



DOI [https://doi.org/10.59887/20736673.2026.19\(2\)-4](https://doi.org/10.59887/20736673.2026.19(2)-4)

EDN <https://elibrary.ru/jewjuuy>

УДК 551.468

© А. А. Родионов¹, М. К. Клеванная^{2*}, Р. Е. Ванкевич¹, Н. Е. Вольцингер¹, Д. А. Романенков¹, 2026

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

²ООО «Кардинал-софт», 192212, Санкт-Петербург, Белградская ул., д. 16

*marin-kl@ya.ru

Моделирование приливной динамики пролива Буссоль

Статья поступила в редакцию 09.07.2025, после доработки 20.05.2026, принята в печать 02.06.2026

Аннотация

Буссоль — самый глубокий и второй по ширине пролив в цепи островов Курильской гряды. Он доминирует в приливном транспорте из Охотского моря в Тихий океан, вентилируя его воды в слоях на глубине нескольких сотен метров. Горный рельеф пролива и его нерегулярная конфигурация определяют целесообразность моделирования в криволинейных гранично-согласованных координатах, отображающих физическую область краевой задачи на каноническую вычислительную область. В такой постановке выполнено высокоразрешающее моделирование чрезвычайно активной приливной динамики пролива в гидростатическом приближении. На открытых границах области задаются колебания уровня, вызванные суммарным приливом, содержащим 14 гармоник, в течение синодического месяца 29,5 суток. Начальные и граничные условия по стратификации используют данные цифрового климатического атласа. Анализируются рассчитанные приливные течения в разные фазы приливного цикла. Оценены максимальные за расчетный период скорости течения и средний транспорт воды через пролив. Результаты моделирования указывают на важную роль подводного вулканического массива в особенностях приливной динамики пролива. Полученные результаты реалистичны в той мере, какую предоставляет гидростатическая постановка краевой задачи. В этом отношении работу следует рассматривать как предварительный шаг к более репрезентативному и полному (негидростатическому) моделированию динамики пролива Буссоль.

Ключевые слова: пролив Буссоль, суммарный прилив, течения, краевая задача, гранично-криволинейные координаты, приливный транспорт воды

© А. А. Rodionov¹, М. К. Klevannaya^{2*}, Р. Е. Vankevich¹, Н. Е. Voltzinger¹, Д. А. Romanenkov¹, 2026

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia

²LLC CARDINAL-Soft, 16/2, Belgradskaya Str., St. Petersburg, 192212, Russia

*marin-kl@ya.ru

Modeling tidal dynamics of the Bussol Strait

Received 09.07.2025, Revised 20.05.2026, Accepted 02.06.2026

Abstract

The Bussol Strait is the deepest and second-widest strait in the Kuril Islands chain. It dominates in tidal water transport from the Sea of Okhotsk to the North Pacific Ocean, ventilating its waters in layers at depths of several hundred meters. The strait's mountainous topography and irregular configuration make it appropriate to model it using curvilinear boundary-fitted coordinates, which map the physical domain of the boundary-value problem onto the canonical computational domain. In this formula-

Ссылка для цитирования: Родионов А.А., Клеванная М.К., Ванкевич Р.Е., Вольцингер Н.Е., Романенков Д.А. Моделирование приливной динамики пролива Буссоль // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2026. Т. 19, № 2. С. 41–51. EDN JEWJUY. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-4](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-4)

For citation: Rodionov A.A., Klevannaya M.K., Vankevich R.E., Voltzinger N.E., Romanenkov D.A. Modeling tidal dynamics of the Bussol Strait. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2026;19(2);41–51. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-4](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-4)

tion, high-resolution modeling of the strait's extremely active tidal dynamics was performed in a hydrostatic approximation. At the open boundaries of the domain, sea level fluctuations are specified, caused by a total tide containing 14 harmonics over a synodic month of 29.5 days. The initial and boundary conditions for stratification are based on data from a digital climate atlas. Computed tidal currents are analyzed in different phases of the tidal cycle. The maximum current velocities and average water transport through the strait were estimated for the simulation period. The modeling results indicate the important role of the submarine volcanic massif in the strait's tidal dynamics. The obtained results are realistic to the extent permitted by the hydrostatic formulation of the boundary value problem. In this regard, this work should be considered a preliminary step toward a more representative and complete (non-hydrostatic) modeling of the Bussol Strait's dynamics.

Keywords: Bussol Strait, summary tide, currents, boundary problem, boundary-fitted coordinates, tidal water transport

1. Введение

Буссоль — крупнейший глубокий пролив центральной части Курильской островной гряды. Он расположен между о-ми Черные Братья и о. Броутона на юге-западе и о. Симушир на северо-востоке, соединяя Охотское море с материковым склоном северо-западной части Тихого океана (рис. 1). Длина пролива ~30 км, ширина ~68 км, глубина ~3000 м. Основной морфоструктурой пролива является вытянутый в северо-восточном направлении подводный вулканический массив Архангельского; размер массива в основании 39×22 км, высота свыше 2200 м, плоская вершина 4×21 км находится под водой на глубине ~525 м при крутизне склонов до 25° . В проливе расположены также 17 вулканических массивов и подводных вулканов высотой до 600 м [1].

Согласно историческим сведениям приливные явления в регионе Курильской гряды формируются приливными волнами, распространяющимися из Тихого океана с особенностями, вызванными дифракцией волн островами и их взаимодействием с донными неоднородностями [2, 3]. В приливной полосе спектра колебаний уровня и течений доминируют суточные волны с преобладанием лунно-солнечной K_1 и главной лунной O_1 гармоник с периодами соответственно $T = 23,93$ и $T = 26,87$ ч. Проявляются и полусуточные гармоники: главная лунная M_2 с $T = 12,42$ ч и главная солнечная S_2 с $T = 12,00$ ч. В Курильских проливах величины приливных колебаний уровня достигают до 1,7–2,5 м, а скорости приливных течений — 2,5 м/с и более.

Хотя проведение экспедиционных исследований в проливах затруднено сильными приливными течениями и сложной гидрометеорологической и навигационной обстановками, отдельные натурные наблюдения над течениями в проливе Буссоль существуют, однако достоверное выделение приливной компоненты из полученных рядов ограничено длиной этих рядов. По двум наблюдениям за 24-часовой период вертикальных профилей скорости в одной точке [4], расположенной к юго-западу от массива Архангельского у его подножия на глубине 1600 м, амплитуда суточного приливного течения увеличивалась с глубиной и в 2006 (2007) году достигла максимума в 1,3 м/с (1,6 м/с) на горизонтах 1200–1300 м. Амплитуда полусуточного приливного течения составляла 0,3–0,4 м/с. Фазы этих приливов практически одинаковы по вертикали. Среднее течение имеет двухслойную структуру: верхний слой движется в сторону Тихого океана, а нижний — в сторону Охотского моря, при этом нулевая скорость наблюдается на горизонте около 800 м. Вертикальная структура суточного приливного течения объясняется наличием топографически захваченных волн с суточным периодом вокруг подводной горы в проливе Буссоль. По более ранним данным 2001 г. [5] были оценены амплитуды продольной составляющей приливных течений на ряде станций, расположенных поперек пролива. Суточные (полусуточные) течения оказались близкими к значениям 0,6 (0,4) м/с во время сизигийного прилива за исключением нескольких станций, где суточные течения достигали 1 м/с. Средние течения имели двухслойную структуру в глубоководных проходах пролива со значениями от –0,6 до 0,6 м/с. Согласно другим 24-часовым измерениям, выполненным в 2011 г. в северо-восточной части пролива [6], скорости суточных течений у подножия горы имели амплитуды более 0,6 м/с, а скорости осредненных течений — менее 0,5 м/с при суммарных течениях до 1,5 м/с.

Водообмен через Курильские проливы активно влияет на изменчивость термохалинной структуры вод Охотского моря и северо-западной части Тихого океана. В водообмене доминируют проливы Буссоль и Крузенштерна [2–13]. Сильное приливное перемешивание вдоль островов формирует холодные, обогащенные кислородом и элементами первичной биопродукции воды Охотского моря, направленные через Буссоль и мелкие юго-западные проливы в океан, вентилируя его воды в слоях на глубине нескольких сотен метров. Динамический вклад прилива в водообмен оценивалась в [5, 11] по данным измеренных течений, а также по результатам модельных исследований [7–9]. Эти оценки сходятся в определении знака осредненного за сутки приливного потока, направленного из моря в океан, но сильно расходятся в его

величине для среднего значения потока от 2,4 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$) до 13 Св. Согласно модельным оценкам приливной транспорт пролива Буссоль достигает 30 Св при течениях, направленных в Охотское море, и 40 Св при течениях из него [8].

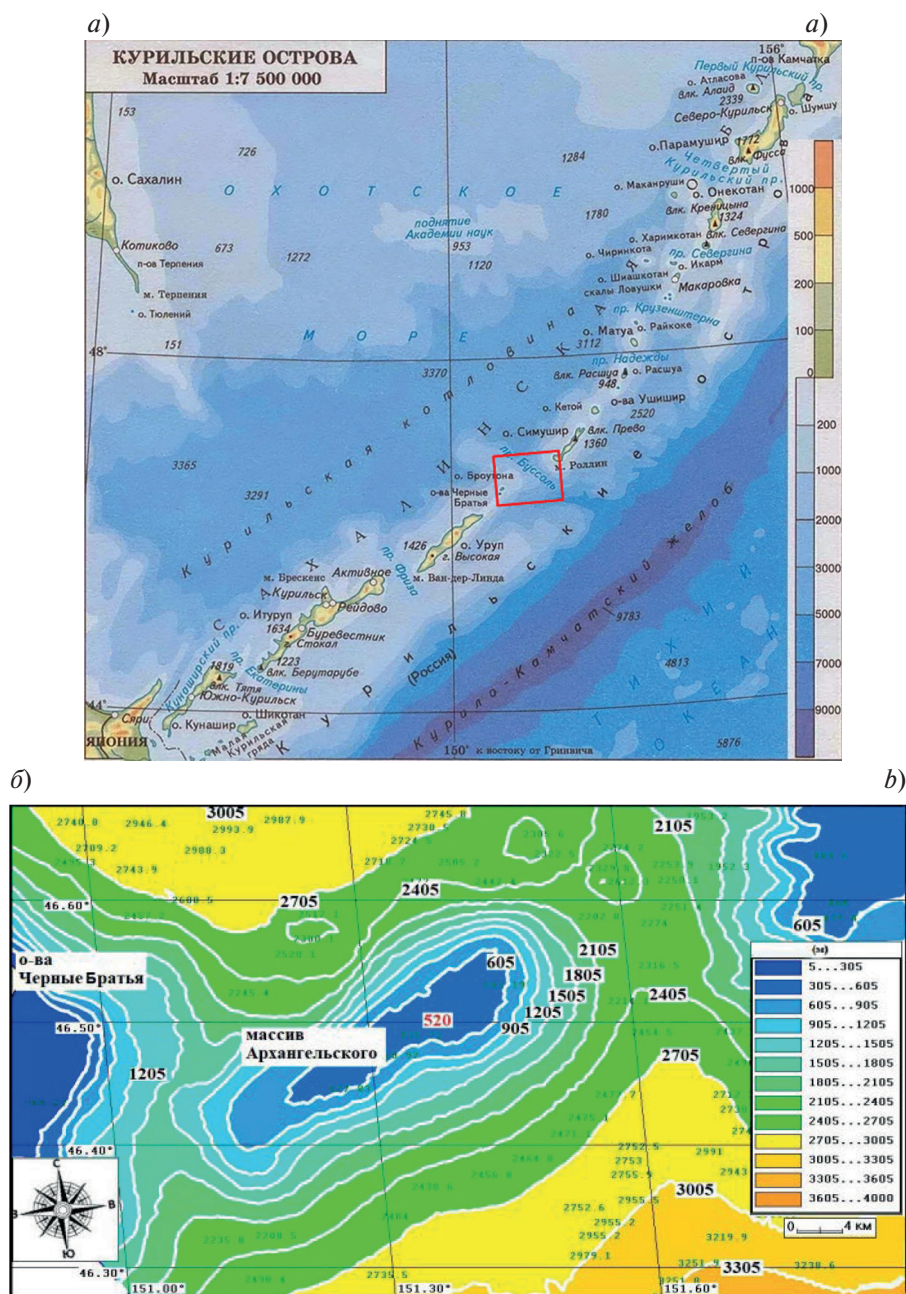


Рис. 1. Регион исследования: *a* — южная часть Охотского моря с проливами Курильских островов и прилегающей части Тихого океана; красной рамкой показана область моделирования; *b* — изобаты (м) в области моделирования, включающей пролив Буссоль

Fig. 1. Study region: *a* — southern part of the Sea of Okhotsk with straits of the Kuril Islands and adjacent Pacific Ocean; the red frame indicates the model domain; *b* — isobaths (m) in the model domain, including the Bussol Strait

Библиография, относящаяся к моделированию приливов в Курильских проливах, содержит рассмотрение динамики и структуры вод региона без их детализации внутри самих проливов, за исключением работ [14, 15]. В работах первоначального этапа моделирования акваторий, прилегающих к Курильским проливам, решалась задача для двумерных вертикально осредненных уравнений с доступным для того

времени разрешением сеточной области [7]. Приводятся результаты расчета волны K_1 в 2D области вокруг Курильских проливов на сетке 5×5 км, показана важная роль прилива и, в частности, топографических захваченных волн в водообмене бассейнов. Позднее для этой же области в [9] использовалась трехмерная негидростатическая модель с сеточным разрешением 700 м по горизонтали и минимальным значением 30 м по вертикали для изучения роли диапикнического перемешивания волны K_1 при переносе воды через проливы гряды. Полученное среднее значение приливного транспорта -26 Св (знак «минус» означает направление в Тихий океан) значительно выше, чем у других авторов. При этом примерно половина воды проходит через широкий и глубокий пролив Буссоль, где модельная скорость течения суточного прилива варьируется от 0,13 м/с в самой глубокой части пролива до 0,5 м/с над подводной горой. В работе [16] авторы исследовали генерацию, распространение и диссипацию внутренних волн, которые играют важную роль в передаче энергии от преобладающего баротропного прилива K_1 к процессам диапикнического перемешивания. Эти приливные процессы в проливах важны для формирования воды с низкой потенциальной завихренностью для промежуточного слоя прилегающей части Тихого океана. Численный расчет выполнен с использованием модели общей циркуляции в области близкой к области моделирования в [9], но с горизонтальным разрешением 1000 м и вертикальными шагами от 20 до 300 м. Средняя диапикническая диффузия в Курильских проливах составляет по модельным расчетам примерно $25 \times 10^{-4} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$, что примерно в три раза больше, чем считалось ранее.

Образование и дрейф мезомасштабных вихрей в проливах изучались в [17, 18] на основе наблюдений и в [19] с помощью моделирования. В [17] на основе спутниковых данных были отслежены вихри, проходящие через пролив Буссоль. Один из вихрей с холодным ядром образовался, по-видимому, локально вблизи пролива Буссоль в результате интенсивного притока воды с низкой потенциальной завихренностью, вытекающей через пролив из Охотского моря. Как показано в [18], вихри, проходя через проливы, взаимодействуют с сильными приливными течениями и изменяют свои характеристики. Эти течения были связаны с распространением бароклинных захваченных волн суточного периода на тихоокеанской стороне островов Итуруп и Уруп с областью источника волн вблизи оси пролива Буссоль. В работе [19] использовалась численная модель центральной части Курильской гряды в прямоугольной области 900×500 км с шагом 25 км в трехмерной гидростатической постановке с 37 уровнями по вертикали и постоянной глубиной. Было установлено, что повышенное приливное перемешивание в проливах является одним из механизмов генерации вихрей за счет бароклиной неустойчивости фронта приливного перемешивания.

Влияние приливных изменений вертикального перемешивания на термохалинную циркуляцию в Охотском море изучалось в [12]; область интегрирования включала обширные зоны Охотского моря и Тихого океана с разрешением 0,5 и 51 уровнями по вертикали с шагом от 1 до 1000 м. Расчет, проведенный на 60 лет, выявил различное влияние суточных, двухнедельных и полугодовых интервалов изменчивости перемешивания на термохалинную циркуляцию в море.

Особенности приливных колебаний уровня моря и приливных течений в проливах Курильских островов были исследованы с помощью численного моделирования на основе баротропной (двумерной) модели ADCIRC [8]. Расчеты приливов в Охотском море и прилегающей к проливам части Тихого океана были выполнены с использованием триангуляционной сетки с шагом $\sim 100\text{--}200$ м в небольших проливах, $\sim 2\text{--}4$ км в центральных частях крупных проливов и $15\text{--}20$ км в открытом море [8]. Анализ полученных данных показал, что максимальные скорости осредненных по глубине течений достигают 4,5 м/с. Наибольшие скорости были зафиксированы в проливах Крузенштерна, Фриза и Среднего. Важным фактором, влияющим на скорость течений в проливе Буссоль, является наличие большого мелководного участка около о. Симушир, где максимальные скорости течений во время тропического прилива в обе стороны достигают 1,75 м/с. В большей части пролива скорости не превышают 0,5 м/с, что связано с глубинами моря, достигающими более 2,5 км. Значения скоростей до 1,75 м/с наблюдаются также в юго-восточной части пролива, что также связано с уменьшением глубины моря. Расчеты показали, что при использовании двумерной модели максимальные значения приливного транспорта воды приходятся на пролив Буссоль, достигая ~ 40 Св.

Результаты моделирования приливной динамики Курильских проливов с акцентом на Четвертый пролив представлены в [14–15]. Решение в области Четвертого пролива в гидростатической (Гс) и негидростатической (Нг) постановках получено методом гранично-согласованных координат на сетке с шагами $\Delta_{\min} = 245$ м, $\Delta_{\max} = 1050$ м по горизонтали, 71 уровнем по вертикали и шагом по времени $\tau = 35$ с. Расчет обтекания подводной горы в проливе выявил большие градиенты горизонтальной скорости по его склонам, что соответствует крутизне горы через параметр $\varepsilon = \frac{H_0}{L_0} = \tan \alpha \sim 0,3$, где H_0 и L_0 — характерные вертикальный

и горизонтальный масштабы рельефа соответственно. Заметим, что ε следует понимать в связном виде, ибо понятие характерной глубины на горном рельефе лишено смысла [20–21]. При таких значениях параметра ε плоская дивергенция скорости в уравнении неразрывности на несколько порядков выше ее обычных значений на относительно ровном дне, и градиент вертикальной скорости находится с ней в одном порядке. Это приводит к высоким значениям вертикальной скорости на крутых подводных склонах. Сравнение решений в Гс и Нг постановках [15, 20, 21] подтвердило, что учет динамической компоненты давления на горном рельефе необходим для репрезентативного моделирования приливной динамики на крутом подводном склоне, как и было установлено ранее в [22, 23].

Из приведенного обзора видно, что работы по приливной динамике Курильского региона сформировали, в основном, два направления: изучение бароклинной, а также крупномасштабной вихревой структуры вод региона и вопросы водообмена между Охотским морем и Северным Тихим океаном через проливы Курильской гряды. Работы по высокоразрешающему моделированию динамики внутри самих проливов, насколько известно, отсутствуют, за исключением, как отмечалось, работ [14, 15], относящихся к Четвертому проливу, на примере которого видна вся сложность построения адекватной модели пролива, содержащего подводный порог высотой несколько сотен метров. В отношении пролива Буссоль, с его огромным и крутым вулканическим массивом высотой свыше 2200 м и интенсивной приливной и вихревой динамикой, вычислительные затраты и трудности реализации модели намного выше.

Задача настоящего исследования состояла в построении модели пролива Буссоль, апробации ее в гидростатической постановке и выполнении расчета приливной динамики с оценкой приливного транспорта воды через пролив.

В следующем параграфе кратко дана информация о постановке задачи, методе решения, базе данных и параметрах модели. В п. 3 содержатся результаты моделирования динамики пролива. В п. 4 обсуждаются результаты и формулируются выводы работы.

2. Модель пролива, база данных и параметры расчета

Постановка трехмерной краевой задачи динамики пролива в декартовых координатах приведена, например, в [20]. В полной постановке задача в трехмерной области при спрямляющем преобразовании координат и численный метод решения в гидростатической постановке даны в [14, 21]. Реализация модели в криволинейных гранично-согласованных координатах использовала программный комплекс CARDINAL [24].

Область модели и поле глубин представлены на рис. 1, б. Береговой контур взят с веб-ресурса Google Earth Pro¹, поле глубин — с сайта NOAA Bathymetric Data Viewer². Область пролива Буссоль ограничена в продольном направлении южной подобластью Охотского моря и материковой кромкой Тихого океана. Площадь модельной акватории составила 8789 км²; средняя глубина — $\bar{h} = 2376$ м, $h_{\max} \approx 4000$ м. Расчеты выполнены с шагом по времени $\tau = 2,2$ с на сетке, содержащей 111 531 узлов со средним шагом $\Delta = 609$ м, и минимальным шагом $\Delta_{\min} = 247$ м. По вертикали используются 30 неравномерных уровней с повышенным разрешением в придонном и поверхностном слоях при $\Delta_{z\min} = 5$ см, $\Delta_{z\max} = 312$ м.

На открытых границах области задаются колебания уровня, вызванные суммарным приливом, содержащим 14 гармоник, в течение синодического месяца 29,5 суток с 01.09.2022 по 30.09.2022 по результатам предвычислений программным комплексом TMD³.

3. Результаты

Рассмотрим результаты моделирования динамики пролива в Гс приближении. Как указано во Введении, такая задача на горном рельефе не вполне репрезентативна, однако представляет в известной мере интерес как экономичное по вычислительным затратам приближение к решению в Нг постановке.

На рис. 1, б показаны изобаты пролива, в котором доминирует крутой и высокий вулканический массив Архангельского с глубиной его вершины ~ 525 м, расположенный между двумя глубоководными проходами с глубинами более 2200 м. Такая морфометрия пролива предопределяет заметно неоднородную картину приливных течений, зависящую от фазы колебаний (рис. 2). Фаза колебаний считается приливом, когда

¹ Google Earth Pro. URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/> (дата обращения: 12.02.2025)

² NOAA Bathymetric Data Viewer. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/> (дата обращения: 20.03.2025)

³ Программное обеспечение для Исследований Земли и Космоса.

URL: <https://www.esr.org/data-products/polar-tide-models/tmd-software/> (дата обращения: 15.04.2025)

уровень моря в проливе близок к максимальным значениям в суточном цикле (условно «океанский» прилив), и — отливом, когда уровень находится на минимальном значении в этом же цикле (условно «морской» прилив).

Рис. 2, а показывает колебания уровня, соответствующие максимальной суммарной приливной волне в интервале синодического месяца. На рис. 2, б и в представлены приливные течения на поверхности

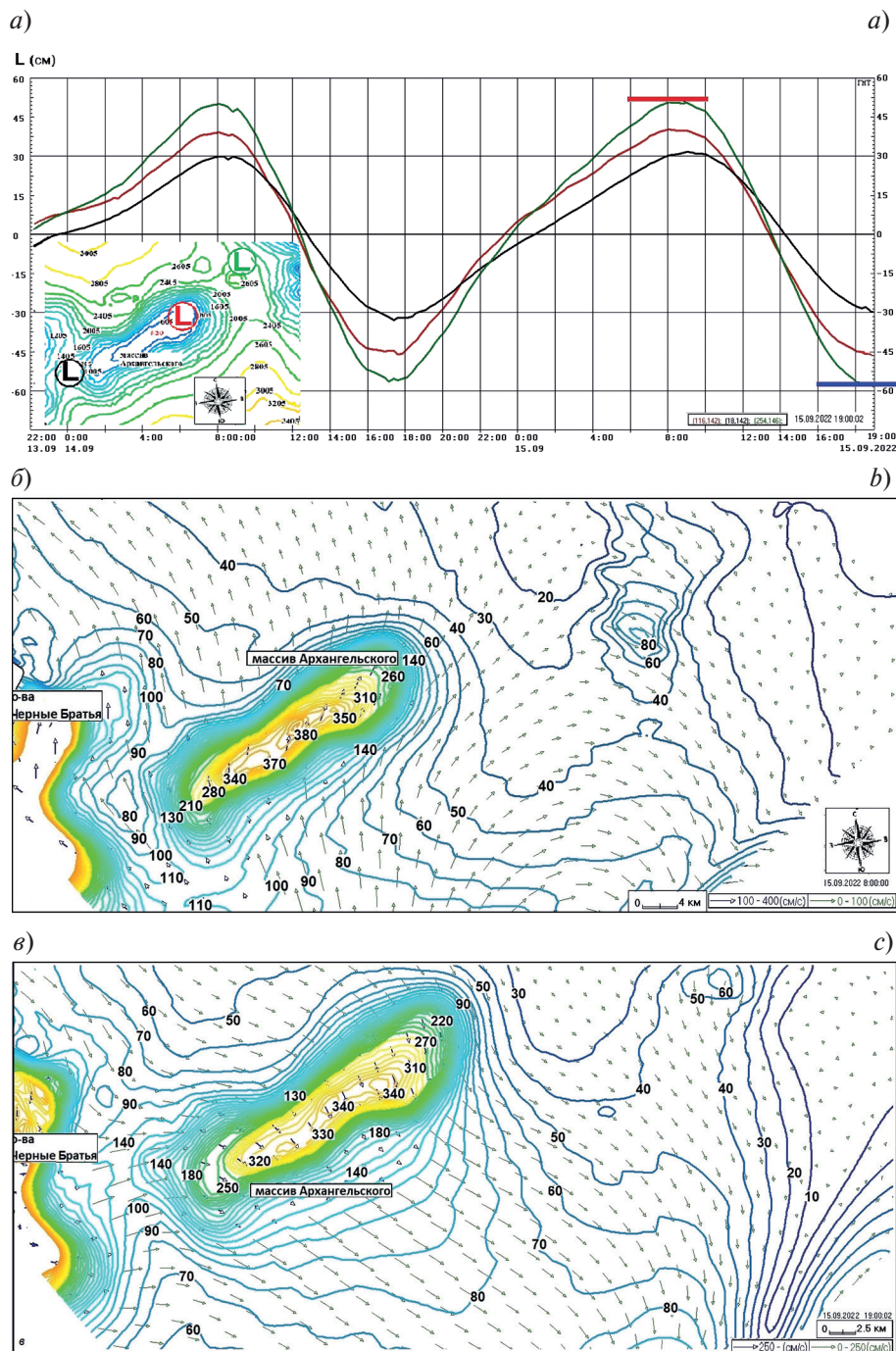


Рис. 2. Приливной уровень и течения на поверхности моря: а — ход уровня 13–15.09.2022 в трех пунктах, показанных разным цветом на врезке; б — векторное поле и изолинии величины скорости течений (см/с) в момент максимума приливного уровня (красная жирная линия на рис. 2, а); в-векторное поле и изолинии величины скорости течений в момент минимума приливного уровня (синяя жирная линия на рис. 2, а)

Fig. 2. Tidal elevation and sea surface currents: а — tidal elevation 13–15.09.2022 at three points shown in different colors in the inset; б — vector field and isolines of current velocity (cm/s) at the maximum tidal level (red bold line in Fig. 2a); в — vector field and isolines of current velocity at minimum tidal elevation (blue bold line in Fig. 2a)

моря в моменты прилива и отлива соответственно. В фазу «океанского» прилива течения в створе островов Симушир-Черные Братья ориентированы в направлении Охотского моря, а над массивом Архангельского и прилегающей к проливу акватории Тихого океана они заметно отклоняются к востоку, создавая сильную завихренность вблизи южной границы модельной области (рис. 2, б). В момент минимального приливного уровня (рис. 2, в) течения направлены преимущественно в Тихий океан, однако в юго-западном проходе сильные приливные течения имеют ориентацию поперек пролива. Это объяснимо, принимая во внимание наличие в этой части пролива значительного бокового уклона уровня в фазу отлива (рис. 2, а, черная и красная кривые). Скорость приливного течения непосредственно над вершиной возвышенности превышает 3 м/с, а на склонах массива она около 2 м/с. Над вулканическим массивом в фазе прилива скорости на несколько десятков см/с больше, чем в фазе отлива. Такое различие между течениями на поверхности, как показывают расчеты, присутствует постоянно. Таким образом, моделирование приливной динамики в проливе Буссоль предсказывает, что приливные течения здесь не имеют выраженного реверсивного характера. Это, возможно, отличает Буссоль от других проливов, где эффект реверсивности подтверждается измерениями течений на суточных станциях [2, 3].

Представляет интерес оценить экстремальные течения по результатам моделирования. На рис. 3 приведены изолинии максимальных значений скорости в вертикальной эпюре течений каждого расчетного узла за весь период расчета. Непосредственно над вершиной массива Архангельского сила течений превышает 4 м/с, у подножия горы она около 2 м/с. Поле максимальных течений указывает на важную роль массива как подводного порога, препятствующего распространению приливной волны.

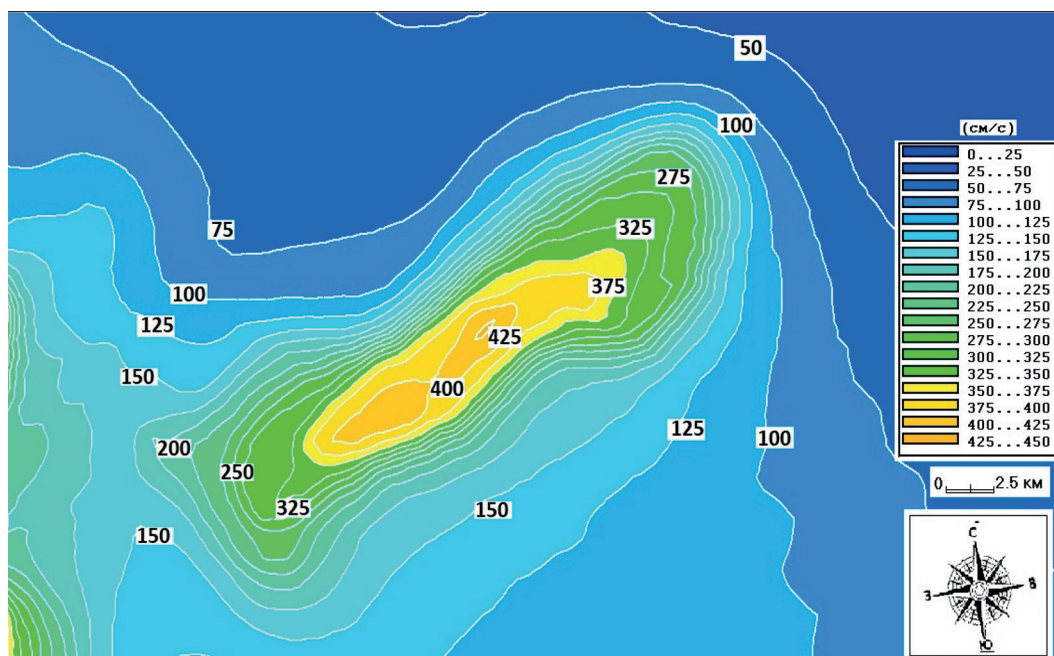


Рис. 3. Изолинии максимальной горизонтальной скорости (см/с) в районе подводного вулканического массива Архангельского за весь период расчета

Fig. 3. Isolines of maximum horizontal velocity (cm/s) in area of the Arkhangelsky submarine volcanic massif for the entire model period

Численные эксперименты позволяют оценить результирующий транспорт воды через пролив за счет приливных течений, определяемый как

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \int_S \mathbf{v}(x, y, t) \cdot d\mathbf{S} dt,$$

где $\mathbf{v}(x, y, t)$ — скорость течения по нормали к вертикальному сечению, T — период расчета, кратный периодам всех составляющих гармоник суммарного прилива, приливного движения, $d\mathbf{S}$ — площадь вертикального элемента в каждом расчетном узле, S — суммарная площадь вертикального сечения.

Расчет транспорта, индуцированного суммарным приливом, через сечение пролива в створе островов Симушир-Черные Братья с площадью $17,3 \times 10^7 \text{ м}^2$ дает его среднее за период моделирования значение $\bar{Q} = 0,42 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ (или 0,42 Св) с максимальными значениями 103 Св в фазу отлива и до 90 Св в фазу прилива.

4. Обсуждение и выводы

Пролив Буссоль, как и многие проливы Курильской гряды, имеет незначительные участки твердых береговых границ: на западе — оконечность одного из о-вов Черные Братья и о. Броутона, а на северо-востоке — оконечность о. Симушир, причем ширина пролива ~ 70 км, вдвое больше его длины. Воды на боковых открытых границах Буссоли сливаются с водами соседних проливов. В такой ситуации область модели пролива задается в известной мере произвольно, следуя, где возможно, ее топографии.

Другой особенностью пролива является высокий, обширный и крутой подводный вулканический массив, расположенный в его центральной части; массив имеет вид усеченной пирамиды высотой свыше 2200 м, при крутизне склонов до 25° , и с плоской вершиной 4×21 км, отстоящей от поверхности воды на ~ 525 м. Оценка параметра $\varepsilon = \frac{H_0}{L_0} \sim 0,43$ подчеркивает необходимость реализации краевой задачи динамики вод в репрезентативной Нг постановке и параллелизации вычислений.

Оказалось, однако, что Гс приближение с очень малым шагом 2,2 с воспроизводит физически обоснованное решение относительно полей скорости течений и уровня суммарного прилива с учетом стратификации пролива.

Отличительной чертой пролива является чрезвычайная интенсивность его приливной динамики, определяемой взаимодействием океанского прилива с островами и подводным вулканическим массивом. Для течений в проливе присущи отклонение от реверсивного режима и существенное неравенство в значениях скоростей в фазу прилива и отлива. Максимальные течения над подводной горой достигают значений 4,25 м/с. Учитывая данные немногочисленных наблюдений в проливах Курильской гряды и результаты модельных исследований, обзор которых приведен во Введении, такие скорости в проливе возможны.

По расчетам среднее значение приливного транспорта воды через вертикальное сечение поперек пролива Буссоль имеет порядок 1 Св. Эта оценка минимальна из известных значений (см. Введение), однако учитывая разброс в наблюдаемых и модельных данных о течениях во всех проливах (по которым и оценивается перенос воды), такую оценку еще нельзя считать окончательной. В то же время направление среднего переноса из моря в океан совпадает с общепринятыми представлениями, а экстремумы транспорта, генерируемые суммарным приливом, в отдельные интервалы синодического периода на два порядка выше среднего значения. Заметим, что этот постоянный средний транспорт воды из моря и определяет, отчасти, интегральный перенос вод в прилегающую часть Тихого океана, трансформируя водные массы на значительном удалении от пролива.

Полученные результаты реалистичны в той мере, какую предоставляет Гс постановка краевой задачи. В этом отношении работу следует рассматривать как предварительный шаг к более репрезентативному и полному Нг моделированию динамики пролива Буссоль.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0028).

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No FMWE-2024-0028).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Литература

1. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического массива Архангельского (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Т. 44, № 4. С. 35–50. EDN TAYJJW. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-35-50>
2. Богданов К.Т., Мороз В.В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 2000. 152 с. EDN UTFIR.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 9. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Глуховского Б.Х., Гоптарева Н.П., Терзиева Ф.С. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 343 с.
4. Yagi M., Yasuda I. Deep intense vertical mixing in the Bussol' Strait // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39, L01602. EDN PHBUNT. <https://doi.org/10.1029/2011GL050349>
5. Katsumata K., Ohshima K.I., Kono T., Itoh M., Yasuda I., Volkov Y., Wakatsuchi M. Water exchange and tidal currents through the Bussol Strait revealed by direct current measurements // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, C09S06. EDN LIUCVH. <https://doi.org/10.1029/2003JC001864>
6. Tanaka Y., Yasuda I., Osafune S., Tanaka T., Nishioka J., Volkov Y.N. Internal tides and turbulent mixing observed in the Bussol Strait // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 126. P. 98–108. EDN UEPHFX. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.009>
7. Nakamura T., Awaji T., Hatayama T., Kazunori A. Tidal exchange through Kuril Straits // Journal of Physical Oceanography. 2000. Vol. 30, No. 6. P. 1622–1644. EDN LQFCMX. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)0302.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)0302.0.CO;2)
8. Ильин В.И., Архипкин В.С. Особенности приливного водообмена в Курильских проливах по данным моделирования // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. Т. 79, № 4. С. 44–54. EDN ORFGEJ. <https://doi.org/10.55959/msu0579-9414.5.79.4.4>
9. Nakamura T., Awaji T. Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, C09S07. P. 1–22. EDN MJDUKP. <https://doi.org/10.1029/2003JC001850>
10. Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S., Wakatsuchi M. Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2010. Vol. 57, No. 13–14. P. 1247–1256. EDN MYEUNB. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.12.012>
11. Katsumata K., Yasuda I. Estimates of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific // Journal of Oceanography. 2010. Vol. 66, No. 4. P. 489–504. EDN MYEUNL. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0041-9>
12. Nakamura T., Takeuchi Y., Uchimoto K., Mitsudera H. Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing in the Kuril Straits on the thermohaline circulation originating in the Okhotsk Sea // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 126. P. 135–145. EDN UQGVYR. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.05.007>
13. Kida S., Qiu B. An exchange flow between the Okhotsk Sea and the North Pacific driven by the East Kamchatka Current // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118, No. 12. P. 6747–6758. EDN DIFURI. <https://doi.org/10.1002/2013JC009464>
14. Родионов А.А., Андросов А.А., Фофонова В.В., Кузнецов И.С., Вольцингер Н.Е. Моделирование приливной динамики северных проливов Курильской гряды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 3. С. 20–34. EDN KXDQML. <https://doi.org/10.7868/S2073667321030023>
15. Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Клеванный М.К., Вольцингер Н.Е. Моделирование баротропной приливной динамики Курильского региона // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 23–38. EDN HUKDKU. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(1\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(1)-2)
16. Tanaka Y., Hibiya T., Niwa Y., Iwamae N. Numerical study of K1 internal tides in the Kuril straits // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2010. Vol. 115, C09016. EDN TZTBFY. <https://doi.org/10.1029/2009JC005903>
17. Rabinovich A.B., Thomson R.E., Bograd S.J. Drifter observations of anticyclonic eddies near Bussol' Strait, the Kuril Islands // Journal of Oceanography. 2002. Vol. 58, No. 5. P. 661–671. EDN LHKYFH. <https://doi.org/10.1023/A:1022890222516>
18. Rabinovich A.B., Thomson R.E. Evidence of diurnal shelf waves in satellite-tracked drifter trajectories off the Kuril Islands // Journal of Physical Oceanography. 2001. Vol. 31, No. 9. P. 2650–2668. EDN LSQKQD. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)0312.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)0312.0.CO;2)
19. Ohshima K.I., Fukamachi Y., Mutoh T., et al. A generation mechanism for mesoscale eddies in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea: Baroclinic instability caused by enhanced tidal mixing // Journal of Oceanography. 2005. Vol. 61, No. 2. P. 247–260. EDN MJDUKF. <https://doi.org/10.1007/s10872-005-0035-1>
20. Вольцингер Н.Е., Андросов А.А., Клеванный М.К., Сафрай А.С. Океанологические модели негидростатической динамики. Обзор // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 1. С. 3–20. EDN YPJHGX. <https://doi.org/10.7868/S207366731801001X>

21. Вольцингер Н.Е., Андросов А.А. Моделирование длинноволновой негидростатической динамики на горном рельефе. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2024. 168 с.
22. Xing J., Davies A.M. On the importance of non-hydrostatic processes in determining tidally induced mixing in sill regions // *Continental Shelf Research*. 2007. Vol. 27, No. 16. P. 2162–2185. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.05.012>
23. Mahadevan A., Oliger J., Street R. A non-hydrostatic mesoscale ocean model. Part 1, 2 // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, No. 9. P. 1868–1900.
24. Клеванный К.А., Смирнова Е.В. Использование программного комплекса CARDINAL // *Журнал Университета водных коммуникаций*. 2009. Вып. 1. С. 153–162. EDN MTBMSR

References

1. Blokh YuI, Bondarenko VI, Dolgal AS, et al. Comprehensive geological and geophysical studies of the Arkhangelsky submarine volcanic massif (Kuril Island Arc). *Vestnik KRAUNTs. Seriya: Nauki o Zemle*. 2019;44(4):35–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-35-50>
2. Bogdanov KT, Moroz VV. Structure, dynamics and hydrological-acoustic characteristics of the waters of the Kuril Straits. Vladivostok: Dalnauka; 2000. 152 p. (In Russ.)
3. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 9. The Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological conditions. St Petersburg: Gidrometeoizdat; 1998. 343 p. (In Russ.)
4. Yagi M, Yasuda I. Deep intense vertical mixing in the Bussol' Strait. *Geophysical Research Letters*. 2012;39: L01602. <https://doi.org/10.1029/2011GL050349>
5. Katsumata K, Ohshima KI, Kono T, et al. Water exchange and tidal currents through the Bussol Strait revealed by direct current measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004;109: C09S06. <https://doi.org/10.1029/2003JC001864>
6. Tanaka Y, Yasuda I, Osafune S, et al. Internal tides and turbulent mixing observed in the Bussol Strait. *Progress in Oceanography*. 2014;126:98–108. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.009>
7. Nakamura T, Awaji T, Hatayama T, Kazunori A. Tidal exchange through Kuril Straits. *Journal of Physical Oceanography*. 2000;30(6):1622–1644. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)0302.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)0302.0.CO;2)
8. Ilyin VI, Arkhipkin VS. Features of tidal water exchange in the Kuril Straits based on modeling data. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2024;79(4):44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/msu0579-9414.5.79.4.4>
9. Nakamura T, Awaji T. Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004;109: C09S07:1–22. <https://doi.org/10.1029/2003JC001850>
10. Ohshima KI, Nakanowatari T, Riser S, Wakatsuchi M. Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2010;57(13–14):1247–1256. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.12.012>
11. Katsumata K., Yasuda I. Estimates of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific. *Journal of Oceanography*. 2010;66(4):489–504. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0041-9>
12. Nakamura T, Takeuchi Y, Uchimoto K, Mitsudera H. Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing in the Kuril Straits on the thermohaline circulation originating in the *Okhotsk Sea*. *Progress in Oceanography*. 2014;126:135–145. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.05.007>
13. Kida S, Qiu B. An exchange flow between the Okhotsk Sea and the North Pacific driven by the East Kamchatka Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013;118(12):6747–6758. <https://doi.org/10.1002/2013JC009464>
14. Rodionov AA, Androsov AA, Fofonova VV, Kuznetsov IS, Voltzinger NE. Modeling the tidal dynamics of the northern straits of the Kuril Ridge. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021;14(3):20–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S2073667321030023>
15. Rodionov AA, Vankevich RE, Klevannaya MK, Voltzinger NE. Modeling the barotropic tidal dynamics of the Kuril region. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(1):23–38. (In Russ.). [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(1\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(1)-2)
16. Tanaka Y, Hibiya T, Niwa Y, Iwamae N. Numerical study of K1 internal tides in the Kuril straits. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010;115: C09016. <https://doi.org/10.1029/2009JC005903>
17. Rabinovich AB, Thomson RE, Bograd SJ. Drifter observations of anticyclonic eddies near Bussol' Strait, the Kuril Islands. *Journal of Oceanography*. 2002;58(5):661–671. <https://doi.org/10.1023/A:1022890222516>
18. Rabinovich AB, Thomson RE. Evidence of diurnal shelf waves in satellite-tracked drifter trajectories off the Kuril Islands. *Journal of Physical Oceanography*. 2001;31(9):2650–2668. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)0312.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)0312.0.CO;2)
19. Ohshima KI, Fukamachi Y, Mutoh T., et al. A generation mechanism for mesoscale eddies in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea: Baroclinic instability caused by enhanced tidal mixing. *Journal of Oceanography*. 2005;61(2):247–260. <https://doi.org/10.1007/s10872-005-0035-1>

20. Voltzinger NE, Androsov AA, Klevanny KA, Safrai AS. Oceanological Models of Non Hydrostatic Dynamics: A Review. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018;11(1):3–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S207366731801001X>
21. Voltsinger NE, Androsov AA. Modeling of long-wave non-hydrostatic dynamics over mountainous topography. St Petersburg: Politekh-Press; 2024. 168 p. (In Russ.)
22. Xing J, Davies AM. On the importance of non-hydrostatic processes in determining tidally induced mixing in sill regions. *Continental Shelf Research*. 2007;27(16):2162–2185. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.05.012>
23. Mahadevan A, Olinger J, Street R. A non-hydrostatic mesoscale ocean model. Part 1, 2. *Journal of Physical Oceanography*. 1996;26(9):1868–1900.
24. Klevanny KA, Smirnova EV. Using the CARDINAL software package. *Zhurnal Universiteta Vodnykh Kommunikatsiy*. 2009;(1):153–162. (In Russ.)

Об авторах

РОДИОНОВ Анатолий Александрович, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» ИО РАН, член-корреспондент РАН, ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, SPIN-код: 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru

КЛЕВАННАЯ Марина Константиновна, учредитель ООО «Кардинал-софт», e-mail: marin-kl@ya.ru

ВАНКЕВИЧ Роман Евгеньевич, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-3891-3396, Scopus AuthorID: 25642198100, WoS ResearcherID: M-3215-2013, SPIN-код: 2295-6136, e-mail: rvankevich@mail.ru

ВОЛЬЦИНГЕР Наум Евсеевич, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, Scopus AuthorID: 6603260554, SPIN-код: 3243-7163, e-mail: lenna30@mail.ru

РОМАНЕНКОВ Дмитрий Анатольевич, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, ORCID: 0009-0005-0374-486X, WoS ResearcherID: U8280-2017, Scopus AuthorID: 6506855768, SPIN-код (РИНЦ): 4872-3349, e-mail: dmromanenkov@yandex.ru