

УДК 551.466.6

© Д. А. Романенков^{1*}, Е. В. Софьина^{1,2}, А. Е. Родикова¹, 2023

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

²Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Воронежская улица, д. 79, Санкт-Петербург

*dmromanenkov@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАРОТРОПНОГО ПРИЛИВА У ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ П-ВА КАМЧАТКА С УЧЕТОМ ТОЧНОСТИ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРИЛИВНЫХ МОДЕЛЕЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ РЕГИОНЕ ТИХОГО ОКЕАНА

Статья поступила в редакцию 05.08.2023 г., после доработки 10.10.2023, принята в печать 13.11.2023 г.

Аннотация

В настоящей работе представлена реализация численной конечно-объемной региональной модели FESOM—C для предвычисления баротропной приливной динамики в тихоокеанских водах, прилегающих к юго-востоку п-ва Камчатка. Динамика воспроизводится для отдельных гармоник полусуточного M2 и суточного K1 диапазона приливного спектра, а также для суммарного прилива из 12-ти составляющих. Результаты расчетов, полученные на детальной неструктурированной сетке, интерпретируются в рамках волнового подхода. Региональная модель выявила изменчивость гармонических постоянных приливных колебаний уровня и характеристик течений на шельфе и изрезанном каньонами континентальном склоне из-за топографического рассеивания приливных волн. Оценены максимальные течения и вихревые структуры, связанные с остаточной приливной циркуляцией на шельфе и континентальном склоне. Выполнены эксперименты по чувствительности численного решения к заданию условий на открытых границах, взятых из двух современных глобальных приливных моделей FES2014 и TPXO9. Решение в региональной модели слабо зависит от этого выбора и хорошо согласуется с имеющимися немногочисленными данными по приливам. Однако оказалось, что решения самих глобальных моделей значимо отличаются между собой в поле приливных течений. Дополнительно было сделано сравнение точности решений глобальных приливных моделей для региона, включающего Охотское море и тихоокеанские воды вдоль островов Курильской гряды и п-ва Камчатка. Это сравнение было выполнено для верифицированной базы гармонических постоянных приливного уровня из советских и британских таблиц приливов. Хотя в среднем по области ошибки расчета приливного уровня малы и близки к официально заявленным, в отдельных районах региона ошибки глобальных моделей были весьма значимы. Их географическая привязка зависит от конкретной модели и сравниваемой приливной гармоникой. Это означает, что к использованию результатов глобальных приливных моделей на региональном масштабе следует относиться с осторожностью, а актуальность развития регионального моделирования приливной динамики сохраняется.

Ключевые слова: региональное моделирование, прилив, гармонические постоянные, остаточная циркуляция, завихренность, глобальные модели приливов, FES2014, TPXO9, модель FESOM—C, неструктурированная сетка, Охотское море, Курило-Камчатский регион, Авачинский залив

© D. A. Romanenkov^{1*}, E. V. Sofina^{1,2}, A. E. Rodikova¹, 2023

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

²Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya Str., St. Petersburg, 192007, Russia

*dmromanenkov@yandex.ru

MODELING OF BAROTROPIC TIDE OFF THE SOUTHEASTERN COAST OF THE KAMCHATKA PENINSULA IN VIEW OF THE ACCURACY OF GLOBAL TIDAL MODELS IN THE NORTHWEST PACIFIC OCEAN

Received 05.08.2023, Revised 10.10.2023, Accepted 13.11.2023

Abstract

This study introduces the development and implementation of a regional numerical finite-volume model FESOM—C, specifically designed to accurately compute barotropic tidal dynamics in the Pacific waters adjacent to the southeastern region of the Kamchatka Peninsula. The dynamics of principal harmonics of the semidiurnal M2 and diurnal K1 tidal constituents are replicated,

Ссылка для цитирования: Романенков Д.А., Софьина Е.В., Родикова А.Е. Моделирование баротропного прилива у юго-восточного побережья п-ва Камчатка с учетом точности глобальных приливных моделей в северо-западном регионе Тихого океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 4. С. 45–62. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4
For citation: Romanenkov D.A., Sofina E.V., Rodikova A.E. Modeling of Barotropic Tide off the Southeastern Coast of the Kamchatka Peninsula in View of the Accuracy of Global Tidal Models in the Northwest Pacific Ocean. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 4, 45–62. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4

as well as the total tide, which encompasses 12 constituents. The computed results, obtained using a detailed unstructured grid, are interpreted through the Long-wave approach. The FESOM—C regional model revealed the variability of harmonic constants of tide and current characteristics within the shelf and canyon-cut continental slope, due to topographic scattering of tidal waves. The assessment includes the estimation of maximum currents and eddy structures associated with residual tidal circulation on the shelf and continental slope. To investigate the influence of varying open boundary conditions, sensitivity experiments have been conducted using data from two state-of-the-art global tidal models FES2014 and TPXO9. The findings reveal that the regional model's solution exhibits only minimal dependency on this choice, and it aligns well with the limited available tidal data. Interestingly, the global models themselves demonstrate significant disparities in the tidal currents. Furthermore, we assess the accuracy of global tidal model solutions in a broader region encompassing the Sea of Okhotsk, as well as the Pacific waters along the Kuril Islands and the Kamchatka Peninsula. This assessment utilizes a verified database of tidal harmonic constants derived from the Soviet and British tide tables. While the average errors in tidal heights calculations remain minor and closely approximate officially declared values, certain areas within the region exhibit notable discrepancies in the outputs of the global models. These discrepancies are site-specific and vary depending on the particular model and tidal harmonic under consideration. This underscores the need for caution when applying results from global tidal models at the regional scale. Meanwhile, the importance of advancing regional tidal dynamics modeling remains evident.

Keywords: regional modeling, tide, harmonic constants, residual circulation, vorticity, global tide models, FES2014, TPXO9, FESOM—C model, unstructured grid, Sea of Okhotsk, Kuril-Kamchatka region, Avacha Bay

1. Введение

Аккуратное воспроизведение приливов является необходимым условием для моделирования сложных шельфовых и прибрежных процессов. Известно, что представление модельной физики и точность расчетов приливных движений в значительной степени зависит от нескольких ключевых факторов: 1) наличие цифровой модели рельефа приемлемого качества; 2) использование сетки высокого разрешения для учета выраженных геометрических и батиметрических особенностей; 3) возможности учета трехмерных эффектов с описанием пограничных слоев. Для региональных моделей морских незамкнутых акваторий также необходимо иметь адекватные условия на открытых границах области расчета, а для ускорения этапа адаптации (spin-up) модельных полей — надлежащие начальные условия.

Спутниковые альтиметрические наблюдения внесли значительный вклад в понимание глобальных процессов на поверхности моря, в частности, позволив повысить точность предвычисления океанских приливов путем усвоения этих данных. Считалось, что качество моделей глобальных приливов на региональном масштабе, включая мелководье и прибрежные зоны, уступает точности предсказания характеристик уровня и течений в открытом океане. Этот вывод основывался, в том числе, на результатах сравнения семи современных на момент публикации глобальных моделей океанских приливов [1]. Основное внимание в этом сравнении уделялось эмпирическим моделям, основанным на обработке и интерполяции альтиметрических данных, и гидродинамическим ассимиляционным моделям, усваивающим альтиметрические и мареографные данные наблюдений. Тестирование основывалось на сравнении модельных решений как с контактными, так и с дистанционными измерениями приливного уровня.

За последние годы надежность альтиметрических данных в прибрежных районах заметно улучшилась благодаря разработке и использованию новых алгоритмов и технических усовершенствований, подробный обзор которых представлен в [2]. В результате извлекается больше «прибрежных» сигналов по сравнению с классической обработкой альтиметрии без ущерба для точности стандартной обработки открытого океана и прибрежных районов. Тем самым, заявляется о повышении точности многих приливных моделей, использующих альтиметрию, в районах, где раньше ее не хватало. Это дало возможность при ассимиляции уменьшить вклад данных прибрежных мареографов или отнести некоторые станции к нерепрезентативным. В последние годы появилось много исследований, направленных на переоценку точности глобальных моделей на региональном масштабе [3–11]. Анализ этих публикаций показывает, что при сравнении с данными наблюдений и неплохими средними по акваториям оценками ошибок эти глобальные модели могут давать расхождения в некоторых районах, причем результаты сравнения также зависят от оцениваемой приливной гармоник. Так, например, в [12] отмечается, что приливной атлас FES2014 предоставляет заметное улучшение точности по сравнению с более ранней версией FES2012, особенно с существенным улучшением в Северном Ледовитом океане для приливных составляющих K1 и S2. Однако снижение точности, по-видимому, случилось в двух аномальных регионах: в море Росса для O1 и в море Уэдделла для M2.

С другой стороны, накопленные за три десятилетия ряды альтиметрических наблюдений позволяют оценить большее количество второстепенных составляющих приливов. По мере того, как модели океанских приливов продолжают совершенствоваться, особенно в прибрежных районах, эти малые приливы

приобретают все большее значение. На сегодняшний день наиболее популярными являются глобальные приливные модели TPXO [13] и FES [14]. Основанные на их последних версиях (TPXO9 и FES2014 соответственно) приливные атласы гармонических постоянных часто используются для определения и задания граничной информации в региональных моделях. Эти базы имеют наилучшее пространственное разрешение, наибольший набор гармоник и низкую среднюю ошибку расчета при сопоставлении с контрольными береговыми и пелагическими мареографами. Хотя эти модели также были среди оцениваемых в числе цитированных выше работ, на сегодняшний день не существует таких оценок для акваторий северо-западной части Тихого океана, включающей Охотское море и Курило-Камчатский район.

Одной из целей настоящей работы было выполнение регионального моделирования баротропных приливов в акватории, примыкающей к юго-восточному побережью Камчатки, которое будет использоваться в будущем численном моделировании сложной динамики и гидрологии этой акватории с очень скудным набором разнородных наблюдений. Оценивание качества глобальных моделей в целом регионе является другой целью работы. Предполагается, что региональная модель с наилучшими граничными условиями даст новую информацию о приливной динамике в акватории.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлена информация о районе исследования и состоянии изученности его приливной динамики. В разделе 3 представлены данные натурных наблюдений гармонических постоянных приливных колебаний уровня. Обсуждаются два различных решения для глобальных приливов FES2014 и TPXO9. Региональная модель кратко представлена с акцентом на особенности дискретизации расчетной области неструктурированной сеткой. В разделе 4 выполнено сравнение глобальных моделей в северо-западной части Тихого океана, включающей Охотское море и Курило-Камчатский регион, между собой и с данными наблюдений. Результаты регионального моделирования представлены в разделе 5. Обсуждается выбор граничных условий для региональной модели. Общее описание модельного прилива дано для суточной (K1) и полусуточной (M2) гармоник в качестве представителей суб- и суперинерционных гармоник приливного форсинга. Отдельное обсуждение посвящено приливному течению и их отличиям от решений глобальных моделей в акватории. Результаты моделирования суммарного прилива ограничены анализом максимальных течений, завихренности и остаточной приливной циркуляции. В Заключение обсуждаются итоги работы и вытекающие из них выводы.

2. Регион исследования

Акватория Тихого океана, примыкающая к юго-восточному побережью п-ва Камчатка, включает участки узкого и широкого шельфа, крутой континентальный склон и глубоководный желоб (рис. 1). Подводный рельеф двух больших заливов этой акватории — Кроноцкого и Авачинского — осложнен глубоководными каньонами, захватывающими склон и узкий шельф. Район, прежде всего его каньоны, известен как место нереста самой крупной (восточно-камчатской) популяции минтая в регионе. Наш интерес к этой акватории вызван имеющимися свидетельствами возможного критического влияния обусловленных приливной динамикой процессов на ранние стадии развития этого вида промысловых рыб [15]. Для реализации региональной модели динамики и гидрологии акватории с учетом приливного воздействия требуется на первом этапе создать и верифицировать приливной блок этой модели, уделяя повышенное внимание задаваемым условиям на протяженной открытой границе области. Приливные явления в акватории не изучались целенаправленно. Как было отмечено во Введении, в распоряжении исследователей имеются результаты глобальных моделей приливов, таких как TPXO9 (версия 4) и FES2014, которые могут быть использованы для инициирования граничных и начальных условий приливной региональной модели. Однако качество решения глобальных моделей в северо-западном регионе Тихого океана подробно не рассматривалось. Для юго-востока п-ва Камчатки в открытых базах мареографных данных имеются только 2 пункта с гармоническими постоянными прилива, причем один из них (см. рис. 1) расположен в Авачинской губе и может оказаться нерепрезентативным для сравнения с результатами глобальных моделей. Поэтому на предварительном этапе исследований было решено оценить качество глобальных моделей в более обширном регионе, включающим Охотское море, тихоокеанские воды Курило-Камчатского района и северную часть Японского моря.

Северо-западная часть Тихого океана — регион с сильным влиянием приливной динамики на гидрологию вод. Отличительными особенностями приливов в регионе являются: 1) доминирование суточных составляющих в спектре смешанных колебаний в большинстве его частей, и 2) одни из самых высоких в мире значений величины приливных колебаний, наблюдаемых в Пенжинской губе и заливах Шантарского района Охотского моря.

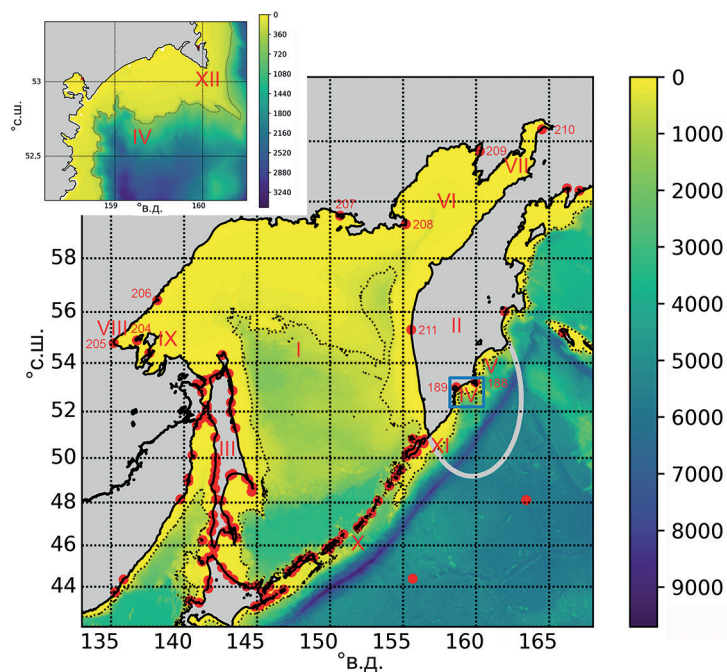


Рис. 1. Батиметрия района исследования (м). Красные кружки — пункты наблюдений гармонических постоянных амплитуды и фазы приливных колебаний уровня; пунктир — изобата 500 м; серая кривая — граница расчетного домена региональной модели; голубой прямоугольник — область врезки с батиметрией в районе глубоководных каньонов Авачинского залива; арабскими цифрами показаны пункты наблюдений, упоминающиеся в тексте; римскими цифрами отмечены: I — Охотское море, II — п-в Камчатка, III — о. Сахалин, IV — Авачинский залив, V — Кроноцкий залив, VI — залив Шелихова, VII — Пенжинская губа, VIII — Удская губа, IX — Шантарские о-ва, X — Курильские о-ва, XI — мыс Лопатка, XII — мыс Шипунский

Fig. 1. Bathymetry of the study area (m). Red circles represent observation points with harmonic constants of tidal level amplitudes and phases. Dashed lines indicate the 500 m isobath. The gray curve represents the boundary of the computational domain of the regional model. The blue rectangle denotes the area of the incut with bathymetry near the deep-water canyons of the Avacha Bay. Arabic numerals indicate the mentioned observation points in the text, while Roman numerals mark: I — Sea of Okhotsk, II — Kamchatka Peninsula, III — Sakhalin Island, IV — Avacha Bay, V — Kronotsky Bay, VI — Shelikhov Gulf, VII — Penzhina Bay, VIII — Uda Bay, IX — Shantar Islands, X — Kuril Islands, XI — Lopatka Cape, XII — Shipunsky Cape

the incut with bathymetry near the deep-water canyons of the Avacha Bay. Arabic numerals indicate the mentioned observation points in the text, while Roman numerals mark: I — Sea of Okhotsk, II — Kamchatka Peninsula, III — Sakhalin Island, IV — Avacha Bay, V — Kronotsky Bay, VI — Shelikhov Gulf, VII — Penzhina Bay, VIII — Uda Bay, IX — Shantar Islands, X — Kuril Islands, XI — Lopatka Cape, XII — Shipunsky Cape

Структура приливов и различные аспекты его динамики в Охотском море и прилегающих водах Тихого океана изучались ранее в модельных исследованиях [16–26]. Только в последних двух публикациях приливный форсинг задавался из ТРХО9, при этом качество глобальных моделей в этих и других работах не оценивалось. Здесь мы не анализируем результаты моделирования приливной динамики в регионе, но отметим одну особенность. Динамика длинноволновых процессов в регионе, в том числе приливов, характеризуется генерацией и распространением захваченных шельфовых волн (разновидность топографических волн Россби) [27]. При определенных условиях эти волны «отбирают» энергию основного баротропного прилива субинерционных гармоник при его рассеивании на неоднородностях батиметрии и береговой линии. Их длины более чем на порядок короче длины основной энергонесущей волны Кельвина, что проявляется в наблюдаемой мелкомасштабной изменчивости характеристик колебаний уровня и течений [28]. Это обстоятельство может оказаться неприятным как для моделирования, так и для сравнения его результатов с данными наблюдений.

3. Исходная информация и метод исследования

3.1 База данных гармонических постоянных приливных колебаний уровня

Существующие открытые данные наблюдений по приливам включают таблицы гармонических постоянных приливного уровня 1948 и 1960 гг. [29–30] и адмиралтейские приливные таблицы 1998 г. [31]. Основным источником были выбраны советские таблицы (118 пунктов), база была дополнена Адмиралтейскими таблицами (95 пунктов), из них 4 пункта уникальных, не входящих в советские таблицы, и 2-мя пелагическими станциями [32]. На первом этапе была выполнена верификация данных путем перекрёстного сравнения разных баз, сопоставления с известными приливными картами, а также базой данных приливного калькулятора WXTIDE32 [33]. В результате, были скорректированы координаты станций и некоторые значения амплитуд и фаз приливных колебаний уровня; фаза была приведена ко времени UTC. В обеих базах данных были обнаружены ошибки или опечатки. Сомнительные станции были отбракованы, а дубли не учитывались. В результате этого этапа была сформирована новая база данных гармонических постоянных, содержащая 124 приливных пункта (дополнительные материалы: Приложение, таблица П1).

3.2 Глобальные приливные модели

Ниже более подробно рассмотрены наиболее популярные базы данных о характеристиках приливных гармоник ТРХО и FES, полученные с помощью глобальных моделей с ассимиляцией данных наблюдений.

TPXO (Oregon State University TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution tidal model) — глобальный продукт, создан на основе баротропной приливной модели, ассимилирующий альтиметрические данные спутников Topex Poseidon, Topex Tandem, ERS, GFO и данные *in situ* наблюдений с приливных буев (*англ.* tidal gauge). Каждая следующая версия модели TPXO основана на обновленной батиметрии и ассимилирует больше данных по сравнению с предыдущими версиями. Последняя доступная реализация TPXO9 имеет пространственное разрешение $1/30^\circ$.

Описание модели и ассимиляционной процедуры представлено в [13]. Архив включает в комплексном виде гармонические постоянные (амплитуды и фазы приливных колебаний уровня и составляющих (северная и восточная) баротропных (средних по вертикали) приливных течений, а также локальную глубину для расчета приливных потоков (составляющие скоростей течений, умноженные на локальную глубину) для приливных гармоник: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, долгопериодные Mf, Mm и нелинейные M4, MS4, MN4, а также 2N2 и S1.

Атлас FES2014 (Finite Element Solution) global ocean tide — глобальный продукт, созданный на основе конечно-элементной баротропной приливной модели с пространственным разрешением, варьирующим от 2 до 60 км в зависимости от локальной глубины. Атлас является результатом ассимиляции длительных серий альтиметрических данных со спутников Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, TP interleaved-J1 interleaved, ERS-1, ERS-2, и Envisat, а также данных *in situ* наблюдений с приливных буев (tidal gauge). Описание модели и ассимиляционной процедуры представлено в [14].

Атлас FES2014 включает гармонические постоянные (амплитуды и фазы приливных колебаний уровня и составляющих (северная и восточная) баротропных приливных течений), а также loading tide (вертикальные смещения Земной коры за счет океанического прилива) для следующих приливных гармоник: 2N2, EPS2, J1, K1, K2, L2, La2, M2, M3, M4, M6, M8, Mf, MKS2, Mm, MN4, MS4, MSf, MSqm, Mtm, Mu2, N2, N4, Nu2, O1, P1, Q1, R2, S1, S2, S4, Sa, Ssa, T2. Доступная для пользователя база данных представлена на регулярной сетке с пространственным разрешением $1/16^\circ$, полученная интерполяцией с «родной» конечно-элементной сетки. Также только для уровня, но не для скоростей течений, имеется экстраполированная версия базы данных, для того чтобы охватить почти полностью прибрежные районы.

3.3 Региональная модель FESOM—C

3.3.1 Описание региональной модели

Для моделирования баротропного прилива в тихоокеанских водах к юго-востоку от п-ва Камчатка использовалась конечно-объемная модель FESOM—C (FESOM—Coastal, [34]), которая обеспечивает основу для решения широкого спектра гидрофизических, гидрогеологических, инженерных и экологических проблем. Модель FESOM—C основана на дискретизации исходных уравнений геофизической гидродинамики методом конечного объема и работает на горизонтальных смешанных неструктурированных сетках, состоящих из треугольников и четырехугольников. FESOM—C обладает мульти-разрешающей функциональностью для моделирования морской гидродинамики, позволяя преодолеть разрыв между масштабами движений. Модель использует несколько схем адвекции для уравнений движения и трассеров, характеризующиеся низкой численной диссипацией, оснащена модулями расчета приливов, осушки и седиментации. Для вертикальной координаты используется стандартное sigma-преобразование, отслеживающее топографию. Численная реализация модели в горизонтальном направлении базируется на явной схеме расщепления баротропной (средней по вертикали) и бароклинной моды. Модель имеет два типа параллелизации: Open MPI и MPI. Динамическое ядро FESOM—C было разработано и протестировано (в гидростатической опции) в многочисленных идеализированных и реальных экспериментах [34–38]. Модель FESOM—C в версии 2019 года доступна по ссылке <https://doi.org/10.5281/zenodo.2085177> (дата обращения 27.06.2023).

В данной работе мы используем модель FESOM—C для расчета баротропного прилива (без учета эффектов стратификации). Благодаря принятому в модели алгоритму расщепления динамической задачи на среднюю по вертикали и отклонение от нее, модельные решения в трехмерной и двумерной (приближение мелкой воды) постановках для таких переменных как уровень моря и средние по вертикали скорости практически не различаются. В нашем анализе мы ограничимся анализом именно этих переменных и основанных на них динамических характеристик. Модель Смагоринского используется для описания горизонтальной вихревой вязкости. Для аппроксимации адвекции была выбрана схема с направленными разностями второго порядка точности. Коэффициент придонного трения задавался равным 0.005. Для стабилизации вблизи открытой границы и уменьшения времени установления численного решения была использована опция дополнительной буферной зоны вдоль этой границы шириной 20 км с повышенным в 10 раз коэффициентом придонного трения.

3.3.2. Сетка

Расчеты выполнены на неструктурированной треугольно-элементной сетке с равномерно изменяющимся размером элементов. Сетка построена генератором GMSH [39], с локальным сгущением, допускающим надежное разрешение баротропного масштаба $(L_{bt} = \sqrt{gh}) / (\max(f, \omega))$ в соответствии с рекомендациями [40], где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, h — локальная глубина, f — параметр Кориолиса, ω — частота приливной гармоники. В нашей модельной области $L_{bt} \in [50 \text{ км} \div 2500 \text{ км}]$, число узлов сетки — 37738, количество элементов — 74226, размер ребер элементов варьирует от 330 до 7800 м с минимальными значениями в мелководной области.

Батиметрия расчетной области формировалась на основе 30" массива ETOPO 2022 [41], минимальная и максимальная глубины составляют 5 м и 7900 м, соответственно. Эта версия архива хорошо разрешает глубоководные каньоны в заливах (рис. 1, врезка).

3.3.3. Граничные условия

На открытой границе модельной области задаются колебания уровня в виде:

$$\xi = \xi_0 + \sum_{i=1}^n f_i A_i \cos(\omega_i t + (v_0 + u_i)_i - g_i), \quad (1)$$

где n — число учитываемых гармоник (волн), ξ_0 — неприливно-составляющая изменений уровня, A_i — амплитуда приливной волны i , $\omega_i = 2\pi/T_i$ — угловая скорость данной волны i (в рад/с), T_i — период i гармоники, t — время, g_i — фаза данной волны относительно нулевого меридиана, определяющая ее отметку уровня в начальный момент времени расчета $t = 0$, f_i — астрономический редуцирующий множитель, $(v_0 + u)_i$ — астрономический аргумент. A_i и g_i — гармонические постоянные прилива, зависящие от местных условий и задаваемые из наблюдений или других моделей. Величины f_i и $(v_0 + u)_i$ — астрономические параметры на «00» часов первого дня расчёта находятся по формулам в зависимости от параметров орбит Луны и Солнца в соответствии с [42].

Для расчета моноприлива задается одна из двух гармоник: полусуточная M2 ($T = 12,42 \text{ ч}$) или суточная K1 ($T = 23,93 \text{ ч}$) без учета астрономических параметров, для суммарного прилива учитываются следующие составляющие: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, MS4, M4. Остальные параметры расчета: $\xi_0 = 0,0$, шаг по времени $\Delta t = 3 \text{ с}$. Расчет ведется до установления численного решения на квазипериодический режим, когда среднее (за приливный цикл и по площади моря) изменение интегральной по глубине плотности баротропной приливной энергии становится меньше 0,1 %. Моноприлив устанавливается меньше чем за 20 периодов, колебания в суммарном приливе — за 4 синодических месяца. Для оценки гармонических постоянных моноприлива выполнялся анализ Фурье численного решения за последний приливной цикл расчета. Анализ суммарного прилива производился для синодического месяца после установления решения.

4. Сравнение глобальных моделей между собой и с данными наблюдений

Анализ приливных карт для суточных (K1, O1) и полусуточных (M2, S2) гармоник в северо-западном регионе Тихого океана показал, что крупномасштабные особенности приливных колебаний, такие как число и положение амфидромий, локальных максимумов и минимумов соответствуют известным представлениям о приливах в регионе (см., например, [18, 43]). Однако по значениям характеристик прилива есть и различия.

Сравнение результатов глобальных моделей FES2014 и TPXO9 было выполнено для пунктов наблюдений, попавших в новую скорректированную базу данных гармонических постоянных амплитуды и фазы приливных колебаний уровня (табл. П1; рис. 1).

На рис. 2 представлены пространственные карты векторной ошибки приливных колебаний уровня глобальных моделей для гармоник M2, S2, K1 и O1. Векторная ошибка определялась следующим образом:

$$D_i = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [A_{oi} \cos(\omega t - g_{oi}) - A_{mi} \cos(\omega t - g_{mi})]^2 dt \right\}^{1/2} = 2^{-1/2} [A_{oi}^2 + A_{mi}^2 - 2A_{oi}A_{mi} \cos(g_{oi} - g_{mi})]^{1/2}, \quad (2)$$

где A_{oi} , g_{oi} и A_{mi} , g_{mi} — наблюдаемые и модельные значения амплитуд и фаз приливных колебаний уровня в i пункте наблюдений для отдельной приливной гармоники с периодом T .

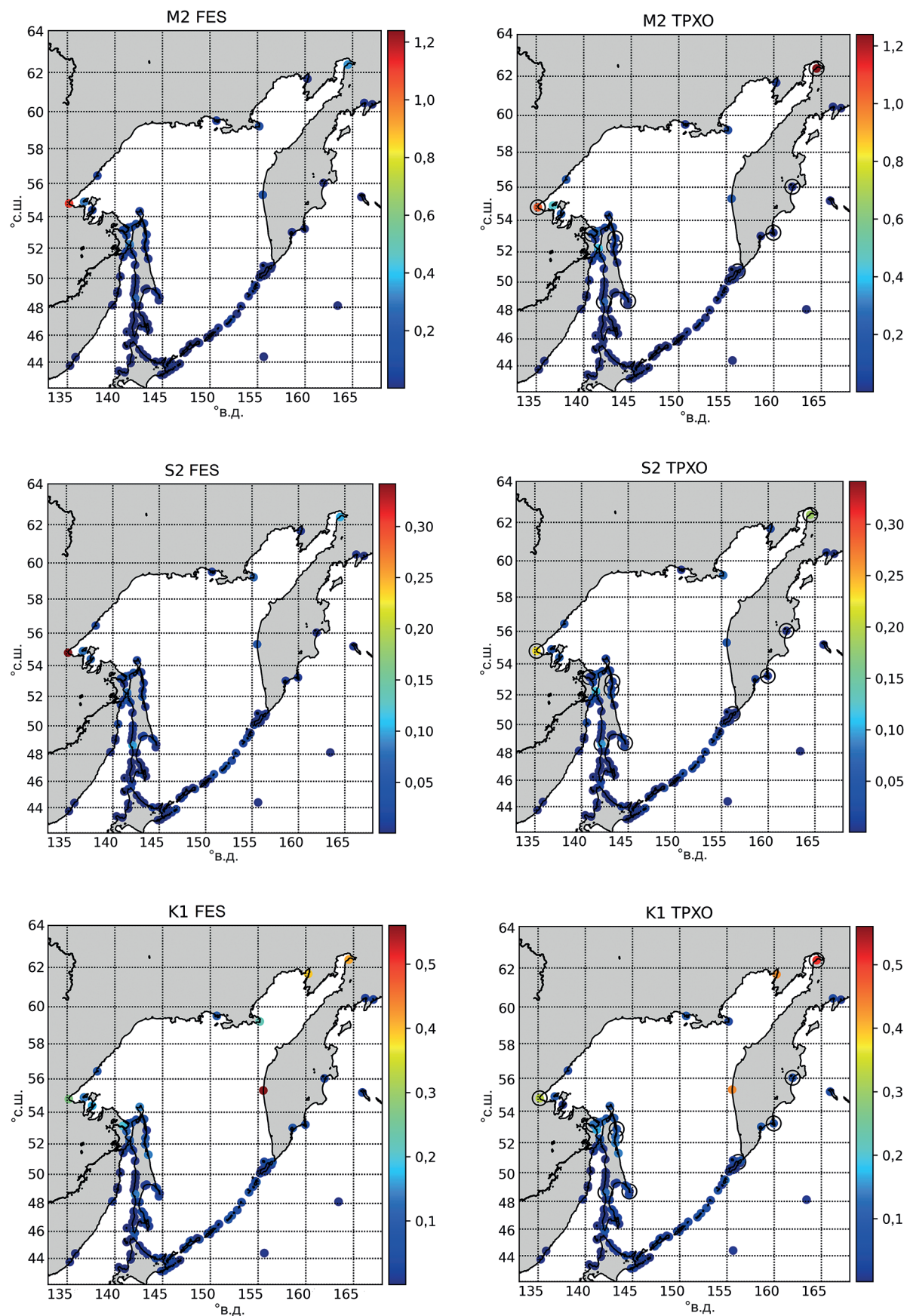


Рис. 2. Окончание рисунка на стр. 52

Fig. 2. Fin p. 52

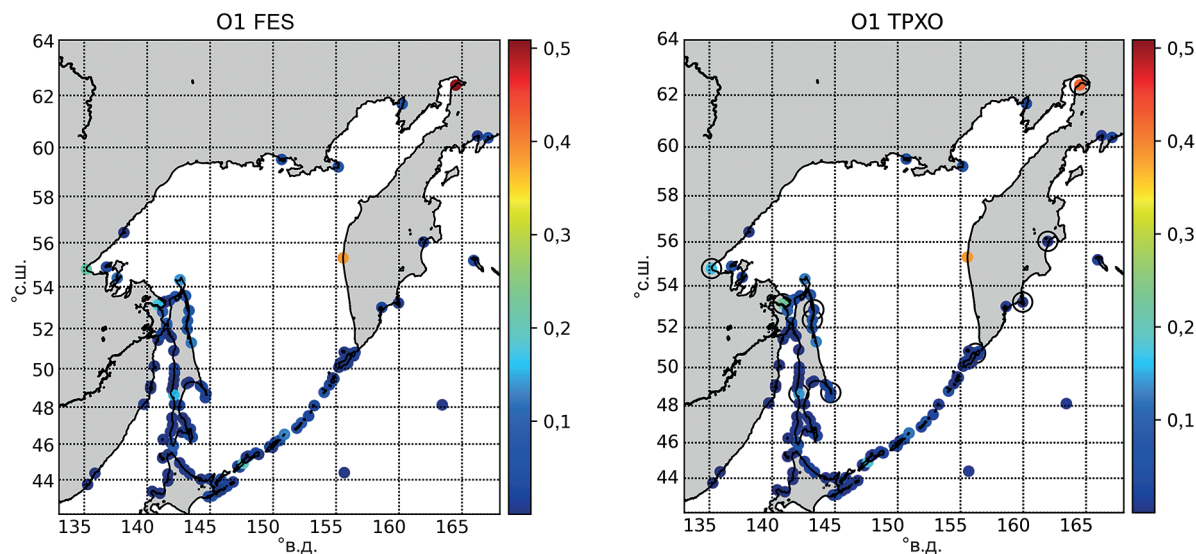


Рис. 2. Векторная ошибка расчета приливного уровня (м) по глобальным моделям FES2014 и TPXO9 в пунктах наблюдений (дополнительные материалы: Приложение, таблица П1) для гармоник M2, S2, K1 и O1. Величина ошибки показана цветом, в черные окружности обведены пункты, в которых координаты пункта не попадали в расчетную ячейку и значения гармонических постоянных принимались равными в ближайшем расчетном узле

Fig. 2. Vector errors in tidal heights (m) using global models FES2014 and TPXO9 at observation points (supplementary materials: Appendix, Table A1) for the M2, S2, K1, and O1 tidal constituents. Error magnitude is indicated by color, with black circles denoting points where coordinates did not fall within the model grid cell, and harmonic constants were assumed equal to the constants at the nearest grid node

В большинстве пунктов векторная ошибка не превышает несколько см для всех четырех гармоник. Исключение составляют пункты: мыс Астрономический (п. 210) и Удская губа (п. 205), где приливы самые большие в регионе (см. табл. П1). На величину ошибки могло повлиять также положение пунктов наблюдений, оба пункта располагаются в вершинах заливов. Так, в пункте губа Лебяжья на Шантарских островах (п. 204), находящемся к востоку от п. 205, векторная ошибка мала, хотя амплитуды приливных колебаний также велики. Для обеих суточных гармоник большие расхождения имеются в п. 211, располагающемся в устье реки на западном побережье Камчатки, для гармоники K1 — в п. 209 в северо-западной части залива Шелихова. Последний пример может быть связан как с модельными ошибками, так и с неточностями в данных наблюдений. Можно отметить некоторое повышение векторных ошибок на северо-восточном побережье Сахалина для суточных гармоник, что может быть связано с влиянием здесь шельфовых волн [44].

На рис. 3 представлены распределения вероятностей векторных ошибок для четырех гармоник и обеих глобальных моделей. Для всех векторных ошибок характерно меньшее значение медианы по сравнению со средним значением, что свидетельствует о наличии единичных больших выбросов. Судя по средним значениям векторных ошибок, FES2014 выглядит более привлекательно по сравнению с TPXO9, при этом медианы ошибок близки, а Q3 (3-й квартиль) для TPXO9 меньше, как и «усы». Этот вывод не относится к S2, где распределения ошибок для обеих глобальных моделей практически совпадают. Большие значения средних векторных ошибок TPXO9 для гармоник M2 и K1 обусловлены выбросами в упомянутых выше двух пунктах: мыс Астрономический (п. 210) и Удская губа (п. 205). При интерполяции результатов моделирования обеих моделей использовалась билинейная интерполяция. Если координаты пункта не попадали в расчетную ячейку, то значения гармонических постоянных в нем принимались равными значениям в ближайшем расчетном узле. Координаты обоих пунктов выходят за пределы расчетной области модели TPXO9 (на рис. 2 такие пункты обведены в черные окружности). Для модели FES2014 все гармонические постоянные были получены путем билинейной интерполяции, т. к. использовался экстраполированный архив результатов модели FES2014.

При детальном анализе сравнения в п. 210 мыс Астрономический (табл. П1) разность амплитуд M2 данных наблюдений и модели TPXO9 оказалась значительно меньше, чем FES2014, 0,085 м по сравнению с -0,322 м, при этом векторная ошибка FES2014 - 0,34 м, TPXO - 1,24 м. Это вызвано большим увеличением фазы в вершине Пенжинской губы в результатах модели TPXO9 (340° по сравнению с 261°, согласно данным наблюдений), что может быть объяснено принятой батиметрией в данном районе (в модели TPXO глубже, чем реальная батиметрия). Возможно также использование неструктурированной сетки при реализации модели FES2014 — позволяет более детально описать береговую линию и увеличить разрешения

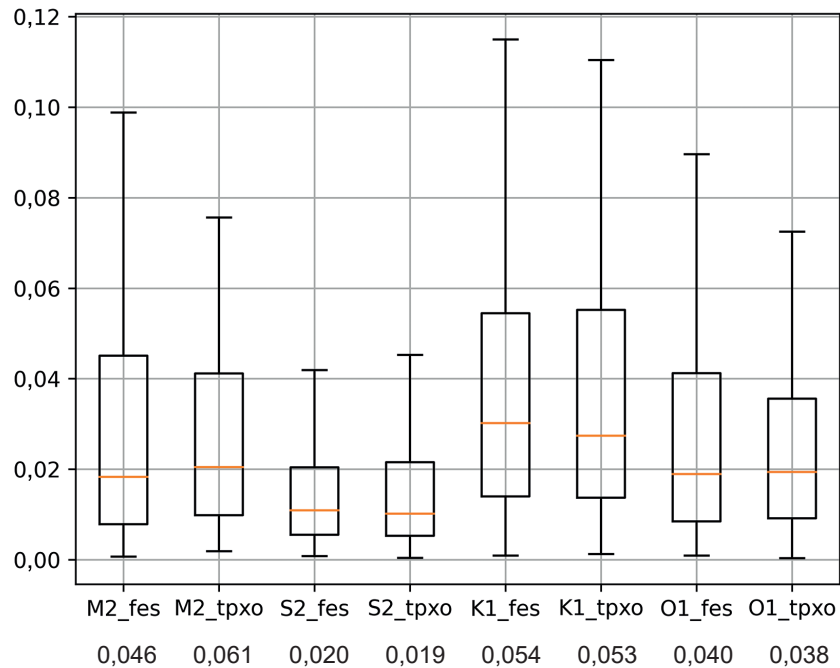


Рис. 3. Диаграмма вероятностей векторных ошибок (ящик с усами). Границы ящика соответствуют Q1 и Q3 (первый и третий квантили), оранжевая линия — Q2 (медиане), усы простираются на $1,5 \times (Q3 - Q1)$ от краев ящика и заканчиваются в самой дальней точке данных в этом интервале. Выбросы не отображаются. Нижней строчкой даны средние значения векторной ошибки (м)

Fig. 3. Probability diagram of vector errors (box plot). The box boundaries correspond to Q1 and Q3 (first and third quartiles), the orange line represents Q2 (the median), and the whiskers extend to $1.5 \times (Q3 - Q1)$ from the edges of the box, ending at the farthest data point within this interval. Outliers are not depicted. The lower row provides the mean values of vector errors (m)

в узких заливах. Выявленные различия в характеристиках колебаний уровня должны проявляться и в приливных течениях. Сравним течения, полученные из глобальных моделей, ограничившись областью специального интереса — акватории, примыкающей к юго-востоку п-ва Камчатка. Приливные течения обычно представляются эллипсами, описывающими вращение вектора течений за приливной период для отдельной гармоники. Эллипс характеризуется своими параметрами: большая и малая полуоси и коэффициент сжатия (полноты), знак которого показывает направления вращения. На рис. 4 показаны эллипсы приливных

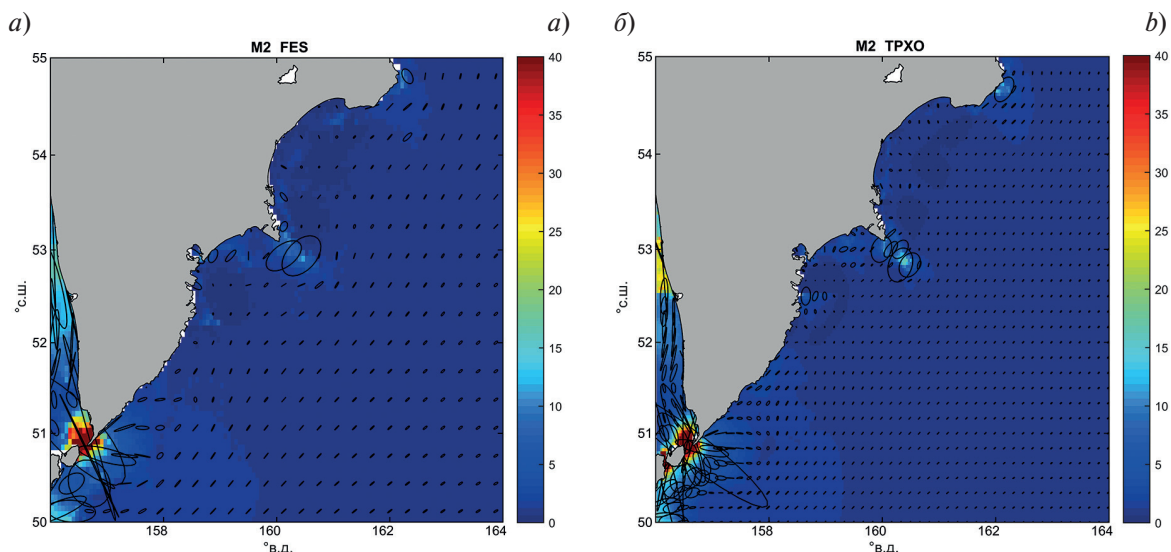


Рис. 4. Окончание рисунка на стр. 54

Fig. 4. Fin p. 54

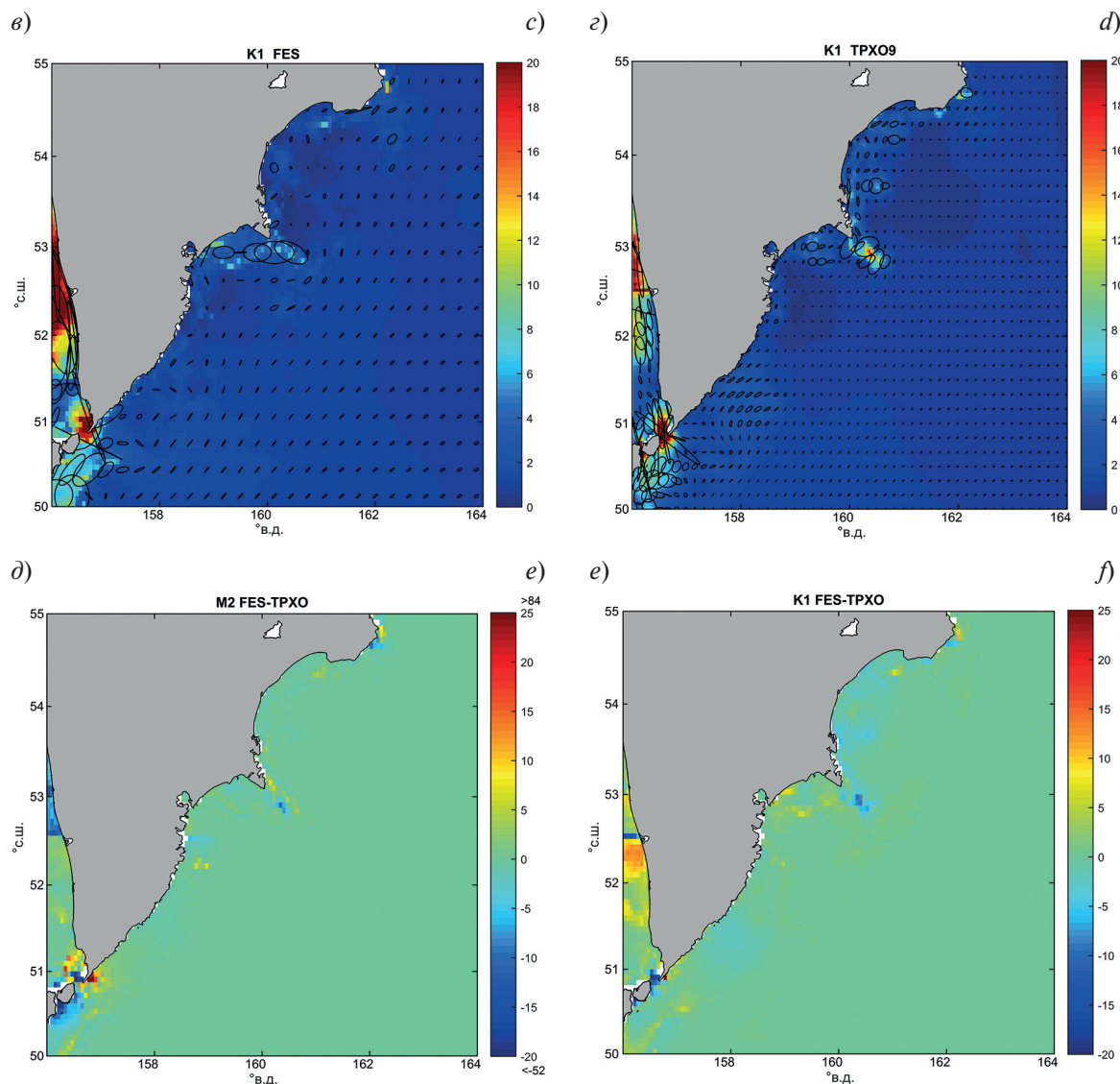


Рис. 4. Эллипсы приливных течений и амплитуда скоростей приливных течений (большая полуось приливного эллипса) в глобальных моделях для гармоник M2 и K1: *a* — течения M2 из FES2014; *b* — течения M2 из TPXO9; *c* — течения K1 из FES2014; *d* — течения K1 из TPXO9; *e* — разницы величины большой полуоси M2 между FES2014 и TPXO9; *f* — разницы величины большой полуоси K1 между FES2014 и TPXO9. Амплитуды скоростей приливных течений показана цветом, эллипсы изображены в каждом 5-м узле сетки, разницы скоростей течений представлена с более грубым разрешением модели FES2014. Скорости течений приведены в см/с

Fig. 4. Tidal current ellipses and amplitude of tidal current velocities (major axis of tidal ellipse) in global models for harmonics M2 and K1: *a* — M2 currents from FES2014; *b* — M2 currents from TPXO9; *c* — K1 currents from FES2014; *d* — K1 currents from TPXO9; *e* — difference in the magnitude of the major axis of M2 between FES2014 and TPXO9; *f* — difference in the magnitude of the major axis of K1 between FES2014 and TPXO9. The amplitudes of tidal current velocities are depicted in color, and the ellipses are displayed at every 5 grid nodes. The difference in current velocities is presented at a coarser resolution for the FES2014 model. Current velocities are given in cm/s

гармоник из глобальных моделей, а также величина разности между модельными амплитудами течений (большими полуосями эллипса). Как видно, различия решений весьма значительны, и могут достигать половины самих значений максимальных течений и даже больше. Особенно это заметно в районе Первого Курильского пролива. На шельфе и континентальном склоне Камчатки различия проявляются локально, прежде всего, в районах с особенностями батиметрии и береговой линии. Тем не менее, они могут достигать 20 см/с обоих знаков.

5. Результаты регионального моделирования в акватории, прилегающей к юго-восточной части п-ва Камчатка

5.1 Сравнение результатов регионального и глобального моделирования.

Чувствительность решения к заданию граничных условий

В таблице показаны оценки качества моделирования суточной и полусуточной гармоник для двух пунктов наблюдений в модельной области у юго-восточного побережья Камчатки. Представлены разности расчета амплитуд и фаз, а также векторные ошибки в сравнении с аналогичными оценками, которые дают глобальные модели для этих пунктов. Как видно, для большинства сравниваемых характеристик наше решение уступает по точности атласу FES2014, но лучше, чем по данным TPXO9. При этом наше решение не использует никакие ассимиляционные процедуры. Различия незначительны в относительных единицах, и отражают локальные особенности колебаний в бухтах. Таким образом, точность модели показывает успешное моделирование баротропного прилива вдоль юго-восточного побережья Камчатки.

Что касается чувствительности решения региональной модели к заданию условий на открытой границе, то сравнение результатов моделирования показало, что приливные колебания уровня слабо чувствительны к выбору глобальной модели FES2014 или TPXO9 как источника информации о приливных колебаниях уровня на открытой границе. Если делать выбор на основе сравнения в 2-х пунктах наблюдений, то использование модели FES2014 дает уменьшение векторной ошибки не более 0,6 см для K1, а для M2 — практически идентичны.

Далее анализируются результаты регионального моделирования, полученные при задании приливных колебаний уровня на открытой границе, заимствованные из глобальной модели TPXO9, т. к. данная модель имеет более высокое разрешения представляемых результатов для конечного потребителя и чаще используется другими пользователями.

Таблица

Table

Ошибки расчета гармонических постоянных в пунктах наблюдений. Ошибки модели FESOM—C представлены с граничными условиями из FES2014 и TPXO9

Model errors of harmonic constants at observation points. Errors of FESOM—C model are presented with boundary conditions from FES2014 and TPXO9

Пункт	Источник	Волна	Амплитуда, м	Фаза, град.	Разность амплитуд, м	Разность фаз, град.	Векторная ошибка, м
п. 188 «Моржовая, бухта», 53.23°с.ш., 159.95°в.д.	наблюдения	M2	0,280	131,0			
	fesom_fes2014		0,268	123,2	0,012	7,8	0,028
	fesom_tpxo9		0,269	122,9	0,011	8,1	0,028
	fes2014		0,279	125,9	0,001	5,1	0,018
	tpxo9		0,282	125,5	−0,002	5,5	0,019
	наблюдения	K1	0,390	334,0			
	fesom_fes2014		0,382	345,5	0,008	−11,5	0,055
	fesom_tpxo9		0,371	346,8	0,019	−12,8	0,061
	fes2014		0,377	344,7	0,013	−10,7	0,051
	tpxo9		0,365	349,4	0,025	−15,4	0,074
п. 189 «Петропавловск н/К», 53.02°с.ш., 158.63°в.д.	наблюдения	M2	0,320	136,0			
	fesom_fes2014		0,300	129,4	0,020	6,6	0,029
	fesom_tpxo9		0,303	129,4	0,017	6,6	0,028
	fes2014		0,284	132,6	0,036	3,4	0,028
	tpxo9		0,300	131,4	0,020	4,6	0,022
	наблюдения	K1	0,430	333,0			
	fesom_fes2014		0,387	349,2	0,043	−16,2	0,087
	fesom_tpxo9		0,379	350,1	0,051	−17,1	0,092
	fes2014		0,384	348,1	0,046	−15,1	0,082
	tpxo9 *		0,371	351,3	0,059	−18,3	0,099

Примечание: * расположение пункта выходит за границы области источника данных, при экстраполяции применялся метод «ближайшего соседа»

5.2. Приливные карты

Приливные карты основных полусуточной (M2) и суточной (K1) гармоник не демонстрируют принципиальных различий в пространственной картине амплитуд и фаз (рис. 5). Фазы нарастают в юго-западном направлении, а амплитуды плавно увеличиваются от глубоководной области к берегу. Такой рисунок приливной карты типичен для крупномасштабной приливной волны Кельвина. Волна Кельвина распространяется вдоль континентального шельфа, где неравномерные глубина и береговая линия порождают некоторую изменчивость характеристик колебаний уровня. Локальные максимумы амплитуд наблюдаются у мыса Шипунский и в Авачинском заливе, и более явно выражены для суточной гармоник K1. Можно заметить также, что вдоль континентального склона и на шельфе амплитуды и фазы гармоник K1 испытывают большую изменчивость по сравнению с полусуточной гармоникой M2. Вблизи мыса Лопатка особенности модельного решения связаны с градиентом заданных здесь характеристик колебаний уровня на открытой границе, которые «ощущают» влияние близко расположенного Первого Курильского пролива.

5.3. Моноприливные течения

Рисунок 6 представляет приливные течения гармоник M2 и K1. Течения суточной гармоник преобладают над течениями полусуточной, обнаруживая усиление не только над банкой у мыса Шипунский, но и на шельфе северной части Авачинского залива и в юго-западной части области, где шельф становится заметно шире. Это может быть связано с образованием шельфовых волн суточного диапазона, эффект которых проявляется лучше в изменчивости течений. На мелких участках шельфа течения обеих составляющих отклоняются от режима близкого к реверсивному, сжатие эллипсов уменьшается, что типично в зонах больших значений диссипации энергии донным трением. Пространственная структура течений близка к той, которая была рассмотрена ранее для решений из глобальных моделей. Наше решение по амплитудам скорости ближе к полю течений из FES2014, за исключением юго-западной части модельной области, при условии, что граничная информация была заимствована из модели TPX09.

5.4. Суммарный прилив

Суммарный прилив в модельных расчетах задан на границе комбинацией 12 гармонических составляющих и рассчитан с 1 января 2022 года. Для анализа используются результаты моделирования за синодический месяц 29,5 суток, приходящийся на июнь 2022 года, этот месяц был выбран как период, в котором наблюдаются максимальные значения прилива по астрономическим условиям в 2016–2023 гг.

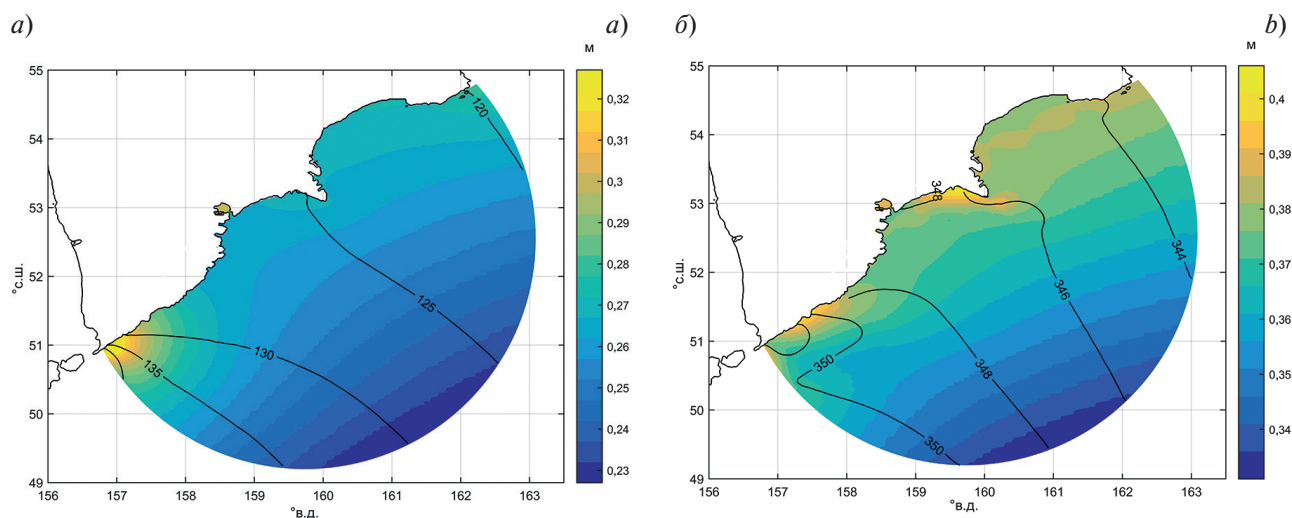


Рис. 5. Приливные карты колебаний уровня основных гармоник (региональная модель): а — M2; б — K1. Амплитуда колебаний показана цветовой шкалой, сплошные линии (котидали) — значения фаз в градусах, приведены к нулевому меридиану

Fig. 5. Tidal maps for principal harmonics (regional model): а — M2; б — K1. The amplitude is shown using a color scale. Solid lines (cotidal lines) represent phase values in degrees, referenced to the zero meridian

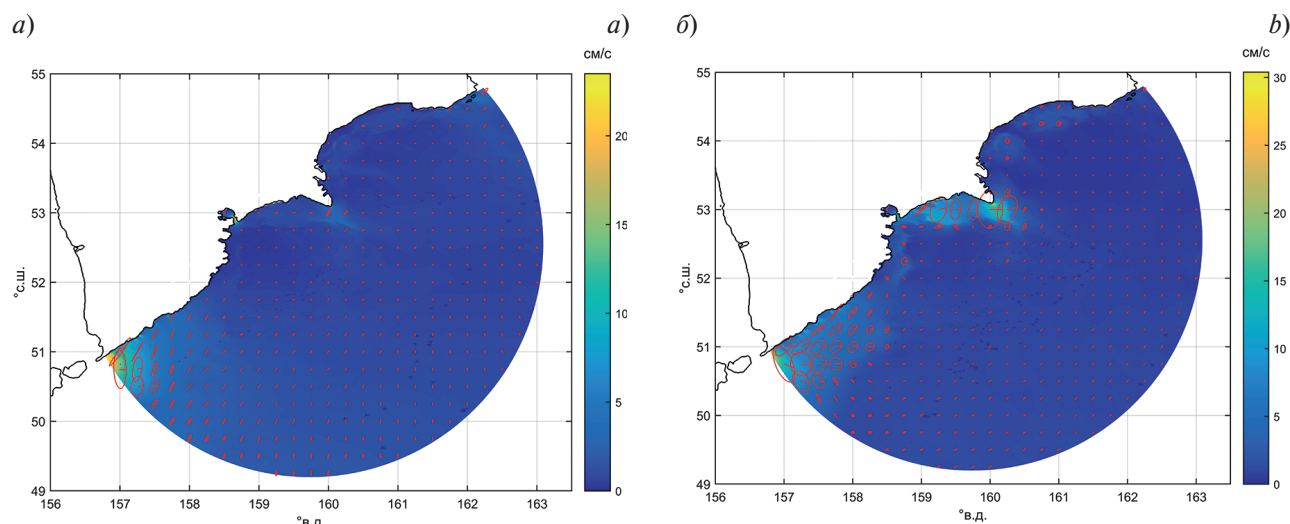


Рис. 6. Эллипсы приливных течений основных гармоник (региональная модель): *a* — M2; *b* — K1. Амплитуда скорости приливных течений (большая полуось приливного эллипса) изображена цветом, эллипсы показаны после интерполяции характеристик течений на равномерную сетку

Fig. 6. Tidal current ellipses of principal harmonics (regional model): *a* — M2; *b* — K1. The amplitude of tidal current velocity (major axis of tidal ellipse) is represented by color. The ellipses are shown after interpolating current characteristics onto a uniform grid

На рис. 7 показаны характеристики течений суммарного прилива. Максимальные скорости течения могут достигать 40 см/с на банке южнее мыса Шипунский. Повышенные значения скоростей отмечаются в Авачинском заливе, в том числе над глубоководными каньонами и далее на всем шельфе юго-востока Камчатки. В Кроноцком заливе течения заметно слабее. Особый интерес представляет остаточная приливная циркуляция, которая получается осреднением за период анализа скоростей течений, и относительная завихренность $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, где u и v — зональная и меридиональная составляющая скорости течений для правой системы координат, в которой ось x направлена на восток, ось y — на север. Остаточные течения — результат нелинейного взаимодействия потока с резкой топографией и отдельных приливных гармоник

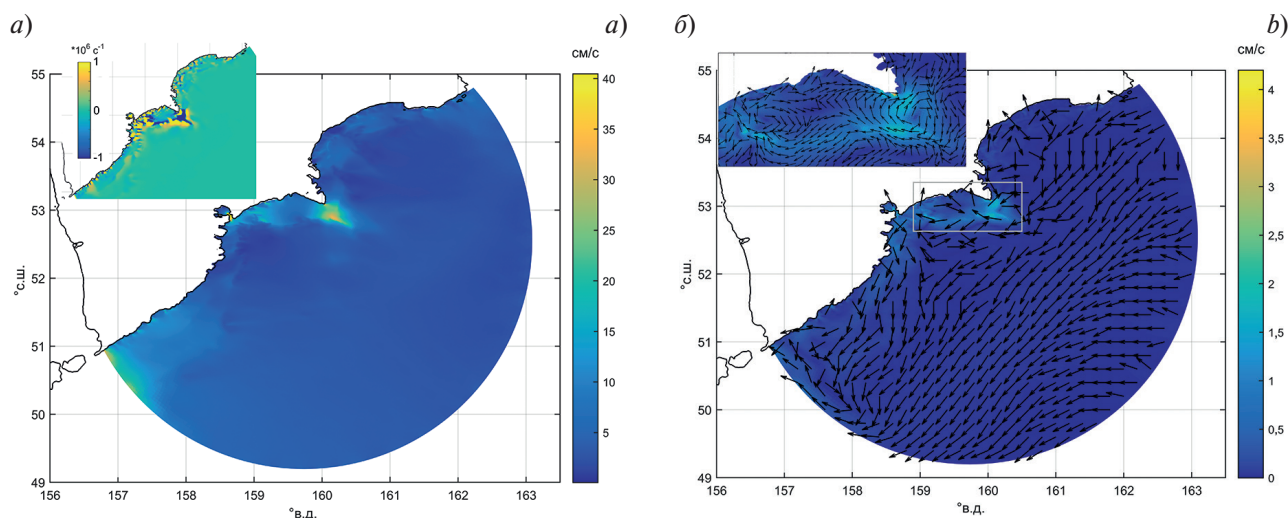


Рис. 7. Результаты моделирования суммарного прилива: *a* — максимальные течения за синодический месяц; *b* — остаточные (средние) течения за синодический месяц, интерполированные на равномерную сетку. На врезках *a* и *b* показаны остаточная завихренность и циркуляция, соответственно

Fig. 7. Results of modeling the total tidal currents: *a* — maximum currents for the synodic month; *b* — residual (average) currents for the synodic month, interpolated onto a uniform grid. Insets in *a* and *b* show the residual vorticity and circulation, respectively

между собой. Этот тип циркуляции играет важную роль в динамике шельфовой зоны, обеспечивая стационарный перенос, вызывая апвеллинг и формируя длительно живущие зоны вихрей и конвергенции течений. Как видно из рис. 7, б прилив создает фоновый перенос юго-западного направления во всей области и антициклонический вихрь к югу от мыса Шипунский. Локальные экстремумы в поле остаточной приливной завихренности (рис. 7, а, врезка) показывают, что вихревые структуры на шельфе и склоне заливов повсеместны. Вдоль склонов каньонов модель предсказывает сдвиговые приливные течения, что хорошо видно по резким градиентам завихренности со сменой её знака.

6. Заключение

Численная модель приливной динамики была успешно реализована для моделирования баротропного прилива вдоль юго-восточной части п-ва Камчатка и прилегающей акватории. Получены новые детальные приливные карты уровня и течений основных гармоник в акватории. Особенности модельного прилива объяснены с позиции волновой физики: в структуре прилива доминирует волна Кельвина, а в суточной гармонике ощутимо влияние захваченных шельфовых волн, которое проявляется во вдольбереговой изменчивости характеристик прилива, не так сильно выраженной для полусуточной составляющей. Моделирование суммарного прилива было выполнено впервые для данного района. Оценены максимальные течения и вихревые структуры, связанные с приливными течениями. Расчет выявил значимую остаточную приливную динамику на шельфе и материковом склоне Авачинского залива.

Задача моделирования прилива предварялась переоценкой сведений, которые доступны из баз глобальных приливных атласов TPXO9 и FES2014. Ранее сообщалось, что модели глобальных океанских приливов имеют существенные расхождения в мелководных прибрежных водах. Наш анализ, выполненный для северо-западной части Тихого океана, показал, что эти расхождения могут быть не только в таких районах. Ни одна из глобальных моделей не демонстрирует одинаково превосходных характеристик в некоторых зонах этого региона при сравнении с данными наблюдений, особенно в Охотском море. Это могут быть и зоны с большими амплитудами колебаний уровня, сильными приливными течениями (например, в проливах) и необычными локальными эффектами, порождаемыми, например, захваченными шельфовыми волнами. Однако средние ошибки по региону (путем осреднения по всем пунктам наблюдений) оказались невысоки и близки к заявленным оценкам точности. Расхождения с наблюдениями могут быть обусловлены как методами ассимиляции данных, так и разрешением сеток, используемых в глобальных приливных моделях.

Другой источник ошибок — неточные данные береговых наблюдений. Нам не известно, какие из мареографных пунктов наблюдений были использованы для ассимиляции в глобальных моделях, а какие — для сравнения и оценок их точности. Была проведена ревизия открытых справочных источников информации о гармонических постоянных колебаний уровня в северо-западном регионе Тихого океана. Были устранены ошибки и опечатки, найденные при анализе этой информации. В результате, новая верифицированная база данных гармонических постоянных колебаний уровня в регионе была использована для наших оценок пространственного распределения ошибок глобальных моделей в регионе.

Полученные нами результаты скорее подтверждают вывод, о том, что к данным, полученным по ассимиляционным глобальным приливным моделям, следует относиться критически, например, при оценках энергетики приливов или при назначении граничных условий в региональном моделировании. В нашем случае, выбор граничных условий из двух возможных источников практически не повлиял на результаты моделирования в водах, примыкающих к юго-восточной части Камчатского полуострова. Точность нашей региональной модели без использования ассимиляции данных при сравнении в береговых приливных пунктах не хуже тех, которые дают глобальные модели. К сожалению, информация о наблюдениях за приливными течениями отсутствует в районе, где моделировался прилив. В то же время, мы показали, что в этом же районе между данными глобальных моделей есть значимые расхождения касаясь характеристик максимальных приливных течений, достигающие половины самой величины их скорости. Расчетные суточные и полусуточные приливные течения по региональной модели в одних частях области близки к глобальным решениям, а в других имеют отличия. Эти противоречия мотивируют дальнейшие исследования.

Дополнительные материалы

Приложение. [https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(4\)-4-suppl](https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4-suppl)

Supplementary materials

Appendix. [https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(4\)-4-suppl](https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4-suppl)

Благодарности

Авторы благодарны А.А. Андросову за консультации по модели FESOM—С и В.А. Прощаковой за помощь в оцифровке приливных таблиц.

Acknowledgements

Gratitude is extended to A.A. Androsov for consultations regarding the FESOM—C model and to V.A. Proshchakova for assistance with digitizing tide tables.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174/>.

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-17-00174, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00174/>

Литература

1. *Stammer D., Ray R.D., Andersen O.B.* et al. Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models // *Reviews of Geophysics*. 2014. Vol. 52. P. 243–282. doi:10.1002/2014RG000450
2. *Cipollini P., Benveniste J., Birol F.* et al. Satellite altimetry in coastal regions. In: *Satellite altimetry over oceans and land surfaces* / Eds. Stammer D., Cazenave A. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017. P. 343–380. doi:10.1201/9781315151779-11
3. *Ranji Z., Hejazi K., Soltanpour M., Allahyar M.R.* Inter-comparison of recent tide models for the Persian Gulf and Oman Sea // *Coastal Engineering Proceedings*. 2016. N 35, currents. 9. doi:10.9753/icce.v35.currents.9
4. *Fu Y., Feng Y., Zhou D.* et al. Accuracy assessment of global ocean tide models in the South China Sea using satellite altimeter and tide gauge data // *Acta Oceanologica Sinica*. 2020. Vol. 39. P. 1–10. doi:10.1007/s13131-020-1685-y
5. *Sun W., Zhou X., Zhou D., Sun Y.* Advances and accuracy assessment of ocean tide models in the Antarctic Ocean // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. doi:10.3389/feart.2022.757821
6. *Khomsin D., Pratomo G., Rohmawati C.N.* Analysis of accuracy comparison tidal global (FES2014, TPX09) and regional (BIG Prediction) models to the existing tides in Surabaya and surrounding waters // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. N 936. P. 012028. doi:10.1088/1755-1315/936/1/012028
7. *Hart-Davis M.G., Dettmering D., Sulzbach R.* et al. Regional Evaluation of Minor Tidal Constituents for Improved Estimation of Ocean Tides // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 16, N 3310. doi:10.3390/rs13163310
8. *Lee J.-C., Lee D.-H.* Accuracy assessment of recent global ocean tide models using tide gauge measurements from the East Sea of Korea // *Journal of Coastal Research*. 2023. Vol. 39, N 2. P. 354–359. doi:10.2112/JCOASTRES-D-22TM-00010.1
9. *de Azkue M.F., D'Onofrio E.E., Jacobs A.* Assessing the accuracy of ocean tide models by using variance of residuals of satellite sea level heights in the Patagonian shelf // *Anales Del Instituto De La Patagonia*. 2022. Vol. 50. doi:10.22352/AIP202250004
10. *Ahn J.E., Ronan A.D.* Impact of discrepancies between global ocean tide models on tidal simulations in the Shinnecock Bay area // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2019. Vol. 145, N 2. doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000500
11. *Saraceno M., D'Onofrio E.E., Fiore M.E., Grismeyer W.H.* Tide model comparison over the Southwestern Atlantic Shelf // *Continental Shelf Research*. 2010. Vol. 30, N 17. P. 1865–1875. doi:10.1016/j.csr.2010.08.014
12. *Ray R.D., Loomis B.D., Luthcke S.B., Rachlin K.E.* Tests of ocean-tide models by analysis of satellite-to-satellite range measurements: an update // *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 217. P. 1174–1178. doi:10.1093/gji/ggz062
13. *Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. Vol. 19, N 2. P. 183–204. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0183: EIMOBO>2.0.CO;2
14. *Lyard F., Allain D., Cancet M., Carrère L., Picot N.* 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

15. Варкентин А.И., Саушкина Д.Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. // Труды ВНИРО. 2022. Vol. 189. P. 105–119. doi:10.36038/2307-3497-2022-189-105-119
16. Suzuki K., Kanari S. Tidal simulation of the Sea of Okhotsk // Kaiyo Kagaku. 1986, Vol. 18 P. 455–463. (in Japanese)
17. Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk // Journal of Physical Oceanography 1998. Vol. 28, N 7. P. 1389–1409. doi:10.1029/93jc01363
18. Мороз В.В., Богданов К.Т., Ростов В.И., Ростов И.Д. Электронный атлас приливов окраинных морей северной Пацифики // Вестник ДВО РАН. 2010. № 1. С. 102–106.
19. Nekrasov A.V., Romanenkov D.A. Impact of tidal power dams upon tides and environmental conditions in the Sea of Okhotsk // Continental Shelf Research. 2010. Vol. 30, N 6. P. 538–552. doi:10.1016/j.csr.2009.06.005
20. Nakamura T., Awaji T., Hatayama T., Kazunori A. Tidal exchange through Kuril Straits // Journal of Physical Oceanography. 2000. Vol. 30. P. 1622–1644. doi:10.1175/1520-0485(2000)030<1622: TETTKS>2.0.CO;2
21. Nakamura T., Matthews J.P., Awaji T., Mitsudera H. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow // Journal of Geophysical Research. Oceans. 2012. Vol. 117, N C12. doi:10.1029/2011JC007754
22. Tanaka Y., Hibiya T., Niwa Y., Iwamae N. Numerical study of K1 internal tides in the Kuril Straits // Journal of Geophysical Research. 2010. Vol. 115, N C9. doi:10.1029/2009jc005903
23. Zaron E.D. 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
24. Shu H.W., Mitsudera H., Yamazaki K. et al. Tidally modified western boundary current drives interbasin exchange between the Sea of Okhotsk and the North Pacific // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, N 12037. doi:10.1038/s41598-021-91412-y
25. Любичкий Ю.В. Об оценке качества прогнозов суммарных уровней приливного моря // Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ-65 лет». Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 52–62.
26. 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. doi:10.7868/S2073667321030023
27. Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 280 с.
28. Шевченко Г.В., Романов А.А. Определение параметров суточных приливных шельфовых волн в районе Северных Курильских островов по данным спутниковой альтиметрии // Исследование Земли из космоса. 2008. № 3. С. 76–87.
29. Таблицы приливов. Гармонические постоянные для предвычисления приливов. Л.: Изд. Гидрографического управления ВМФ СССР. 1948. Т. 2. 295 с.
30. Таблицы приливов. Воды Азиатской части СССР и прилегающих зарубежных районов. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 192 с.
31. Admiralty tide tables. Vol.41998. / NP 204. Pacific Ocean (Including tidal stream tables). Taunton, Somerset: United Kingdom Hydrographic Office. 1998. NP204.
32. National Data Buoy Center (NDBC). Current online. 2023. URL: https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=21419; https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=21416 (дата обращения: 20.06.2023).
33. WXTIDE32. Windows tide and current prediction program. URL: <http://www.wxtide32.com/> (дата обращения: 20.06.2023).
34. Androsov A., Fofonova V., Kuznetsov I. et al. FESOM–C v.2: coastal dynamics on hybrid unstructured meshes // Geoscientific Model Development. 2019. Vol. 12. P. 1009–1028. doi:10.5194/gmd-12-1009-2019
35. Зинченко В.А., Романенков Д.А., Андросов А.А. Сравнение вычислительной эффективности модели FESOM–с для расчета прибрежной баротропной гидродинамики при использовании различных неструктурированных сеток // Процессы в геосредах. 2018. № 3 (17). С. 227–228.
36. Kuznetsov I., Androsov A., Fofonova V. et al. Evaluation and Application of Newly Designed Finite Volume Coastal Model FESOM–C, Effect of Variable Resolution in the Southeastern North Sea // Water. 2020. Vol. 12, N 5. P. 1412. doi:10.3390/w12051412
37. Fofonova V., Androsov A., Sander L. et al. Non-linear aspects of the tidal dynamics in the Sylt-Rømø Bight, south-eastern North Sea // Ocean Science. 2019. Vol. 15. P. 1761–1782. doi:10.5194/os-15-1761-2019
38. Fofonova V., Kärrnä T., Klingbeil K. et al. Plume spreading test case for coastal ocean models // Geoscientific Model Development. 2021. Vol. 14, N 11. P. 6945–6975. doi:10.5194/gmd-14-6945-2021
39. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. Vol. 79, N 11. P. 1309–1331. doi:10.1002/nme.2579

40. Holt J., Hyder P., Ashworth M. et al. Prospects for improving the representation of coastal and shelf seas in global ocean models // *Geoscientific Model Development*. 2017. Vol. 10. P. 499–523. doi:10.5194/gmd-10-499-2017
41. NOAA National Centers for Environmental Information. 2022: ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model. NOAA National Centers for Environmental Information. doi: 10.25921/fd45-gt74 (дата обращения: 27.06.2023).
42. Дуванин А.И. Приливы в море. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 390 с.
43. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского, Н.П. Гоптарева, Ф.С. Терзиева. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 398 с.
44. Shevchenko G.V., Rabinovich A.B., Thomson R.E. Sea-ice drift on the Northeastern Shelf of Sakhalin Island // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. Vol. 34, N 11. P. 2470–2491. doi:10.1175/JPO2632.1

References

1. Stammer D., Ray R.D., Andersen O.B. et al. Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models. *Reviews of Geophysics*. 2014, 52, 243–282. doi:10.1002/2014RG000450
2. Cipollini P., Benveniste J., Birol F. et al. Satellite altimetry in coastal regions. *Satellite altimetry over oceans and land surfaces* / Eds. Stammer D., Cazenave A. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017. pp. 343–380. doi:10.1201/9781315151779-11
3. Ranji Z., Hejazi K., Soltanpour M., Allahyar M.R. Inter-comparison of recent tide models for the Persian Gulf and Oman Sea. *Coastal Engineering Proceedings*. 2016, 35, currents. 9. doi:10.9753/icce.v35.currents.9
4. Fu Y., Feng Y., Zhou D. et al. Accuracy assessment of global ocean tide models in the South China Sea using satellite altimeter and tide gauge data. *Acta Oceanologica Sinica*. 2020, 39, 1–10. doi:10.1007/s13131-020-1685-y
5. Sun W., Zhou X., Zhou D., Sun Y. Advances and accuracy assessment of ocean tide models in the Antarctic Ocean. *Frontiers in Earth Science*. 2022, 10. doi:10.3389/feart.2022.757821
6. Khomsin D., Pratomo G., Rohmawati C.N. Analysis of accuracy comparison tidal global (FES2014, TPX09) and regional (BIG Prediction) models to the existing tides in Surabaya and surrounding waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, 936, 012028. doi:10.1088/1755-1315/936/1/012028
7. Hart-Davis M.G., Dettmering D., Sulzbach R. et al. Regional Evaluation of Minor Tidal Constituents for Improved Estimation of Ocean Tides. *Remote Sensing*. 2021, 13(16), 3310. doi:10.3390/rs13163310
8. Lee J.-C., Lee D.-H. Accuracy assessment of recent global ocean tide models using tide gauge measurements from the East Sea of Korea. *Journal of Coastal Research*. 2023, 39(2), 354–359. doi:10.2112/JCOASTRES-D-22TM-00010.1
9. de Azkue M.F., D'Onofrio E.E., Jacobs A. Assessing the accuracy of ocean tide models by using variance of residuals of satellite sea level heights in the Patagonian shelf. *Anales Del Instituto De La Patagonia*. 2022, 50. doi:10.22352/AIP202250004
10. Ahn J.E., Ronan A.D. Impact of discrepancies between global ocean tide models on tidal simulations in the Shinnecock Bay area. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2019, 145(2). doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000500
11. Saraceno M., D'Onofrio E.E., Fiore M.E., Grismeyer W.H. Tide model comparison over the Southwestern Atlantic Shelf. *Continental Shelf Research*. 2010, 30(17), 1865–1875. doi:10.1016/j.csr.2010.08.014
12. Ray R.D., Loomis B.D., Luthcke S.B., Rachlin K.E. Tests of ocean-tide models by analysis of satellite-to-satellite range measurements: an update. *Geophysical Journal International*. 2019, 217, 1174–1178. doi:10.1093/gji/ggz062
13. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002, 19(2), 183–204. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0183: EIMOBO>2.0.CO;2
14. Lyard F., Allain D., Cancet M., Carrère L., Picot N. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. *Ocean Science, European Geosciences Union*. 2021, 17, 615–649. doi:10.5194/os-17-615-2021
15. Varkentin A.I., Saushkina D.Y. Some issues of walleye pollock reproduction in the pacific waters adjacent to the Kamchatka peninsula and the northern Kuril Islands in 2013–2022. *Trudy VNIRO*. 2022, 189, 105–119. doi:10.36038/2307-3497-2022-189-105-119 (in Russian).
16. Suzuki K., Kanari S. Tidal simulation of the Sea of Okhotsk. *Kaiyo Kagaku*. 1986, 18, 455–463 (in Japanese).
17. Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk. *Journal of Physical Oceanography*. 1998, 28(7), 1389–1409. doi:10.1029/93jc01363
18. Moroz V.V., Bogdanov K.T., Rostov V.I., Rostov I.D. Electronic Atlas of tides of the marginal seas of the Northern Pacific. *Vestnik DVO RAN*. 2010, 1, 102–106 (in Russian).
19. Nekrasov A.V., Romanenkov D.A. Impact of tidal power dams upon tides and environmental conditions in the Sea of Okhotsk. *Continental Shelf Research*. 2010, 30(6), 538–552. doi:10.1016/j.csr.2009.06.005
20. Nakamura T., Awaji T., Hatayama T., Kazunori A. Tidal exchange through Kuril Straits. *Journal of Physical Oceanography*. 2000, 30, 1622–1644. doi:10.1175/1520-0485(2000)030<1622: TETTKS>2.0.CO;2
21. Nakamura T., Matthews J.P., Awaji T., Mitsudera H. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2012, 117(C12). doi:10.1029/2011JC007754

22. Tanaka Y., Hibiya T., Niwa Y., Iwamae N. Numerical study of K1 internal tides in the Kuril Straits. *Journal of Geophysical Research*. 2010, 115(C9). doi:10.1029/2009jc005903
23. Zaron E.D. Topographic and frictional controls on tides in the Sea of Okhotsk. *Ocean Modelling*. 2017, 117, 1–11. doi:10.1016/j.ocemod.2017.06.011
24. Shu H.W., Mitsudera H., Yamazaki K. et al. Tidally modified western boundary current drives interbasin exchange between the Sea of Okhotsk and the North Pacific. *Scientific Reports*. 2021, 11(12037). doi:10.1038/s41598-021-91412-y
25. Lyubitsky Yu.V. On assessing the quality of forecasts of total tidal sea levels. *Anniversary issue «FERHRI-65 years».* Vladivostok, Dalnauka, 2015, 52–62.
26. Rodionov A.A., Androsov A.A., Fofonova V.V., Kuznetsov I.S., Voltzinger N.E. Modeling the tidal dynamics of the northern straits of the Kuril Ridge. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021, 14(3), 20–34. doi:10.7868/S2073667321030023 (in Russian).
27. Efimov V.V., Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Fain I.V. Ocean Boundary Waves. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985. 280 p. (in Russian).
28. Shevchenko G.V., Romanov A.A. Determination of diurnal shelf waves parameters in the area of north Kuril Islands from the satellite altimetry data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2008, 3, 76–87 (in Russian).
29. Tide tables. Harmonic constants for tide prediction. Leningrad. Hydrographic Department of the Navy of USSR. 1948. V. 2. 295 p. (in Russian).
30. Tide tables. Waters of the Asian Part of USSR and adjacent foreign regions. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1960. 192 p. (in Russian).
31. Admiralty tide tables. Vol.41998. / NP 204. Pacific Ocean (Including tidal stream tables). Taunton, Somerset, United Kingdom Hydrographic Office, 1998. NP204.
32. National Data Buoy Center (NDBC). Current online. 2023. URL: https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=21419; https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=21416 (Accessed: 20.06.2023).
33. WXTIDE32. Windows tide and current prediction program. URL: <http://www.wxtide32.com/> (Accessed: 20.06.2023).
34. Androsov A., Fofonova V., Kuznetsov I. et al. FESOM–C v.2: coastal dynamics on hybrid unstructured meshes. *Geoscientific Model Development*. 2019, 12, 1009–1028. doi:10.5194/gmd-12-1009-2019
35. Zinchenko V.A., Romanenkov D.A., Androsov A.A., Zinchenko V.A., Romanenkov D.A., Androsov A.A. Comparison of the computational efficiency of the FESOM-c model for calculating coastal barotropic hydrodynamics using different unstructured meshes. *Processes in GeoMedia*. 2018, 3(17), 227–228 (in Russian).
36. Kuznetsov I., Androsov A., Fofonova V. et al. Evaluation and Application of Newly Designed Finite Volume Coastal Model FESOM–C, Effect of Variable Resolution in the Southeastern North Sea. *Water*. 2020, 12(5), 1412. doi:10.3390/w12051412
37. Fofonova V., Androsov A., Sander L. et al. Non-linear aspects of the tidal dynamics in the Sylt-Rømø Bight, south-eastern North Sea. *Ocean Science*. 2019, 15, 1761–1782. doi:10.5194/os-15-1761-2019
38. Fofonova V., Kärrnä T., Klingbeil K. et al. Plume spreading test case for coastal ocean models. *Geoscientific Model Development*. 2021, 14(11), 6945–6975. doi:10.5194/gmd-14-6945-2021
39. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2009, 79(11), 1309–1331. doi:10.1002/nme.2579
40. Holt J., Hyder P., Ashworth M. et al. Prospects for improving the representation of coastal and shelf seas in global ocean models. *Geoscientific Model Development*. 2017, 10, 499–523. doi:10.5194/gmd-10-499-2017
41. NOAA National Centers for Environmental Information. 2022: ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.25921/fd45-gt74 (Accessed: 27.06.2023).
42. Duvanin A.I. Sea Tides. Leningrad, Gidrometeoizdat. 1960. 390 p. (in Russian).
43. Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas. Vol. 9. The Okhotsk Sea. Part. 1. Hydrometeorological conditions. St. Petersburg, Gidrometeoizdat. 2003. 398 p. (in Russian).
44. Shevchenko G.V., Rabinovich A.B., Thomson R.E. Sea-ice drift on the Northeastern Shelf of Sakhalin Island. *Journal of Physical Oceanography*. 2004, 34(11), 2470–2491. doi:10.1175/JPO2632.1

Об авторах

РОМАНЕНКОВ Дмитрий Анатольевич, кандидат географических наук,
 РИНЦ AuthorID: 61515, ORCID ID: 0009-0005-0374-486X, Scopus AuthorID: 6506855768,
 WoS ResearcherID: U-8280-2017, dmromanenkov@yandex.ru
 СОФЬИНА Екатерина Владимировна, кандидат физико-математических наук,
 РИНЦ AuthorID: 169097, ORCID ID: 0000-0001-9206-8253, Scopus AuthorID: 23111468200,
 WoS ResearcherID: E-3920-2014, sofjina_k@mail.ru
 РОДИКОВА Александра Евгеньевна, rodikovaa99@gmail.com