES0210. — <https://doi.org/10.2205/2023es02si10>.
- Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E. V., et al. Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2015. — Vol. 51, no. 9. — P. 1073–1087. — <https://doi.org/10.1134/s0001433815090121>.
- Kozlov I. E., Kopyshov I. O., Frey D. I., et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 24. — P. 5769. — <https://doi.org/10.3390/rs15245769>.
- Li Q., Wu H., Yang H., et al. A numerical simulation of the generation and evolution of nonlinear internal waves across the Kara Strait // *Acta Oceanologica Sinica*. — 2019. — Vol. 38, no. 5. — P. 1–9. — <https://doi.org/10.1007/s13131-019-1437-z>.
- Maxworthy T. A note on the internal solitary waves produced by tidal flow over a three-dimensional ridge // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1979. — Vol. 84, no. C1. — P. 338–346. — <https://doi.org/10.1029/JC084iC01p00338>.
- Melville W. K. and Helfrich K. R. Transcritical two-layer flow over topography // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1987. — Vol. 178. — P. 31–52. — <https://doi.org/10.1017/s0022112087001101>.
- Morozov E. G. *Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling*. — Switzerland : Springer International Publishing, 2018. — <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73159-9>.
- Morozov E. G., Kozlov I. E., Shchuka S. A., et al. Internal tide in the Kara Gates Strait // *Oceanology*. — 2017. — Vol. 57, no. 1. — P. 8–18. — <https://doi.org/10.1134/s0001437017010106>.
- Morozov E. G., Parrilla-Barrera G., Velarde M. G., et al. The straits of Gibraltar and Kara Gates: a comparison of internal tides // *Oceanologica Acta*. — 2003. — Vol. 26, no. 3. — P. 231–241. — [https://doi.org/10.1016/s0399-1784\(03\)00023-9](https://doi.org/10.1016/s0399-1784(03)00023-9).
- Rippeth T. P., Vlasenko V., Stashchuk N., et al. Tidal Conversion and Mixing Poleward of the Critical Latitude (an Arctic Case Study) // *Geophysical Research Letters*. — 2017. — Vol. 44, no. 24. — P. 12349–12357. — <https://doi.org/10.1002/2017gl075310>.
- Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., et al. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2003. — Vol. 50, no. 3. — P. 317–338. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(03)00018-9).
- Zimin A., Kozlov I. and Kopyshov I. Temperature, Salinity, Depth data in the Kara Gates Strait in July 2023, Arctic Ocean. — Version 1. — 2026. — <https://doi.org/10.17632/tr8fywy68r>. — In press.

GENERATION OF NONLINEAR INTERNAL WAVES BY THE TRANSCRITICAL FLOW IN THE KARA GATES STRAIT

I. O. Kopyshov^{*,1,2} , I. E. Kozlov¹ , and A. V. Zimin³ 

¹Marine Hydrophysical Institute of Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Correspondence to: Ilya Kopyshov, kopyshov.io@phystech.edu

In this study, we investigate the generation of nonlinear internal waves (NLIWs) by transcritical flow in the Kara Gates Strait. The analysis of the NLIW generation mechanisms is carried out on the basis of in-situ measurements obtained during «Floating University-2023» expedition in July 2023, and data of Arc2kmTM tidal model. The values of the linear phase velocity of the first mode internal waves in July 2023 ranged from 0.3 to 0.7 m/s. Based on these estimates and model fields of tidal current velocity, the Froude number values in the strait were calculated and its temporal variability was determined. During the tidal cycle, the area of the strait occupied by transcritical and supercritical ($Fr > 1$) flow regimes can increase substantially. In a number of areas of the strait, conditions favorable for the generation of NLIWs are observed twice during the M_2 tidal period or 4 times a day. Analysis of synchronous measurements from on board a drifting vessel showed that the flow regime during an 8-hour period successively changed from supercritical to transcritical and then to subcritical values. The total number of NLIW trains and pronounced solitary oscillations, as well as their height and steepness, increased significantly during the period of weakening tidal currents at subcritical values of the Froude number, qualitatively corresponding to the theory of the formation and propagation of NLIWs in the transcritical regime.

Received: February 19, 2025

Accepted: May 6, 2025

Published: December 30, 2025

Keywords: Nonlinear internal wave, internal wave generation mechanisms, transcritical regime, lee waves, Froude number, transformation of barotropic tidal energy, Kara Gates Strait, Arctic Ocean.



© 2025. The Authors.

Citation: Kopyshov I. O., Kozlov I. E., Zimin A. V. (2025), Generation of Nonlinear Internal Waves by the Transcritical Flow in the Kara Gates Strait, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES6019, <https://doi.org/10.2205/2025ES001021>, EDN: OKDYJG

References

- Bukatov A. A., Solovei N. M. and Pavlenko E. A. Free Short-Period Internal Waves in the Arctic Seas of Russia // Physical Oceanography. — 2021. — Vol. 28, no. 6. — P. 599–611. — <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-6-599-611>.
- Clarke S. R. and Grimshaw R. H. J. Resonantly generated internal waves in a contraction // Journal of Fluid Mechanics. — 1994. — Vol. 274. — P. 139–161. — <https://doi.org/10.1017/s0022112094002077>.
- Cushman-Roisin B. and Beckers J. M. Introduction to geophysical fluid dynamics physical and numerical aspects. — Academic Press, 2011. — 828 p.
- da Silva J. C. B. and Helfrich K. R. Synthetic Aperture Radar observations of resonantly generated internal solitary waves at Race Point Channel (Cape Cod) // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2008. — Vol. 113, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2008jc005004>.
- Gerkema T. and Zimmerman J. T. F. An introduction to internal waves. — Texel : Royal NIOZ, 2008. — 207 p.
- Greene C. A., Erofeeva S., Padman L., et al. Tide Model Driver for MATLAB // Journal of Open Source Software. — 2024. — Vol. 9, no. 95. — P. 6018. — <https://doi.org/10.21105/joss.06018>.
- Grimshaw R. H. J. and Smyth N. Resonant flow of a stratified fluid over topography // Journal of Fluid Mechanics. — 1986. — Vol. 169. — P. 429–464. — <https://doi.org/10.1017/s002211208600071x>.
- Jackson C. R., Silva J. C. B. Da and Jeans G. The Generation of Nonlinear Internal Waves // Oceanography. — 2012. — Vol. 25, no. 2. — P. 108–123. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.46>.

- Kopyshov I. O., Kozlov I. E., Shiryborova A. I., et al. Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2023. — Vol. 23, no. 5. — ES0210. — <https://doi.org/10.2205/2023es02si10>.
- Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E. V., et al. Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2015. — Vol. 51, no. 9. — P. 1073–1087. — <https://doi.org/10.1134/s0001433815090121>.
- Kozlov I. E., Kopyshov I. O., Frey D. I., et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 24. — P. 5769. — <https://doi.org/10.3390/rs15245769>.
- Lavrenov I. V. and Morozov E. G. Surface and internal waves in the Arctic seas. — St. Petersburg : Gidrometeoizdat, 2002. — 364 p. — (In Russian).
- Li Q., Wu H., Yang H., et al. A numerical simulation of the generation and evolution of nonlinear internal waves across the Kara Strait // *Acta Oceanologica Sinica*. — 2019. — Vol. 38, no. 5. — P. 1–9. — <https://doi.org/10.1007/s13131-019-1437-z>.
- Maxworthy T. A note on the internal solitary waves produced by tidal flow over a three-dimensional ridge // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1979. — Vol. 84, no. C1. — P. 338–346. — <https://doi.org/10.1029/JC084iC01p00338>.
- Melville W. K. and Helfrich K. R. Transcritical two-layer flow over topography // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1987. — Vol. 178. — P. 31–52. — <https://doi.org/10.1017/s0022112087001101>.
- Morozov E. G. *Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling*. — Switzerland : Springer International Publishing, 2018. — <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73159-9>.
- Morozov E. G., Kozlov I. E., Shchuka S. A., et al. Internal tide in the Kara Gates Strait // *Oceanology*. — 2017. — Vol. 57, no. 1. — P. 8–18. — <https://doi.org/10.1134/s0001437017010106>.
- Morozov E. G., Parrilla-Barrera G., Velarde M. G., et al. The straits of Gibraltar and Kara Gates: a comparison of internal tides // *Oceanologica Acta*. — 2003. — Vol. 26, no. 3. — P. 231–241. — [https://doi.org/10.1016/s0399-1784\(03\)00023-9](https://doi.org/10.1016/s0399-1784(03)00023-9).
- Rippeth T. P., Vlasenko V., Stashchuk N., et al. Tidal Conversion and Mixing Poleward of the Critical Latitude (an Arctic Case Study) // *Geophysical Research Letters*. — 2017. — Vol. 44, no. 24. — P. 12349–12357. — <https://doi.org/10.1002/2017gl075310>.
- Svergun E. I., Konik A. A., Rodionov A. A., et al. Short-period variability of hydrophysical fields and processes in the Fourth Kuril Strait according to expedition studies // *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika*. — 2022. — Vol. 42, no. 4. — P. 53–61. — https://doi.org/10.37102/1992-4429_2022_42_04_05. — (In Russian).
- Svergun E. I., Zimin A. V., Atajanova O. A., et al. Variability of frontal zones and short-period internal waves in the Barents and Kara Seas from satellite observations during the warm period of 2007 // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2018. — Vol. 15, no. 4. — P. 181–188. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-181-188>. — (In Russian).
- Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., et al. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2003. — Vol. 50, no. 3. — P. 317–338. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(03)00018-9).
- Zimin A., Kozlov I. and Kopyshov I. Temperature, Salinity, Depth data in the Kara Gates Strait in July 2023, Arctic Ocean. — Version 1. — 2026. — <https://doi.org/10.17632/tr8fywy68r>. — In press.