

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.46

ОСОБЕННОСТИ ПРИЛИВНОГО ВОДООБМЕНА В КУРИЛЬСКИХ ПРОЛИВАХ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.И. Ильин¹, В.С. Архипкин²

^{1,2} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра океанологии

¹ Студент; e-mail: vsevolod_ilin@mail.ru

² Доц., канд. геогр. наук; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

Исследованы особенности приливных колебаний уровня моря и приливных течений в проливах Курильских островов с помощью численного моделирования. Для сравнения параметров тропических и экваториальных приливов были выбраны два временных промежутка: 02.06.1977–03.06.1977 и 11.10.1977–12.10.1977. Проведена верификация результатов моделирования с натурными данными. Получено, что проливы северо-восточной части Курильской гряды имеют смешанный тип приливов с преобладанием суточного хода, а в юго-западной части начинает преобладать полусуточный ход. Наибольшие величины приливов (до 2,5–3 м) в исследуемый период наблюдались 02.06.1977 у п-ва Камчатка и у о. Хоккайдо, а также у крупных островов Курильской гряды. Было выделено четыре основных периода колебаний уровня 12, 12,4, 24 и 25,8 часов, что соответствует гармоникам S2, M2, K1, O1. 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. Оценки приливного потока показали, что в проливах с меньшими средними глубинами во время тропического прилива более ярко выражены полусуточные колебания. В более глубоких проливах полусуточные колебания при тропических приливах проявляются очень слабо или вообще отсутствуют, примером является пролив Буссоль. Рассчитано, что при использовании двумерной модели максимальные значения приливного потока наблюдаются в проливе Буссоль, достигая ~40 Свердрупов (Св).

Ключевые слова: Курильские острова, приливы, приливные течения, проливы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.4

ВВЕДЕНИЕ

Гряда Курильских островов – это самая северная из трех островных дуг внешнего берега восточной Азии. Она представляет собой дугу длиной 1200 км, выпуклую к Тихому океану и протянувшуюся от острова Хоккайдо к полуострову Камчатка, омываемую Тихим океаном и Охотским морем.

Общее количество основных проливов Курильской гряды ~28. Наиболее широкими и глубокими являются проливы Крузенштерна и Буссоль [Соловьев, 1947].

Проливом называют сравнительное узкое водное пространство между смежными районами Мирового океана. Проливы могут быть длинными и короткими, широкими и узкими, глубокими и мелкими [Зубов, 1956].

Проливы разделяются по их главному географическому значению [Зубов, 1956]:

– соединяющие между собой отдельные районы Мирового океана;

– отделяющие острова или группы островов от материков или других островов;

– разделяющие группы островов или отдельные острова.

По направлению проливы делятся также на:

– подольные, тянущиеся вдоль продольных берегов;

– поперечные, пересекающие горные хребты и складки земной коры;

– нейтральные, расположенные среди островов без резко выраженного соответствия с направлением складчатости.

Если применять данную классификацию к проливам Курильских островов, то видно, что по своему главному географическому значению их можно отнести ко всем трем пунктам. Они соединяют отдельные районы Мирового океана (Охотское море и Тихий океан), отделяют материк от островов и разделяют отдельные острова. Если же смотреть по их направлению, то они преимущественно поперечные.

Курильские острова имеют крайне важное экономическое значение: по ним определяется граница, соединяющая воды Тихого океана и Охотского моря. Это делает знания о проливах крайне важными для судоходства. Также район является очень значимой экономической зоной для России. Он богат как биологическими ресурсами, благодаря чему в нем активно идет промысел, так и полезными ископаемыми, для добычи которых результаты данного исследования очень актуальны.

Анализ имеющихся литературных источников по выбранной теме показал, что особенности приливных колебаний уровня и приливных течений в проливах Курильской гряды недостаточно подробно изучены [Залогин, Косарев, 1999; Родионов и др., 2021]. Выявлено, что проливы Курильской гряды изучались либо отдельно, либо в составе небольших групп [Леонов, 1960; Зырянов, 1974; Talley, Nagata, 1995]. В энциклопедических работах [Гидрометеорология..., 1998] не рассматриваются локальные особенности проливов (кроме самых крупных) и нет указаний на источники данных. Кроме этого, показано, что при моделировании приливов использовались расчетные сетки с большим пространственным шагом, менее детализированная цифровая модель рельефа дна, а многие небольшие проливы вообще не учитывались [Зырянов, 1974; Nakamura et al., 2014; Родионов и др., 2021]. В некоторых работах для моделирования брались только отдельные приливные гармоники, в данной работе использовалось восемь [Nakamura et al., 2014].

Учитывая, что проведение натурных исследований в проливах затруднено сильными приливными течениями и большими перепадами глубин, численное моделирование является одним из немногих доступных методов изучения особенностей приливного водообмена в проливах.

Цель работы – исследование особенностей приливных колебаний уровня моря и приливных течений в проливах Курильской гряды по данным численного моделирования. В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- создание цифровой модели рельефа дна Курильских островов высокого разрешения;
- создание массивов натурных данных по уровню моря в регионе;
- адаптация модели ADCIRC к району исследования – создание расчетной сетки и выбор граничных условий;
- проведение численных расчетов по модели ADCIRC;
- сравнение данных модели с натурными данными;
- выявление особенностей приливных колебаний уровня в разных проливах Курильской гряды и приливных течений;

– расчет приливного потока в течение приливного цикла с шагом в один час.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для верификации результатов моделирования были взяты данные натурных измерений уровня с восьми прибрежных морских станций за 1977 г.: Охотск, Поронайск, Корсаков, Южно-Курильск, Буревестник, Курильск, Матуа, Северо-Курильск. Они расположены в разных частях Курильской гряды и Охотского моря. Выбор года обусловлен наличием наиболее полных рядов данных по всем станциям. Временной шаг измерений уровня воды составляет один час [ЕСИМО, 2022].

В связи с наличием расчетной сетки с открытой границей необходимо было задать на ней граничные условия, в качестве которых выступили приливные колебания уровня, которые рассчитывались по заданным гармоническим параметрам, взятым из глобальной модели приливов FES2014. Ее основная задача – динамическое моделирование океанских приливов для всего Мирового океана с наибольшей возможной точностью [Lyard et al., 2021].

Для моделирования приливных колебаний уровня и приливных течений необходима цифровая модель рельефа дна, включающая Татарский пролив, Охотское море и прилегающие к Курильской гряде районы Тихого океана. Для всего района моделирования, за исключением Курильских проливов, для создания цифровой модели рельефа использовалась база батиметрических данных GEBCO-2022 с шагом 15 угловых секунд [GEBCO..., 2023]. Для районов Курильских островов рельеф дна был получен с помощью оцифровки навигационных карт от УНиОМО РФ масштабом 1 : 250 000 [Электронный..., 2023]. После объединения базы GEBCO-2022 с данными оцифровки карт получена цифровая модель рельефа высокого разрешения для исследуемой акватории.

Для проведения численных экспериментов использовалась модель ADCIRC. Она представляет собой численную океаническую модель, используемую для расчета циркуляции воды и колебаний уровня моря, и решает полные уравнения движения для движущейся жидкости на врачающейся Земле. Модельные уравнения были сформулированы с использованием приближений гидростатического давления и Буссинеска. В модели используется метод конечных элементов для дискретизации уравнения по пространственным переменным, что позволяет использовать неравномерные триангуляционные сетки. Приближение по времени осуществляется методом конечных разностей. Модель учитывает такие параметры, как сила Кориолиса, атмосферное давление, напряжение ветра, приливный потенциал

и многие другие. Есть два варианта использования модели ADCIRC. Первый – 2DDI, в виде двумерной модели, где уравнение движения интегрировано по глубине (баротропная модель). Второй – 3D, в качестве трехмерной (баротропная и бароклинная модели).

Модель ADCIRC использует триангуляционные сетки с изменяющимися размерами элементов [Luettich, Westerink, 2004]. Сетку можно построить с помощью нескольких методов: по узлам, расположенным на контуре расчетной области; пропорционально глубине моря; пропорционально уклону дна или градиенту уклона дна. Из-за большого количества островов и проливов в Курильской гряде, а также из-за сложной береговой линии был выбран метод по узлам. С помощью этого метода в программе Surface Modelling System была создана расчетная сетка с шагом \sim 100–200 м в небольших проливах, в центральных частях крупных проливов \sim 2–4 км и 15–20 км в открытом море. Полученная сетка содержит в себе \sim 98 000 расчетных узлов, охватывает северную часть Татарского пролива, Охотское море и прилегающие к Курильским островам акватории Тихого океана (рис. 1). Расчетная сетка имеет открытые границы в районе южной части Татарского пролива и восточнее Курильских островов, а также на самом севере при входе в Пенжинскую губу. Условия на границах с сушей были заданы в виде нестрогого задания отсутствия нормального течения и наличия тангенциального скольжения у материко-вого берега и островов.

Важным параметром при анализе особенностей течений в проливах является приливный поток. Для его расчета с помощью рассчитанных скоростей и направлений течений была написана специальная программа на языке Python. Ее алгоритм заключается в следующем:

1. Выбираются две крайние точки разреза с разных сторон пролива и шаг расчета.
 2. Рассчитываются координаты точек заданного разреза.
 3. Рассчитываются значения скорости течения и глубины с помощью метода обратно взвешенного расстояния.
 4. Вычисляется угол, на который необходимо повернуть систему координат, чтобы один из векторов скорости течения стал перпендикулярным к разрезу.
 5. Приливный поток для каждого шага расчета вычислялся путем умножения его единичной площади сечения на скорость течения.

Суммарная величина потока определялась сложением единичных величин потока, определенных для каждого расчетного шага.

Тип приливов рассчитывался по формуле [Боуден, 1988; Дуванин, 1960]:

$$F = \frac{K1+O1}{M2+S2},$$

где К1 – лунно-солнечная деклинационная суточная, 23,93 ч; О1 – главная лунная деклинационная, 25,82 ч; М2 – главная лунная полусуточная, 12,42 ч; S2 – главная солнечная полусуточная, 12,00 ч.

Для сравнения параметров тропических и экваториальных приливов были выбраны два временных промежутка: 02.06.1977–03.06.1977 и 11.10.1977–12.10.1977.

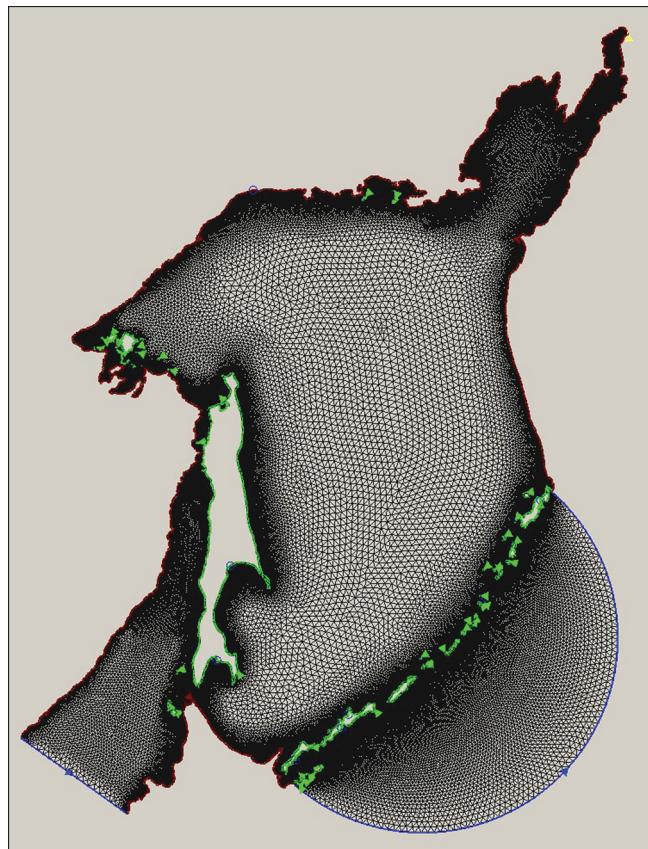


Рис. 1. Расчетная сетка для Охотского моря

Fig. 1. Model grid for the Sea of Okhotsk

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Была проведена верификация модели ADCIRC путем сравнения суммарного уровня моря, фаз и амплитуд четырех основных гармоник (K1, O1, M2, S2), рассчитанных с помощью модели, с натурными измерениями на разных прибрежных гидрометеорологических станциях (табл. 1). Проведенный корреляционный анализ между модельными и натурными параметрами на всех станциях показал, что коэффициент корреляции превышает 0,85, детерминации – 0,73, среднеквадратическое отклонение не превышает 15 см. На рис. 2 приведен пример сравнения для Южно-Сахалинска. Разница амплитуд

гармоник не превышает 8 см. Максимальное различие фаз между натурными и модельными данными составляет $\sim 10\%$. Это различие может быть объяснено тем, что в модели не учитывается бароклинное преобразование энергии [Tanaka et al., 2007].

Сравнительный анализ показал, что карты пространственной структуры фаз и амплитуд прилива для гармоник M2 и K1, построенных по результатам моделирования, с картами, приведенными в

работах [Романенков, 1996; Шевченко, Романов, 2003; Kowalik, Polyakov, 1998; Zaron, 2017], хорошо согласуются между собой (рис. 3). Необходимо отметить, что у гармоники M2 были выделены четыре точки амфидромии, что соответствует результатам работы [Zaron, 2017]. При этом центральная амфидромия смешена в Амурский лиман, что отличается от работы [Шевченко, Романов, 2003], в которой она была выявлена у восточного берега Сахалина.

Таблица 1

Сравнение фаз и амплитуд главных полусуточной и суточной приливных волн M2, K1 по данным наблюдения и моделирования

Станция	Амплитуда, см				Фаза, град. (0–360)			
	Натурные	Модель	Натурные	Модель	Натурные	Модель	Натурные	Модель
	M2	M2	K1	K1	M2	M2	K1	K1
Северо-Курильск	27,34	30,37	38,14	37,88	204,91	227,08	349,31	2,61
Матуа	21,78	23,37	26,31	27,35	187,67	224,22	3,05	22,03
Курильск	15,93	23,08	18,79	19,19	207,06	227,70	40,51	37,80
Буревестник	28,76	28,84	28,02	25,74	194,67	223,85	347,25	8,56
Южно-Курильск	30,73	32,20	23,23	19,07	189,87	225,81	351,13	357,96

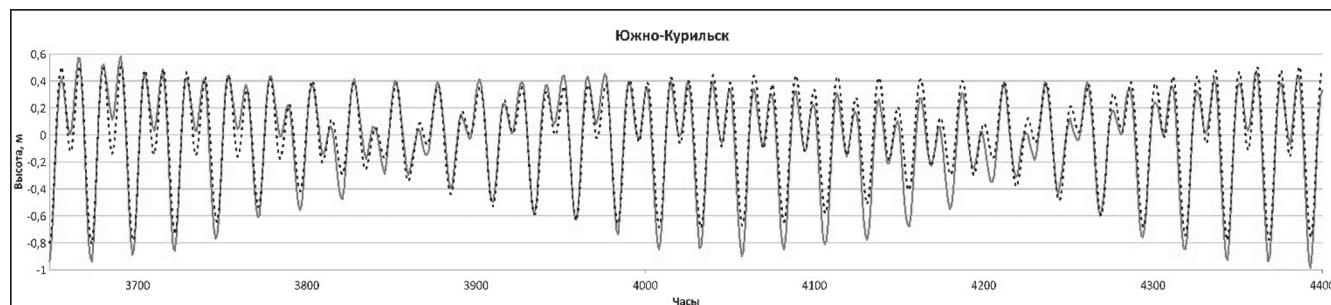


Рис. 2. Колебания уровня моря по натурным измерениям (сплошная линия) и результатам моделирования (пунктирная линия)

Fig. 2. Sea level fluctuations based on field measurements (solid line) and simulation results (dotted line)

Для оценки вклада различных гармоник в суммарные колебания уровня с помощью программы T-Tide проведен гармонический анализ колебаний уровня за весь 1977 г. в девяти проливах: Первого Курильского, Четвертого Курильского, Крузенштерна, Буссоль, Уруп, Фриза, Екатерины, Измены и Среднего [Pawlowicz et al., 2002]. Было выделено четыре основных периода колебаний уровня 12, 12,4, 24 и 25,8 ч, что соответствует гармоникам S2, M2, K1, O1. На их основе проведены расчеты по определению типа прилива (табл. 2). Получено, что в проливах северной части Курильской гряды приливы относятся к смешанному типу с преобладанием суточных. В южной части гряды начинают пре-

обладать полусуточные приливы. Это согласуется с выводами, полученными в работах [Леонов, 1960; Атлас океанов, 1974].

По результатам моделирования проанализированы пространственные особенности колебаний уровня моря для всех проливов Курильских островов при тропическом и экваториальном типах приливов. Для этого построены картосхемы уровня моря у Курильской гряды с временным шагом в шесть часов (рис. 4). Максимальная величина тропического прилива в районе Курильской гряды составляет $\sim 2,5$ –3 м. Наибольшие значения наблюдались у Камчатки, о. Хоккайдо, а также крупных островов Курильской гряды. Во время экваториального прилива его вели-

чина не превышает ~1 м. Отметим, что пространственный градиент уровня моря увеличивается в мелководных проливах при обоих типах прилива.

Для анализа осредненных по глубине приливных течений в проливах Курильской гряды были выбраны ситуации с максимальными скоростями течения. Отмечено, что наибольшие скорости течений наблюдаются на мелководье во всех проливах. Этот эффект подробно описывается в работе [Боуден, 1988] при выходе длинных гравитационных волн с глубокого моря на мелководье. Там же показано, что при учете трения о дно осредненная скорость по глубине все равно увеличивается, но в меньшей степени. Похожие выводы были получены в работе [Лучин, 1988].

В Первом Курильском проливе во время тропического прилива скорости приливных течений не

превышают 2 м/с, причем течения, направленные в сторону Охотского моря, были сильнее, чем в сторону Тихого океана. Пространственное распределение скоростей приливных течений из-за отсутствия резких перепадов глубин в этом проливе равномерное. При экваториальном приливе направления течений остаются аналогичными тропическому, однако скорости течения становятся меньше.

Наибольшие значения скоростей приливных течений в Четвертом Курильском проливе достигают 1,75–2 м/с. Скорости у правого берега в среднем выше, чем у левого, что связано с мелководным участком дна у последнего. В центре пролива из-за увеличения глубины осредненное по глубине течение сильно ослабевает – скорости не превышают 0,5 м/с.

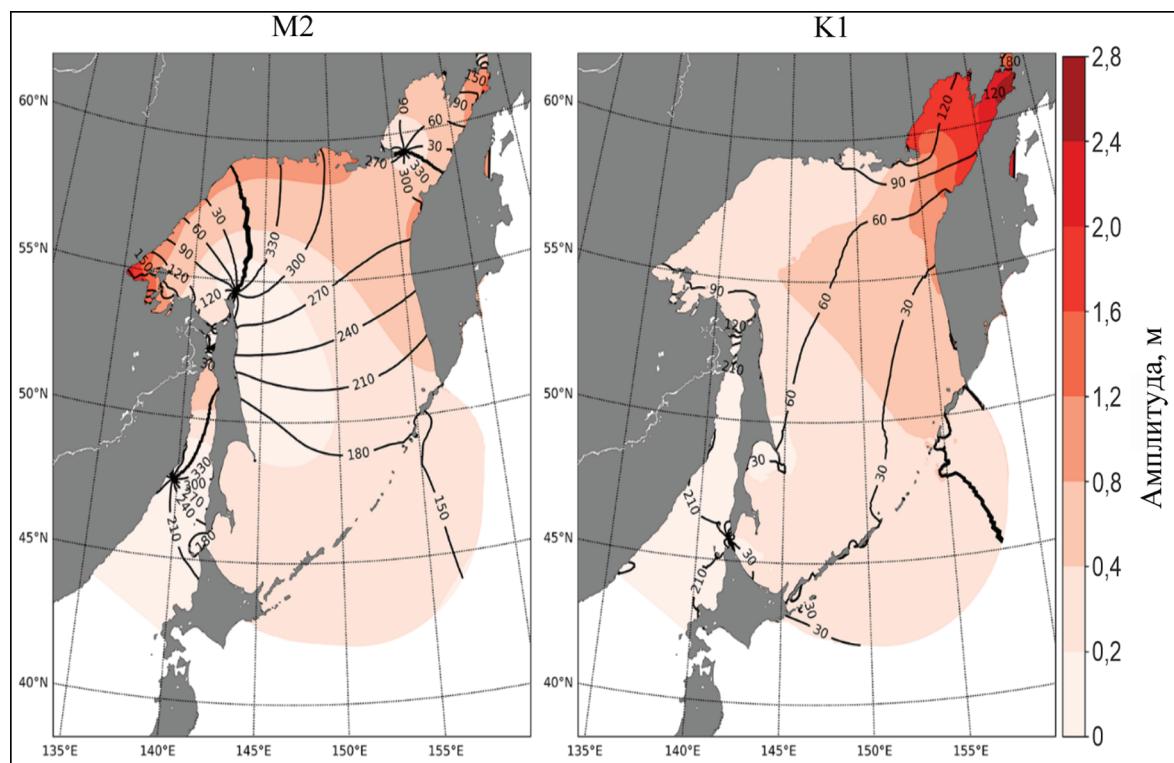


Рис. 3. Пространственная структура прилива. Заливкой приведена амплитуда прилива (м), изолиниями – его фазы (град.)

Fig. 3. Spatial structure of the tide. Filling shows the tide amplitude (m), isolines are for the tide phases (degrees)

Таблица 2

Значения амплитуд основных приливных гармоник и параметра F

Пролив	Долгота, град.	Широта, град.	M2	S2	K1	O1	F	Тип прилива
Первый Курильский	156,55	50,89	33,31	13,84	47,24	34,34	1,7	Смешанный, в основном суточный
Крузенштерна	153,61	48,51	25,89	10,65	36,65	29,49	1,8	
Буссоль	151,28	46,72	22,88	9,34	27,26	22,03	1,5	
Фриза	149,11	45,56	23,11	9,38	23,76	19,1	1,3	
Измены	145,29	43,74	26,04	10,02	20,63	18,37	1,1	

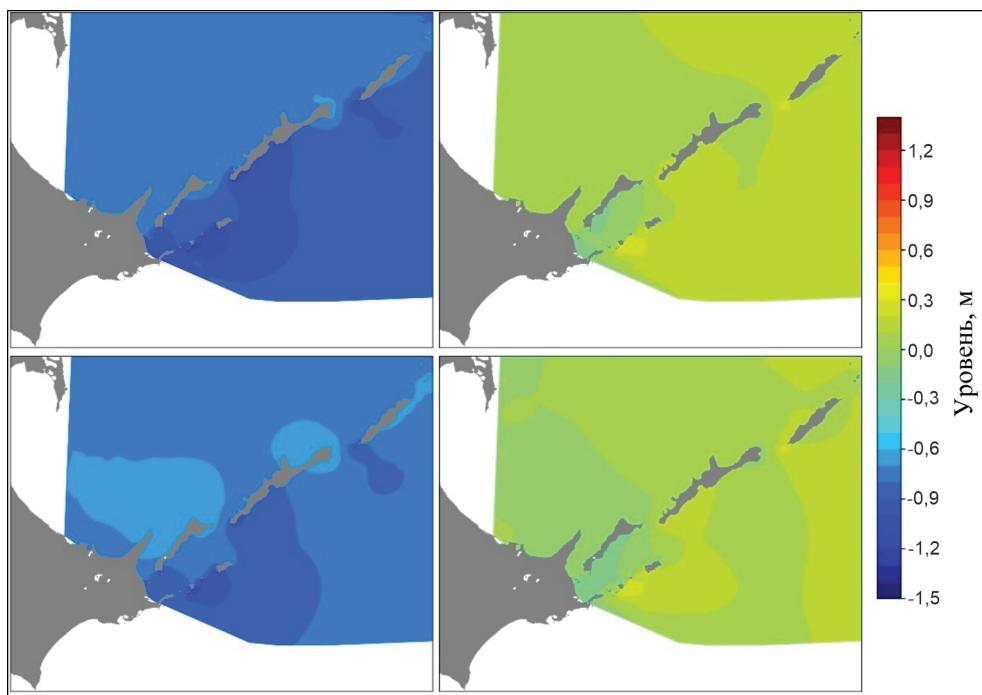


Рис. 4. Пространственное распределение уровня моря (м) в районе южной части Курильских островов 02–03.06.1977. Дискретность 12 часов

Fig. 4. Spatial distribution of sea level (m) in the area of the southern part of the Kuril Islands 02–03.06.1977. The discreteness is 12 hours

Пролив Крузенштерна является одним из самых широких проливов Курильской гряды, его ширина в самой узкой части составляет 74 км. На юге его глубина достигает 1900 м, а у о. Шиашкотан она уменьшается до 100 м. Приливные течения у о. Шиашкотан намного сильнее, чем на противоположном берегу, что связано с большим мелководным участком около его берега (рис. 5). Во время тропического прилива около острова наблюдаются одни из самых больших скоростей течений среди проливов Курильской гряды, которые достигают более 4 м/с. В связи со значительной неоднородностью глубин в проливе отмечается сильная пространственная неоднородность распределения скоростей по сравнению с другими проливами Курильской гряды. Скорости ~2 м/с четко выделяют мелководье, которое доходит до середины пролива. В южной части находится наиболее глубокая часть пролива, в которой скорости течений достигают своего минимума. Во время экваториального прилива в проливе Крузенштерна скорости приливных течений остаются одними из самых высоких в проливах Курильских островов и достигают 1,5 м/с.

В проливе Буссоль у берегов острова Чирпой скорость приливных течений ниже по сравнению с течениями около острова Симушир. Важным фактором, влияющим на скорость течений, 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 в юго-восточной части пролива, что также связано с уменьшением глубины моря. Во время экваториального прилива скорости в проливе Буссоль становятся очень небольшими и не превышают 0,75 м/с.

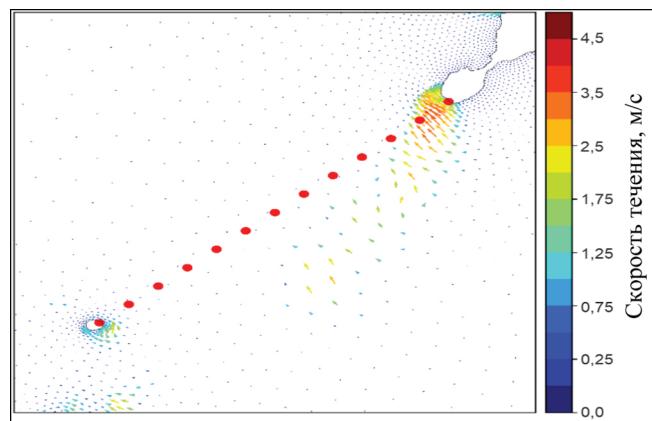


Рис. 5. Векторы скорости приливных течений в проливе Крузенштерна, 03.06.1977, 6 часов

Fig. 5. Velocity vectors of tidal currents in the Kruzenshtern Strait – 03.06.1977, 6 hours

Во время тропических приливов в проливе Уруп наибольшие скорости осредненных по глубине течений достигают 3,5 м/с. Поскольку в проливе отсутствуют значительные перепады глубин, а их максимальные значения не превышают 200 м, разница скоростей течений в нем незначительна. Однако стоит отметить, что из-за неравномерного распределения глубин в проливе Уруп пространственная структура направлений течений более неоднородна по сравнению с другими проливами. При экваториальном приливе скорости не превышают 1,25 м/с, а пространственная структура остается аналогичной тропическому.

В проливе Фриза глубины в проливе значительно варьируют от 600 м до мелководья у о. Уруп, благодаря чему создаются условия для больших скоростей течений, достигающих 4 м/с в обоих направлениях.

Аналогичный анализ был проведен для проливов Среднего, Екатерины, Измены и проливов Малой Курильской гряды. В них наблюдаются схожие закономерности с ранее описанными проливами, что подтверждает общие тенденции в динамике течений и распределении глубин в регионе.

По итогам анализа всех рассмотренных проливов выделены следующие основные закономерности:

1. Влияние глубины на скорости течений: чем меньше глубина, тем выше скорости осредненных по глубине течений.

2. Распределение скоростей осредненных по глубине течений: наибольшие значения скоростей течений наблюдаются у восточных и северо-восточных берегов проливов. Это связано с особенностями распределения глубин в Курильской гряде, где у этих берегов обычно находятся более крупные по площади мелководные участки.

3. Картина направлений течений: в периоды тропических и экваториальных фаз, несмотря на различия в значениях скоростей течений, общая картина направлений течений остается схожей.

При изучении приливных течений в проливах важной задачей является расчет приливного потока при различных типах и фазах приливов. Проведенные численные эксперименты позволили рассчитать изменения приливного потока в проливах с часовым шагом по осредненным по вертикали течениям. Аналогичные расчеты проводились в работе [Nakamura et al., 2000], где приливной поток рассчитывался на грубой сетке с шагом 5×5 км. Там же показывается, что при уменьшении шага до 2,5×2,5 км средние скорости течения увеличиваются на 30%, что ведет к росту приливного потока. На основании этого можно предположить, что при меньшем шаге сетки величина потока будет близка к реальным значениям.

В Первом Курильском проливе в обоих типах приливов выделяются суточный и полусуточный ход приливного потока. При тропическом типе суточный ход выражен наиболее четко, а его значения достигают 0,3 Св (рис. 6А). При этом значения потока, направленного в сторону Охотского моря, немного превышают значения потока в сторону Тихого океана. Для экваториального прилива суточный и полусуточный ход приливного потока практически не отличаются по величине и составляют около 0,2 Св.

При тропическом приливе полусуточные колебания приливного потока в Четвертом Курильском проливе слабо выражены по сравнению с суточным ходом. Максимальные значения потока при тропическом приливе ~3 Св, когда приливные течения направлены в сторону Охотского моря. Во время экваториального прилива наибольшие значения потока составляют около 1 Св. Подобно Первому Курильному проливу, во время экваториального прилива суточные колебания слабо выражены и начинают преобладать полусуточные.

В самом широком проливе Курильских островов, проливе Крузенштерна, во время тропического прилива наибольшая величина приливного потока составляет ~10 Св. В проливе преобладают суточные колебания с почти отсутствующими полусуточными. При экваториальном приливе максимальные значения потока снижаются примерно в два раза и составляют ~5 Св, при этом начинают преобладать полусуточные колебания, как и в ранее рассмотренных проливах.

В проливе Буссоль при тропическом приливе наблюдаются самые высокие значения приливного потока в Курильской гряде, достигающие 30 Св при течениях в Охотское море и 40 Св из него (см. рис. 6Б). Большая величина потока объясняется значительной шириной пролива и большими глубинами, которые превышают 2300 м. В отличие от предыдущих проливов, здесь не выражен полусуточный ход. В экваториальный прилив суточные колебания полностью заменяются на полусуточные. Максимальные значения потока становятся в четыре раза меньше 10 Св.

При анализе проливов Урупа, Фриза, Екатерины и Измены были выявлены аналогичные закономерности, сходные с ранее рассмотренными проливами.

Исследование особенностей приливного потока во всех рассмотренных проливах показало, что в проливах с меньшими средними глубинами даже во время тропических приливов полусуточные колебания сильнее выражены по сравнению с суточными. Например, это наблюдается в Первом Курильском проливе. При этом в более глубоких проливах, как в проливе Буссоль, полусуточные колебания не выражены, появляясь только во время экваториальной фазы.

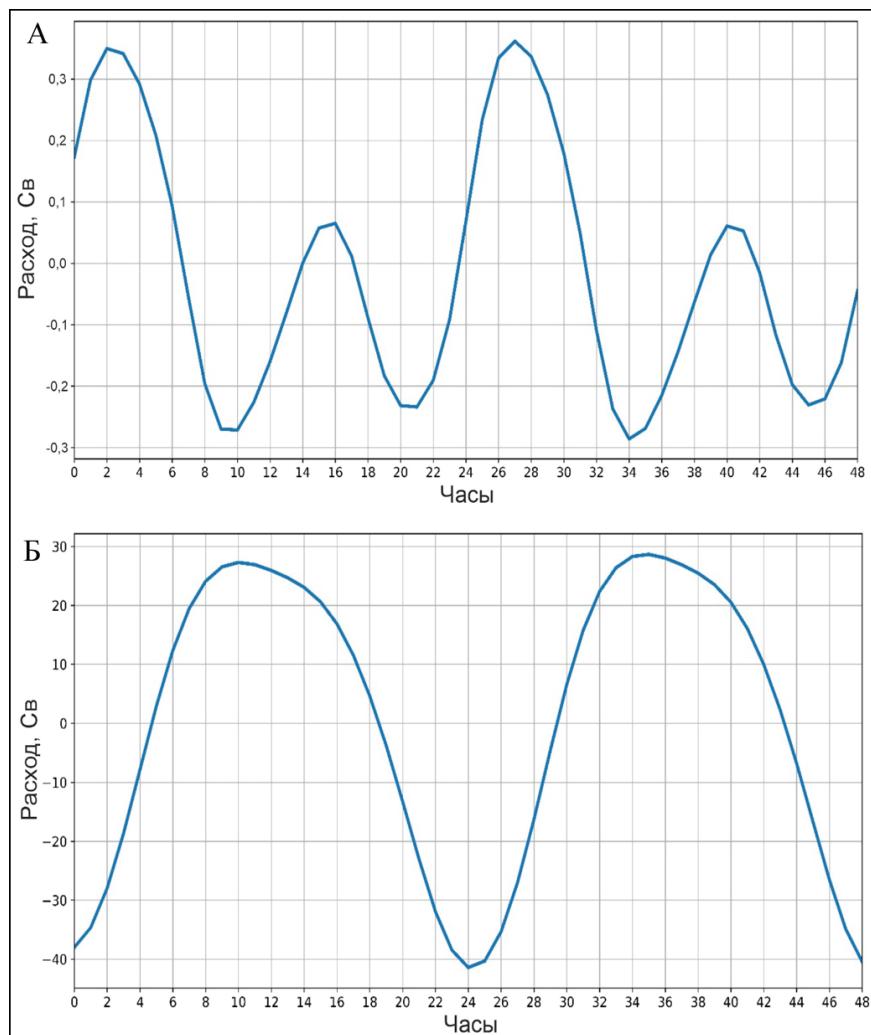


Рис. 6. Суточный ход приливного потока (Св) за 02–03.06.1977:
А – Первый Курильский пролив; Б – пролив Буссоль

Fig.6. The diurnal cycle of the tidal flow (Sv) for 02–03.06.1977:
A – the First Kuril Strait; B – the Bussol Strait

ВЫВОДЫ

В выполненной работе были рассмотрены особенности приливных колебаний уровня моря и приливных течений в проливах Курильской гряды по данным численного моделирования.

Выявлены следующие особенности приливных колебаний уровня, приливных течений и приливного потока в проливах Курильских островов:

- приливы в проливах северо-восточной части Курильской гряды в среднем имеют смешанный тип с преобладанием суточного хода, а в юго-западной части преобладают полусуточные;

- наибольшие величины приливов достигаются во время тропического прилива, составляя 2,5–3 м. Они наблюдаются у Камчатки и у Хоккайдо, а также крупных островов Курильской гряды;

- наибольшие скорости осредненных по глубине течений в проливах Курильской гряды достигают 4,5 м/с. Они наблюдаются в проливах Крузенштерна, Фриза, Среднего у их восточных и северо-восточных берегов, что связано с особенностями рельефа дна;

- во время тропических и экваториальных фаз, несмотря на различия в величинах скоростей течений, пространственная структура приливных течений остается схожей между собой;

- в проливах с меньшими средними глубинами во время тропического прилива более ярко выражены полусуточные колебания. Однако в более глубоких проливах полусуточные колебания в этой фазе прилива проявляются очень слабо или вообще отсутствуют;

- максимальное значение приливного потока отмечается в проливе Буссоль и достигает ~40 Св.

Благодарность. Работа выполнена в рамках госзадания «Комплексные исследования современного состояния вод Мирового океана», номер ЦИТИС 121031900090-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас океанов. Тихий океан / Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны СССР, М., 1974. 302 с.
- Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод / пер. с англ. А.Ю. Краснопевцева; под ред. И.Ф. Шадрина. М.: Мир, 1988. 324 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9: Охотское море. Вып. 1. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 342 с.
- Дуванин А.И. Приливы в море. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 390 с.
- Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 399 с.
- Зубов Н.Н. Основы учения о проливах Мирового океана. М.: Гос. изд-во географической литературы, 1956. 240 с.
- Зырянов В.Н. К вопросу о водообмене через северные Курильские проливы // Океанология. 1974. Т. 14. № 1. С. 16–21.
- Леонов А.К. Региональная океанография. Ч. I. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 766 с.
- Лучин В.А. Особенности колебаний уровня и приливных течений в проливах Курильской гряды // Труды ДВНИГМИ. 1988. Вып. 39. С. 52–59.
- Романенков Д.А. Прогностическое моделирование приливов в Охотском море: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб: РГГМИ, 1996. 16 с.
- Родионов А.А., Андросов А.А., Фофанова В.В., Кузнецова И.С., Вольцингер Н.Е. Моделирование приливной динамики северных проливов Курильской гряды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. № 3. С. 20–39.
- Соловьев А.И. Курильские острова // под ред. А.А. Григорьева. М.: Изд-во Главсевморпути. 1947. 307 с.
- Шевченко Г.В., Романов А.А. Пространственная структура прилива в Охотском море на основе данных спутниковой альтиметрии // Колебания уровня в морях. РГГМУ. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 92–110.
- Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk, *J. Phys. Oceanogr.*, 1998, vol. 28(7), p. 1389–1409, DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<1389:TITSOO>2.0.CO;2.
- Luettich R., Westerink J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model, Version 44.XX, 2004, 74 p.
- Lyard F., Allain D., Cancet M. et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, *Ocean Science, European Geosciences Union*, 2021, vol. 17, p. 615–649, DOI: 10.5194/os-17-615-2021.
- Nakamura T., Akitomo K., Hatayama T. Tidal Exchange through the Kuril Straits, *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, vol. 30, p. 1622–1644, DOI: 10.1175/1520-0485(2000)030<1622:TETTKS>2.0.CO;2.
- Nakamura T., Takeuchi Y., Uchimoto K. et al. 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, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.007.
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geosciences*, 2002, vol. 28, p. 929–937, DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4.
- Talley L.D., Nagata Y. The Okhotsk Sea and Oyashio Region, *PICES Scientific Reports*, 1995, vol. 2, p. 227.
- Tanaka Y., Hibiya T., Niwa Y. Estimates of tidal energy dissipation and diapycnal diffusivity in the Kuril Straits using TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Phys. Oceanogr.*, 2007, vol. 112, C10021, DOI: 10.1029/2007JC004172.
- Zaron E. Topographic and frictional controls on tides in the Sea of Okhotsk, *Ocean Modelling*, 2017, vol. 117, p. 1–11, DOI: 10.1016/j.ocemod.2017.06.011.
- Электронные ресурсы**
- ЕСИМО: Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения 15.11.2022).
- Gebco_22 Grid. General Bathymetric Chart of the Oceans. URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2022/ (дата обращения 10.02.2023).
- Электронный каталог карт УниО МО // Navy Soft. URL: <https://navysoft.ru/> (дата обращения 10.09.2023).

Поступила в редакцию 27.11.2023

После доработки 12.02.2024

Принята к публикации 24.04.2024

SPECIFIC FEATURES OF TIDAL EXCHANGE IN THE KURIL STRAITS ACCORDING TO MODELING DATA

V.I. Iljin¹, V.S. Arkhipkin²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology

¹ Student; e-mail: vsevolod_ilin@mail.ru

² Associate professor, Ph.D. in Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

Specific features of tidal fluctuations of sea level and tidal currents in the straits of the Kuril Islands are studied using numerical modeling. Two-time intervals, i. e. 02.06.1977–03.06.1977 and 11.10.1977–12.10.1977, were taken to compare the parameters of tropical and equatorial tides. The simulation results were verified with the field data. It was found that the straits of the northeastern part of the Kuril Ridge have a mixed type of tides with a predominance of the diurnal course, and in the southwestern part a semi-diurnal course prevails. The highest tides (up to 2,5–3 m) in the study period were observed on 02.06.1977 near the Kamchatka Peninsula and the Hokkaido Island, as well as large islands of the Kuril Ridge. Four main oscillation periods of 12, 12,4, 24 and 25,8 hours were identified, which corresponds to the S2, M2, K1 and O1 harmonics. Analysis of the data obtained showed that the maximum velocities of the depth-averaged currents reach 4,5 m/s. The highest speeds were recorded in the Kruzenshtern, Frieze and Sredny Straits. Estimates of the tidal flow have shown that semi-daily fluctuations are more pronounced in the straits with lower average depths during a tropical tide. In deeper straits, semi-daily fluctuations at tropical tides are very weak or absent at all, an example is the Boussol Strait. It is calculated that when using a two-dimensional model, the maximum values of the tidal flow are observed in the Boussol Strait, reaching ~40 Sverdrups (Sv).

Keywords: Kuril Islands, tides, tidal currents, straits

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment “Comprehensive studies of the current state of the waters of the World Ocean”, number CITIS 121031900090-6.

REFERENCES

- Atlas okeanov. Tikhij okean* [Atlas of the Oceans. Pacific Ocean], Main Directorate of Navigation and Oceanography of the USSR Ministry of Defense, 1974, 302 p. (In Russian)
- Bowden K. *Physical oceanography of coastal waters*. E. Horwood, Halsted Press, Ellis Horwood Limited, 1983, 302 p.
- Duvanin A.I. *Priliy v more* [Tides in the sea], Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1960, 390 p. (In Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas], vol. 9, The Sea of Okhotsk, iss. 1, St. Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 1998, 342 p. (In Russian)
- Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk, *J. Phys. Oceanogr.*, 1998, vol. 28(7), p. 1389–1409, DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<1389:TITSOO>2.0.CO;2.
- Leonov A.K. *Regionalnaya okeanografiya, Chast I* [Regional oceanography, Part I], Leningrad, Hydrometeorological Publ. House, 1960, 766 p. (In Russian)
- Luchin V.A. Osobennosti kolebaniya urovnya i prilivnykh techenij v prolivakh Kurilskoj gryady [Specific features of level fluctuations and tidal currents in the straits of the Kuril Ridge], *Proceedings of the DVNIGMI*, 1988, iss. 39, p. 52–59. (In Russian)
- Luettich R., Westerink J. *Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model*, Version 44.XX, 2004, 74 p.
- Lyard F., Allain D., Cancet M. et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, *Ocean Science, European Geosciences Union*, 2021, vol. 17, p. 615–649, DOI: 10.5194/os-17-615-2021.
- Nakamura T., Akitomo K., Hatayama T. Tidal Exchange through the Kuril Straits, *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, vol. 30, p. 1622–1644, DOI: 10.1175/1520-0485(2000)030<1622:TETTKS>2.0.CO;2.
- Nakamura T., Takeuchi Y., Uchimoto K. et al. 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, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.007.
- Pawlowski R., Beardsley B., Lentz S. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geosciences*, 2002, vol. 28, p. 929–937, DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4.
- Rodionov A.A., Androsov A.A., Fofanova V.V., Kuznetsov I.S., Volzinger N.E. Modelirovanie prilivnoj dinamiki severnykh prolivov Kurilskoj gryady [Modeling the tidal dynamics of the northern straits of the Kuril Ridge], *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2021, no. 3, p. 20–39. (In Russian)
- Romanenkov D.A. *Prognosticheskoe modelirovanie prilivov v Okhotskom more* [Predictive modeling of tides in the Sea of Okhotsk], Abstract of dissertation. St. Petersburg, RSHU, 1996, 16 p. (In Russian)
- Shevchenko G.V., Romanov A.A. [Spatial structure of the tide in the Sea of Okhotsk basing on the satellite altimetry data], *Kolebaniya urovnya v moryakh* [Sea level fluctuations], RGGMU, Saint-Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 2003, p. 92–110. (In Russian)
- Soloviev A.I. *Kurilske ostrova* [The Kuril Islands], A.A. Grigoriev (ed.), Moscow, Glavsevmorput Publ. House, 1947, 307 p. (In Russian)

- Talley L.D., Nagata Y. The Okhotsk Sea and Oyashio Region, *PICES Scientific Reports*, 1995, vol. 2, p. 227.
- Tanaka Y., Hibiya T., Niwa Y. Estimates of tidal energy dissipation and diapycnal diffusivity in the Kuril Straits using TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Phys. Oceanogr.*, 2007, vol. 112, C10021, DOI: 10.1029/2007JC004172.
- Zalogin B.S., Kosarev A.N. *Morya [Seas]*, Moscow, Mysl Publ., 1999, 399 p. (In Russian)
- Zaron E. Topographic and frictional controls on tides in the Sea of Okhotsk, *Ocean Modelling*, 2017, vol. 117, p. 1–11, DOI: 10.1016/j.ocemod.2017.06.011.
- Zubov N.N. *Osnovy ucheniya o prolivakh Mirovogo okeana* [Fundamentals of the doctrine of the straits of the World Ocean], Moscow, State Publ. House of Geographical Literature, 1956, 240 p. (In Russian)
- Zyryanov V.N. K voprosu o vodoobmene cherez severnye Kurilskie prolivy [On the issue of water exchange through the Northern Kuril Straits], *Oceanology*, 1974, vol. 14, no. 1, p. 16–21. (In Russian)

Web-sources

- ESIMO: Unified state information system on the situation in the World Ocean, URL: <http://esimo.ru/portal/> (accessed 15.11.2022).
- Gebco_22 Grid. General Bathymetric Chart of the Oceans, URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2022/ (accessed 10.02.2023).
- Electronic catalog of maps of UNiO MO, Navy Soft, URL: <https://navysoft.ru/> (accessed 10.09.2023).

Received 27.11.2023

Revised 12.02.2024

Accepted 24.04.2024