

Характеристики приливов в Мировом океане по данным глобальных приливных моделей

Н. Г. Репинская, Р. И. Май

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Репинская, Н. Г., Май, Р. И. (2024). Характеристики приливов в Мировом океане по данным глобальных приливных моделей. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (4), 764–780. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.408>

В статье приведены численные характеристики пространственного распределения типов и высот приливов в Мировом океане по данным трех глобальных приливных моделей: EOT20, FES2014 и TPXO9. Для получения этих оценок предварительно было проведено сравнение методов определения типов прилива, разработан алгоритм быстрого предвычисления высот прилива на длительный отрезок времени для сеточной области, охватывающей весь Мировой океан, реализован метод расчета плотности вероятности пространственного распределения характеристик прилива. Характеристики прилива были определены как во всем Мировом океане, так и в отдельных океанах. Кроме того, получены оценки изменения характеристик прилива в зависимости от широты, расстояния до побережья и глубины моря. Для высот и типа приливов были рассчитаны средние, медианные и модовые значения. Наши результаты показали, что основные закономерности распределения характеристик приливов остаются неизменными вне зависимости от выбранной глобальной приливной модели. Выявлено, что по всей площади Мирового океана доминирует полусуточный тип прилива. Впервые определено распределение частот появления различных высот во всем Мировом океане и в отдельных его частях. Установлено, что плотность вероятности высот прилива имеет одномодовое распределение с положительной асимметрией. Наиболее часто встречаются средние высоты прилива, равные 0.6 м, и экстремальные высоты прилива, равные 0.9 м. Ярче всего проявляются зависимости характеристик приливов от широты, при этом указанная зависимость не симметрична относительно экватора. Пространственное распределение типов прилива не зависит от глубины моря и расстояния до побережья, в то время как высоты прилива уменьшаются с удалением от материка.

Ключевые слова: приливы, глобальные приливные модели, тип прилива, высота прилива.

1. Введение

Исследование приливных явлений в Мировом океане является одной из задач современной океанологии. Долгое время основным методом описания характеристик прилива служил эмпирический подход: сложная функция изменения прилива представлялась в виде набора гармонических колебаний. Каждое такое колебание описывалось амплитудой и фазой, называемыми гармоническими постоянными. Предполагаемая неизменность гармонических постоянных способствовала накоп-

лению базы данных о гармонических постоянных приливах и выявлению специальных зависимостей между отдельными гармоническими постоянными и обобщенными параметрами приливов в отдельных акваториях. Однако ряды наблюдений, пригодных к анализу, были получены, как правило, в прибрежной части Мирового океана, характеристики прилива в открытой части океана оставались неизвестны.

С развитием вычислительных технологий стало возможно рассчитывать характеристики прилива с помощью численных гидродинамических моделей. При использовании сеточной области, охватывающей весь земной шар, можно было получить глобальную приливную модель. Существенное улучшение качества глобальных приливных моделей может быть достигнуто усвоением рядов наблюдений, и особенно ассимиляцией спутниковой альтиметрической информации. В современных глобальных приливных моделях результаты расчета по-прежнему выводятся в виде матриц гармонических постоянных основных составляющих прилива. Интенсивное развитие глобальных приливных моделей позволило перейти к решению прикладных задач — расчету приливных колебаний уровня моря и течений в открытой части океана, заданию граничных условий для региональных и локальных численных моделей динамики моря. При этом собираемая ранее обобщающая информация о приливном режиме океана оказалась вне зоны интересов исследователей. Например, в современных работах (Matthews and Matthews, 2014; Gerkema, 2019; Lee and Chang, 2019), посвященных описанию приливов в Мировом океане, на основе результатов расчета глобальных приливных моделей приводятся лишь общие карты пространственного распределения типа приливов или высот прилива. Во всех этих работах отсутствуют численные оценки встречаемости того или иного типа прилива. Приведенные в этих работах карты пространственного распределения характеристик приливов, как правило, выполнены в цилиндрической проекции, что затрудняет даже качественную оценку пространственного распределения характеристик прилива.

Таким образом, можно заключить, что до сих пор нет определенного ответа, подтвержденного численными оценками, на такие вопросы, как: какой тип прилива доминирует в Мировом океане и его частях, какова характерная (средняя, медианная, модовая) и экстремальная высота прилива, нет численных оценок пространственного распределения характеристик прилива.

2. Материалы и методы

2.1. Глобальные приливные модели

По-видимому, первая глобальная приливная модель была описана в работе японского исследователя Такеши Уэно (Ueno, 1964), где Мировой океан аппроксимировался грубой сеткой с пространственным шагом 10° . Следующие в хронологическом порядке глобальные приливные модели появились в СССР (Богданов и Магарик, 1967; Тирон и др., 1967). Обе модели имели пространственный шаг 5° и использовали в качестве граничных условий известные колебания уровня моря на побережье и островах, учитывали диссипацию энергии приливов.

С внедрением вычислительных технологий в практику приливных расчетов росло количество и качество создаваемых глобальных приливных моделей. Так, с 1964 по 1986 г. было опубликовано более 15 работ, в которых описывались различные глобальные приливные модели (Марчук и Каган, 1991). Первые приливные модели реалистично воспроизводили картину распространения приливных волн в Мировом океане, по результатам моделирования были обнаружены и классифицированы амфидромии открытой части океана. Однако грубое пространственное разрешение первых моделей не позволяло использовать их результаты для воспроизведения приливно-отливного уровня и течений при решении прикладных задач.

Качественно новый уровень информации, предоставляемой глобальными приливными моделями, был достигнут при усвоении рядов наблюдений. Котидальные карты Шведерского (Schwiderski, 1980a; Schwiderski, 1980b) опубликованы в 1980 г. в виде матриц гармонических постоянных. Результаты расчета модели Шведерского хорошо согласовывались с данными наблюдениями и успешно использовались для прикладных целей.

Появление спутниковой альтиметрической информации дало новый импульс в развитии глобальных приливных моделей. Появились модели с различными пространственными разрешениями, основанные на различных численных методах и усваивающие спутниковую информацию и береговые мареографные наблюдения. В настоящее время в свободном доступе существует несколько глобальных приливных моделей, некоторые из них постоянно обновляются и улучшаются. В данной работе мы использовали результаты расчета трех современных глобальных приливных моделей: EOT20 (Hart-Davis et al., 2021), FES2014 (Lyard et al., 2021) и TPXO9 (Egbert and Erofeeva, 2002).

Модель TPXO (Oregon State University TOPEX / Poseidon Global Inverse Solution) была создана в 1990-х годах и в дальнейшем претерпела несколько модификаций. Используемая версия модели TPXO9v4a-atlas 1/30 degree resolution, опубликованная в 2021 г., имеет пространственное разрешение 2 мин ($1/30^\circ$). Модель предоставляет амплитуды и фазы следующих 15 волн прилива: $M_2, S_2, N_2, K_2, 2N_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, S_1, M_m, M_f, M_4, MS_4, MN_4$. Модель усваивает альтиметрическую информацию со спутников TOPEX/POSEIDON, Jason-1,2 (Egbert and Erofeeva, 2002).

Модель FES2014 (Finite Element Solution) была опубликована в 2016 г. Она предоставляет амплитуды и фазы 34 составляющих прилива: $M_2, S_2, N_2, K_2, L_2, \lambda_2, \nu_2, R_2, T_2, 2N_2, \epsilon_2, \mu_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, S_1, J_1, M_3, M_f, MKS_2, Sa, S_{sa}, M_m, MS_f, MS_{qm}, M_{tm}, M_4, N_4, S_4, MS_4, MN_4, M_6, M_8$ в узлах сетки с пространственным шагом 3.75 мин ($1/16^\circ$). FES2014 ассимилирует альтиметрическую информацию со спутников TOPEX/POSEIDON, Jason-1,2, TPN-J1N, ERS-1,2, Envisat за 20-летний отрезок времени (Lyard et al., 2021).

Модель EOT20 (Empirical Ocean Tide) была создана в 2021 г. Ее пространственное разрешение составляет 7.5 мин ($1/8^\circ$). Модель усваивает спутниковую альтиметрию со спутников TOPEX/POSEIDON, Jason-1,2,3, ERS-1, Envisat. EOT20 предоставляет информацию об амплитудах и фазах 18 составляющих прилива: $M_2, S_2, N_2, K_2, P_2, T_2, 2N_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, S_1, J_1, S_a, S_{sa}, M_m, M_f$ и M_4 (Hart-Davis et al., 2021).

Все перечисленные глобальные приливные модели верифицировались авторами моделей по данным измерений колебаний уровня моря. Кроме того, были проведены специальные исследования, в которых результаты глобальных при-

ливных моделей сравнивались между собой по всему Мировому океану (Stammer et al., 2014) и отдельным акваториям (Fu et al., 2020; Oreiro et al., 2014; Seifi et al., 2019; Sun et al., 2022). В целом отмечается, что все современные приливные модели дают приемлемые для практического использования результаты (Stammer et al., 2014).

2.2. Определение типа прилива

Для количественной оценки типа прилива традиционно применяются отношения амплитуд суточных и полусуточных составляющих прилива, которые называются индикатором формы прилива. Первое такое соотношение амплитуд было введено Ван дер Стоком в 1897 г. (Stok, 1897). Чаще всего в зарубежной литературе используется соотношение

$$F = \frac{A_{K_1} + A_{O_1}}{A_{M_2} + A_{S_2}} \quad (1)$$

с пороговыми значениями $F < 0.25$ для полусуточного прилива; $0.25 < F < 1.5$ для смешанного прилива с преобладанием полусуточного типа; $1.5 < F < 3$ — смешанный прилив с преобладанием суточного прилива; $F > 3$ — суточный прилив. Эти пороговые значения были предложены в 1938 г. Куртье (Courtier, 1938). Гидрографической службой СССР принято использовать более простое соотношение амплитуд:

$$K = \frac{A_{K_1} + A_{O_1}}{A_{M_2}} \quad (2)$$

с пороговыми значениями: $K < 0.5$ — для правильного полусуточного прилива; $0.5 < K < 2$ — для неправильного полусуточного прилива; $2 < K < 4$ — для неправильного суточного прилива; $K > 4$ — для правильного суточного прилива. Это соотношение в нашей стране называют критерием Дуванина. На рис. 1 показано пространственное распределение типов прилива согласно критерию Куртье, рассчитанное по данным модели ТРХО9.

2.3. Определение средних и экстремальных высот прилива

Для оценки средних высот прилива была рассчитана характеристика, для удобства названная «высота полумесячного неравенства приливов». Она основана на сравнении высот сизигийного ($H_{Sg} = 2(A_{M_2} + A_{S_2})$) и тропического ($H_{Np} = 2(A_{K_1} + A_{O_1})$) приливов. Если высота тропического прилива в данной точке больше, чем высота сизигийного прилива, то высоте полумесячного неравенства присваивается его значение, в противном случае — значение высоты сизигийного прилива.

Максимально и минимально возможные по астрономическим причинам уровни моря рассчитываются либо по специальным упрощенным методикам расчета экстремальных высот прилива (Владимирский и Стахевич, 1941; Дуванин, 1960),

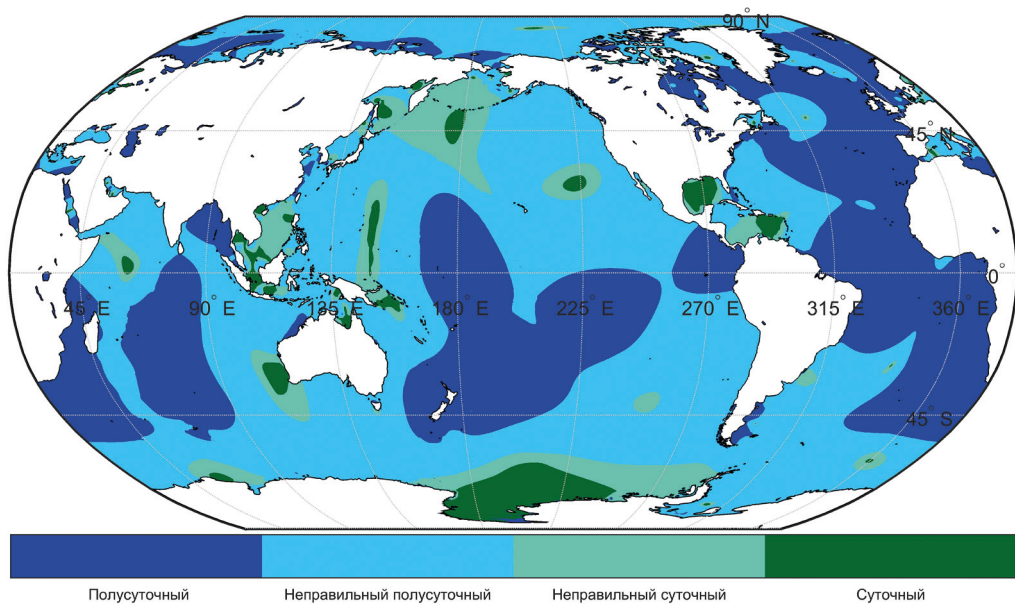


Рис. 1. Распределение типов прилива по критерию Куртье, по данным модели TPXO9 (ПО Matlab Mapping Toolbox)

основанным на комбинации нодальных параметров различных составляющих прилива, либо прямым предвычислением приливного уровня на отрезок времени, покрывающий все учитываемые на практике периоды неравенств приливов (Войнов, 2019).

Упрощенные методики расчета экстремальных величин прилива (Владимирский и Стахевич, 1941; Дуванин, 1960) были актуальны до введения в повседневную практику вычислительных технологий, когда предвычисление прилива проводилось вручную. К тому же эти методы ограничены определенным набором составляющих прилива, что ведет к неточным расчетам в областях, где значительны нелинейные эффекты и второстепенные гармоники (Войнов, 2019).

Предвычисление прилива с учетом нодальной коррекции выполняется по формуле

$$\xi_t = \sum_{i=1}^N A_i \cos(V_1 + u_i - g_i), \quad (3)$$

где $V_i = g_i t + V_{0i}$; f_i — долгопериодная модуляция амплитуды; A_i — амплитуда; q_i — угловая скорость гармоники; V_{0i} — астрономическая часть фазы на момент $t=0$; u_i — долгопериодная модуляция фазы; g_i — фаза гармоники; i — номер гармоники; N — количество гармоник; t — время в часах. Однако даже сейчас стандартные программы предвычисления прилива не могут оперативно выполнить расчет хода уровня моря для всех ячеек сеточной области современной глобальной приливной модели с часовой дискретностью и длиной ряда, превышающей 18.61 лет. Для оптимизации предвычисления прилива для всего Мирового океана выполнена следующая трансформация формулы (3):

$$\xi_t = \sum_{i=1}^N X_i W_i + Y_i Z_i, \quad (4)$$

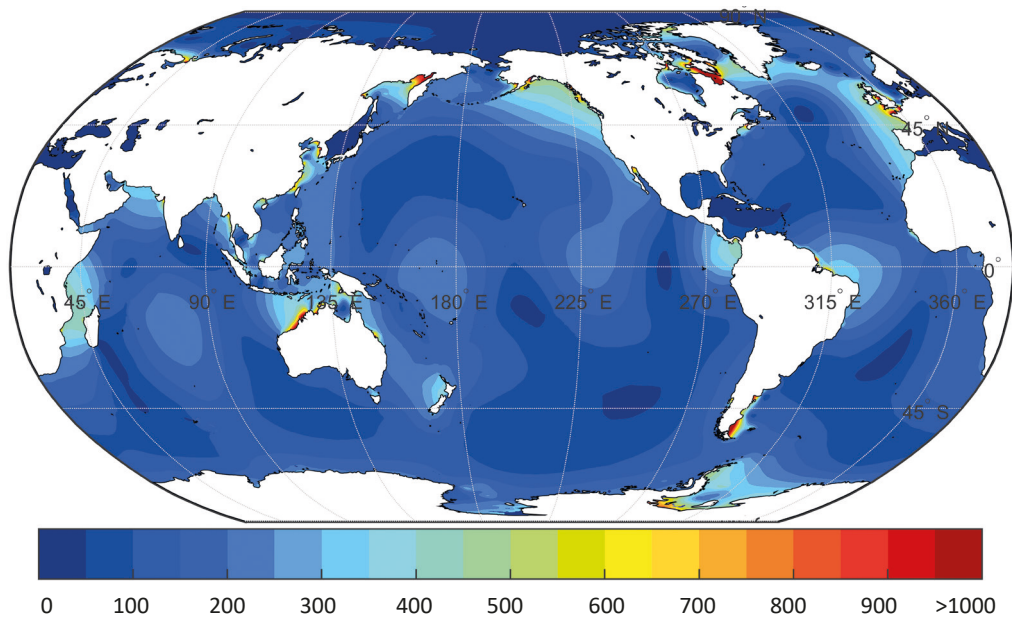


Рис. 2. Распределение экстремальных высот прилива (см), по данным модели FES2014 (ПО Matlab Mapping Toolbox)

где

$$\begin{aligned} X_i &= A_i \cos(g_i); \\ Y_i &= A_i \sin(g_i); \\ W_i &= f_i \cos(g_i t + V_i + u_i); \\ Z_i &= f_i \sin(g_i t + V_i + u_i). \end{aligned}$$

До начала предвычисления один раз рассчитываются временные ряды параметров W_i и Z_i на отрезок 18.61 лет для всех ячеек сеточной области, находящихся на одной широте. При предвычислении прилива в пространственных циклах перебираются только параметры X_i и Y_i , являющиеся функциями амплитуд и фаз. Для каждой ячейки из предвычисленного ряда выбираются минимальное и максимальное значения, которые принимаются максимально и минимально возможными уровнями моря по астрономическим причинам. Разность между максимально и минимально возможными приливными уровнями считается экстремальной высотой прилива. На рис. 2 показано пространственное распределение экстремальной высоты прилива, рассчитанное по 34 приливным гармоникам из модели FES2014.

2.4. Определение пространственных закономерностей изменения характеристик прилива

Для каждой ячейки сеточной области по формулам сферической геометрии рассчитывалась площадь. При этом для прибрежных ячеек учитывалась только та часть ячейки, которая приходилась на океан. Также для каждой ячейки сетки рас-

считывалось отношение площади ячейки к общей площади океана. Полученное значение относительной площади можно рассматривать как вероятность — сумма всех значений будет равна 1. В этом случае среднее значение (математическое ожидание) какого-либо параметра по всей акватории можно рассчитать как сумму всех произведений значений в ячейках и относительной площади. Также по этим данным можно рассчитать кумулятивную функцию распределения вероятности — каждому уникальному значению параметра соответствует сумма всех относительных площадей ячеек, в которых значения меньше или равны уникальному значению. По кумулятивной функции распределения вероятности оценивались медиана и другие квантили. Медиана в нашем случае будет показывать то значение, которое будет делить площадь рассматриваемой акватории пополам. По производной функции распределения вероятности оценивалась плотность вероятности, определялись вид распределения, количество мод и оценивались их значения.

Для нахождения региональных особенностей или функциональных зависимостей от какого-либо параметра (широты, глубины, удаленности от побережья) описанный метод применялся не для всего Мирового океана, а для акватории, ограниченной географическими границами океанов, широтами, изобатами или изолиниями одинакового расстояния до материка. Деление на отдельные океаны производилось в соответствии с указом № 23 Всемирной Гидрографической организации (ИНО, 1953). Границы Южного океана — параллель 60° ю. ш., Норвежское море относится к Северному Ледовитому океану, Яванское море — к Тихому океану, к Атлантическому океану относятся внутренние моря (Балтийское, Средиземное, Черное, Азовское).

3. Результаты

Пространственное распределение типов прилива по всей площади Мирового океана показано на рис. 1. По критерию Куртье, в Мировом океане чаще всего встречается смешанный полусуточный прилив (53%), а по критерию Дуванина, используемому гидрографической службой ВМФ, чаще всего отмечается правильный полусуточный прилив (47%). Такое различие обусловлено принятым пороговым значением 0.5, разделяющим правильные и неправильные полусуточные приливы в классификации Дуванина. При использовании трех типов прилива (полусуточный, смешанный, суточный) будет чаще всего встречаться смешанный тип прилива (49% по критерию Дуванина и 60% по критерию Куртье). При делении типов прилива на две группы (полусуточный, суточный) чаще всего будет встречаться полусуточный тип прилива (87% по критерию Дуванина и 90% по критерию Куртье).

Повторяемость отношений амплитуд по всей акватории Мирового океана имеет одномодовое распределение с положительной асимметрией (рис. 3). Для обоих критериев мода находится в диапазоне, отведенном для полусуточного прилива ($Mo(F) = 0.1$, $Mo(K) = 0.15$). Медиана ($Me(F) = 0.39$, $Me(K) = 0.54$) и оценка математического ожидания (0.74) находятся в пределах значений неправильного полусуточного прилива.

Согласно статической (равновесной) теории, характеристики прилива, помимо прочего, зависят от широты: на экваторе должны отмечаться правильные полусуточные приливы, с увеличением широты вклад суточной составляющей

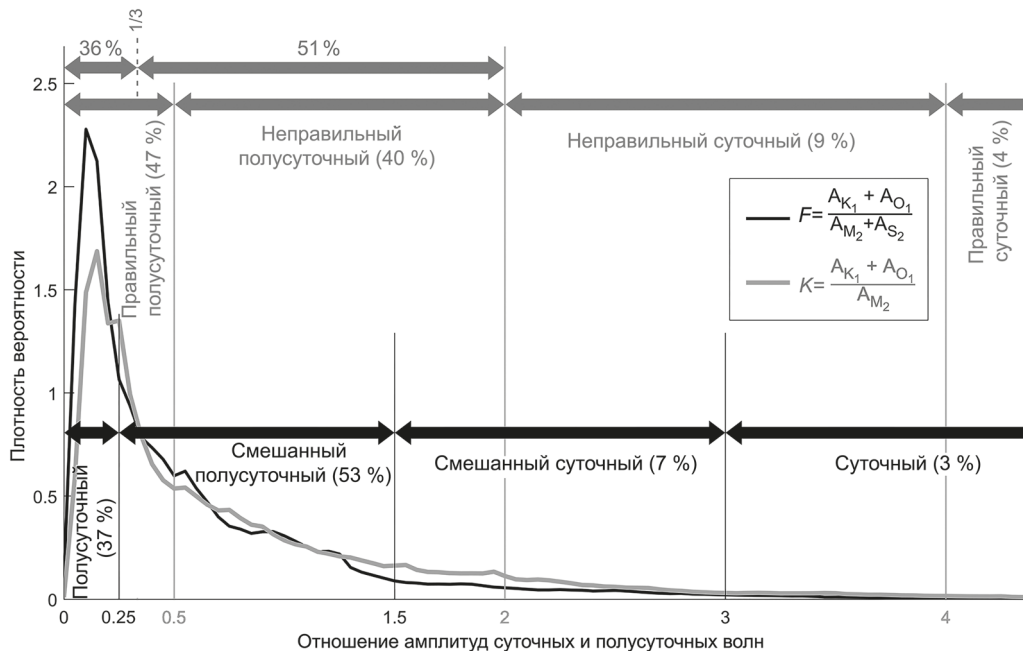


Рис. 3. Повторяемость типов прилива по всей площади Мирового океана, по данным модели EOT20

должен увеличиваться. Очевидно, что в действительности приливная волна распространяется согласно уравнениям гидродинамики в океане с меняющейся глубиной и формой береговой линии. При распространении приливных волн в виде волн Кельвина следует ожидать зависимости характеристик прилива от расстояния от материков, склона шельфа. Отклик всех этих предполагаемых зависимостей можно ожидать в результатах статистического анализа пространственного распределения характеристики прилива по результатам расчета глобальных приливных моделей.

На рис. 4 показаны выявленные особенности пространственного распределения типов и экстремальных высот прилива в Мировом океане в зависимости от широты, расстояния до побережья и глубины моря по данным модели EOT20. Тип приливов, показанный на рис. 4, рассчитывался по критерию Куртье.

Как следует из анализа рисунка, на всех широтах присутствуют несколько мод в распределении вероятности индикатора типа прилива. На рис. 4, а прослеживается плавное изменение значения мод с широтой. Наличие нескольких мод на одной и той же широте, скорее всего, обуславливается различными преобладаниями типов прилива в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах. Севернее 55° ю. ш., как правило, главная мода лежит в пределах 0–0,25, т. е. соответствует полусуточному типу прилива. Второстепенные моды имеют значения, лежащие в пределах, отведенных для смешанных полусуточных приливов (0,25–1,5). Среднее по широте значение отношения амплитуд суточных и полусуточных волн в основном соответствует смешанному полусуточному типу прилива на широтах 60° ю. ш. — 90° с. ш. Медианное значение на этих широтах также соответствует смешанному полусуточ-

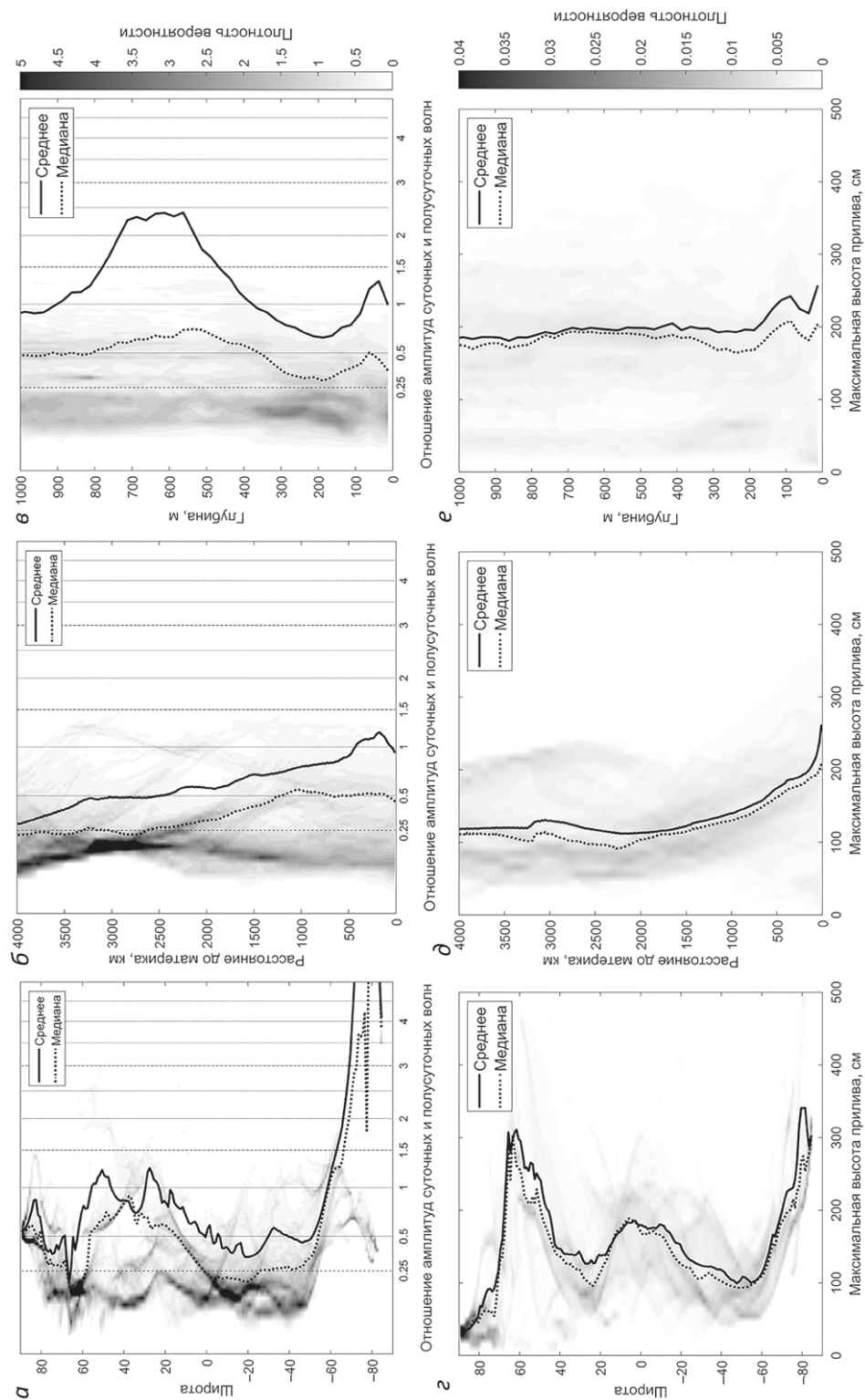


Рис. 4. Особенности пространственного распределения типов (а, б, в) и экстремальных высот прилива (г, д, е) в Мировом океане в зависимости от широты (а, г), расстояния до побережья (б, д) и глубины моря (в, е), по данным модели EOT20

ном типу, за исключением района между экватором и параллелью 26° ю. ш. и широт 58° с. ш. — 68° с. ш., где медиана соответствует полусуточному типу прилива.

На широтах Южного океана моды значений индикатора формы прилива лежат в пределах, назначенных для смешанного типа прилива. А среднее и медианное значения соответствуют смешанному суточному и суточному типам прилива.

Зональное распределение экстремальных высот прилива показано на рис. 4, г: среднее и модовое значения экстремальных высот превышают 2 м на широтах $49\text{--}67^\circ$ с. ш. и южнее параллели 70° ю. ш. Третий локальный максимум широтно-го изменения экстремальной высоты прилива отмечается в экваториальной зоне 15° ю. ш. — 15° с. ш., где средние и медианные значения экстремальной высоты прилива превышают 1.5 м. Минимальные значения экстремальных высот прилива отмечаются севернее 70° с. ш. (менее 1 м), на широтах $14\text{--}43^\circ$ с. ш. (1–1.5 м) и на широтах $45\text{--}58^\circ$ ю. ш. (1–1.1 м). Таким образом, симметрии относительно экватора в широтном распределении характеристик прилива не отмечается. Плотность вероятности значений экстремальных высот прилива на всех широтах имеет несколько мод. Как правило, в широтном распределении среднее значение больше медианного.

Зависимость типа прилива от расстояния до берега показана на рис. 4, б. На картах типа прилива в районе амфидромических точек волн M_2 , S_2 отмечается увеличение суточной составляющей вплоть до проявления правильного суточного типа прилива. Так как такие амфидромические точки находятся, как правило, в центральной части морей и океанов, то можно было бы ожидать такую же тенденцию в функции распределения индикатора формы прилива в зависимости от удаления от побережья. Однако на рис. 4, б видно, что плотность вероятности и медиана критерия Куртье не меняются в зависимости от расстояния до берега: основная мода соответствует полусуточному типу прилива, медиана — смешанному полусуточному типу прилива. Более того, функция математического ожидания этого параметра несколько уменьшается с удалением от побережья, но все равно ее значения соответствуют смешанному полусуточному типу прилива.

Высоты прилива, как и следовало ожидать, зависят от расстояния до берега (рис. 4, д): мода, медиана, математическое ожидание уменьшаются с удалением от берега. При этом среднее значение и мода уменьшаются экспоненциально до расстояния 75–100 км и линейно со 100 до 1200 км. Такая функция изменения высот прилива от расстояния обусловлена распространением приливных волн в виде волн Кельвина.

Казалось бы, связанные между собой глубина моря и расстояние до берега должны иметь схожие функции распределения характеристик прилива. Однако, как следует из анализа рис. 4, с, медиана и среднее значение отношения амплитуд суточных и полусуточных волн прилива минимальны на склоне материковой отмели (минимум в районах с глубинами 200–300 м) — здесь они соответствуют смешанному полусуточному типу прилива и увеличиваются на глубинах 500–700 м, где среднее значение переходит в диапазон, отведенный для смешанного суточного прилива. В зависимости высоты прилива от глубины видны локальные незначительные увеличения на мелководье и на глубинах 100–200 м. Выраженную зависимость высоты прилива от глубины Мирового океана увидеть на рисунке трудно: основные моды, среднее и медиана параллельны оси ординат (рис. 4, е).

Таблица 1. Процентное соотношение пространственного распределения типов приливов в различных океанах по данным модели FES2014, по критериям Куртье (числитель) и Дуванина (знаменатель)

Океаны	Полусуточный	Смешанный/неправильный		Суточный
		полусуточный	суточный	
Мировой	37 / 47	53 / 40	7 / 9	3 / 4
Тихий	28.7 / 39.4	60 / 47.2	9.4 / 10.5	1.9 / 2.9
Атлантический	62 / 74.3	33.1 / 20.8	2.9 / 2.8	2.0 / 2.1
Индийский	36.8 / 47.8	56.9 / 40	4.6 / 9.9	1.7 / 2.3
СЛО	38.8 / 51.6	59.4 / 45.5	1.5 / 2.5	0.3 / 0.4
Южный	0 / 0.1	54.2 / 46.8	26.2 / 25.1	19.6 / 28

Традиционно справочная информация об океанографических характеристиках обобщается в пределах океанов и морей. Процентное соотношение площадей для типов приливов, выделенных по критериям Куртье и Дуванина, для всех океанов приведено в табл. 1. Как следует из табл. 1, и по критерию Куртье, и по критерию Дуванина, полусуточный тип приливов доминирует в Атлантическом океане. В Тихом и Южном океанах преобладает неправильный полусуточный прилив. В Индийском и Северном Ледовитом океанах в зависимости от критерия преобладает либо правильный полусуточный тип прилива (по критерию Дуванина), либо неправильный (смешанный) полусуточный тип прилива (критерий Куртье). Оба критерия указывают на то, что во всех океанах, за исключением Южного океана, наименее распространенным типом прилива является суточный прилив. В Южном океане, наоборот, наиболее редким оказался правильный полусуточный тип прилива.

Статистические характеристики (математическое ожидание, квартили, мода) отношений амплитуд приливов (F и K) приведены в табл. 2. Из анализа табл. 2 следует, что во всех океанах математическое ожидание, медиана и мода расположены по убыванию, что является признаком распределения вероятностей с правой асимметрией. Среднее по акватории значение отношений амплитуд находится в диапазоне, отведенном для неправильного (смешанного) полусуточного прилива для большинства океанов, и только для Южного океана среднее значение соответствует смешанному суточному типу для F и правильному суточному типу для K . Мода располагается в диапазоне, отведенном для полусуточного прилива для большинства океанов, и только для Южного океана мода соответствует неправильному (смешанному) типу приливов. Медиана значений F и K в Индийском и Тихом океанах соответствует неправильному (смешанному) полусуточному типу, в Атлантическом океане оба эти параметра соответствуют правильному полусуточному типу. В Северном Ледовитом и Южном океанах медианы параметров F и K лежат в диапазонах, отведенных для различных типов прилива: в Арктике медиана для F относится к смешанному полусуточному типу, для K — к правильному полусуточному, в Антарктике $Me(F)$ относится к смешанному полусуточному, а $Me(K)$ — к неправильному суточному типу.

Статистические характеристики высот прилива в пределах различных океанов приведены в табл. 3. Наибольшие средние по акватории максимальные высоты

Таблица 2. Статистические характеристики пространственного распределения отношений F (числитель) и K (знаменатель) в различных океанах по данным модели FES2014

Океаны	Среднее	Квартили			Мода
		$p=0.25$	$p=0.5$	$p=0.75$	
Мировой	0.75 / 1.22	0.17 / 0.24	0.39 / 0.54	0.86 / 1.23	0.14 / 0.14
Тихий	0.74 / 1.15	0.21 / 0.28	0.49 / 0.69	0.95 / 1.35	0.16 / 0.16
Атлантический	0.44 / 0.62	0.12 / 0.16	0.19 / 0.26	0.37 / 0.51	0.09 / 0.14
Индийский	0.62 / 0.99	0.18 / 0.27	0.35 / 0.53	0.82 / 1.17	0.16 / 0.26
СЛО	0.45 / 0.63	0.16 / 0.22	0.34 / 0.47	0.58 / 0.8	0.11 / 0.16
Южный	2.62 / 5.37	0.92 / 1.49	1.37 / 2.13	2.45 / 4.57	1.26 / 1.96

Таблица 3. Статистические характеристики пространственного распределения экстремальных высот (числитель) и высот полумесячных неравенств прилива (знаменатель) в различных океанах по данным модели FES2014

Океаны	Среднее, см	Квартили, см			Мода, см
		$p=0.25$	$p=0.5$	$p=0.75$	
Мировой	150 / 99	90 / 55	133 / 85	189 / 127	83 / 58
Тихий	149 / 95	91 / 56	135 / 85	193 / 125	83 / 68
Атлантический	145 / 101	83 / 53	128 / 88	182 / 130	83 / 28
Индийский	157 / 106	97 / 57	134 / 87	191 / 135	98 / 48
СЛО	125 / 85	33 / 16	64 / 41	160 / 112	28 / 13
Южный	167 / 99	116 / 65	151 / 85	190 / 112	138 / 68

прилива отмечаются в Южном океане (167 см), далее по уменьшению значений средних по акватории высот приливов идут Индийский (157 см), Тихий (149 см), Атлантический (145 см) океаны. Наименьшее значение отмечается в Северном Ледовитом океане (125 см). Аналогичное распределение океанов наблюдается в значениях квартилей и мод экстремальных значений высот прилива. Среднее по акватории значение высот полумесячных неравенств прилива в Индийском океане составляет 106 см. Затем по уменьшению значений идут Атлантический (101 см), Южный (99 см) и Тихий (95 см) океаны. Минимальное значение высот полумесячных неравенств отмечается в Северном Ледовитом океане (85 см).

Эмпирическая функция плотности вероятности экстремальных высот прилива (рис. 5, а) и высот полумесячных неравенств прилива (рис. 5, б) в Мировом океане имеет выраженную правую асимметрию с главной модой, приходящейся на значение 83 и 58 см соответственно. Графики плотности вероятности распределения высот прилива в отдельных океанах менее сглажены, имеют несколько мод (рис. 5). Очевидно, что результаты статистического анализа пространственного распределения характеристик прилива в пределах отдельных океанов зависят от количества выделяемых океанов, установленных границ акваторий, учета внутренних морей и имеют скорее справочный общегеографический характер, нежели научное или прикладное значение.

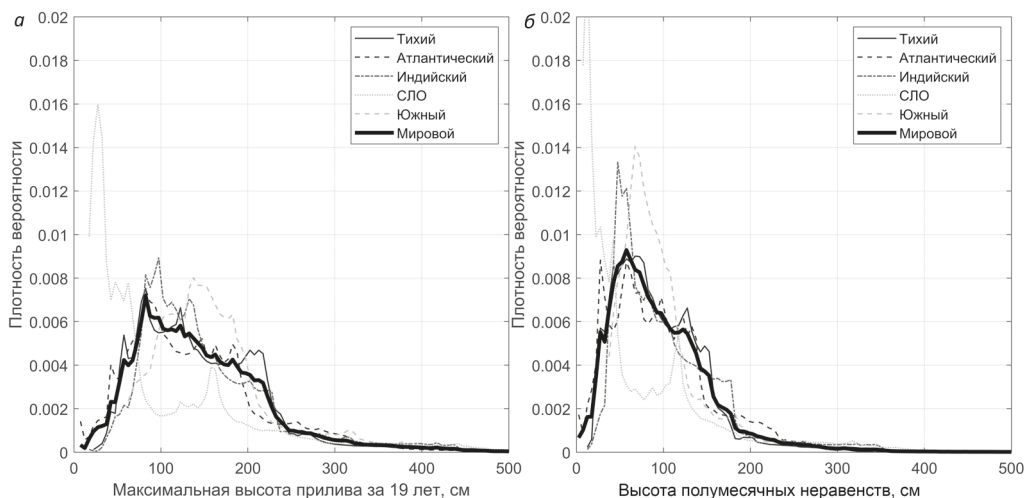


Рис. 5. Частота появления экстремальных высот прилива (а) и высот полумесячных неравенств (б) в различных океанах по данным модели FES2014

Результаты расчета всех параметров по трем глобальным приливным моделям хорошо совпадают между собой, отклонение в результатах составляет не более 1–2 %, что может быть объяснено отличием сеточных областей моделей.

4. Заключение

Сравнение результатов расчета трех современных глобальных приливных моделей (EOT20, FES2014 и TPX09) показало, что указанные модели воспроизводят примерно одинаковые характеристики пространственного распределения типов и высот прилива, и для выявления особенностей пространственного распределения характеристик прилива может быть использована любая из них.

Сопоставление пространственного распределения типов прилива, выделенных по критериям Дуванина и Куртье, продемонстрировало разный вклад полусуточных и неправильных полусуточных приливов. При использовании критерия Дуванина в Мировом океане преобладает правильный полусуточный прилив (47%), по критерию Куртье — смешанный полусуточный тип прилива (53%). Указанное отличие объясняется субъективно выбранными пороговыми значениями существующих классификаций. Данный вывод свидетельствует о том, что проблема типизации приливов еще далека от решения.

Плотность вероятности пространственного распределения соотношения амплитуд суточных и полусуточных волн прилива имеет выраженную положительную асимметрию. Модовое значение лежит в пределах, отведенных классификациями Дуванина и Куртье для правильного полусуточного типа прилива. Медиана и среднее значение находятся в диапазоне для неправильного (смешанного) полусуточного прилива. Выявлено, что в Южном океане правильный полусуточный прилив встречается очень редко (менее 1 % от площади океана).

Среднее по Мировому океану значение максимально возможных по астрономическим причинам высот прилива составляет 150 см, а средняя высота полумесячных неравенств составляет около 50 см.

сячного прилива — 99 см. Медианные значения этих величин — 133 и 85 см соответственно. Функции плотности вероятности пространственного распределения экстремальных и средних высот прилива имеют положительную асимметрию, максимальные значения мод составляют 83 см для максимально возможной по астрономическим причинам высоты прилива и 58 см для средней высоты полумесячного прилива. Океаны по возрастанию значений средней по акватории экстремальной высоты прилива можно ранжировать следующим образом: Северный Ледовитый, Атлантический, Тихий, Индийский и Южный океаны.

Пространственное распределение типов прилива не зависит от глубины моря и расстояния до побережья, в то время как высоты прилива уменьшаются с удалением от материка. Зависимость характеристик прилива от широты несимметрична относительно экватора. Все перечисленное свидетельствует о том, что распределение материков и рельеф дна определяют пространственные характеристики приливов в Мировом океане.

Литература

- Богданов, К. Т. и Магарик, В. А. (1967). Численное решение задачи о распространении приливных волн (M_2 и S_2) в Мировом океане. *Доклады АН СССР*, 172 (6), 1315–1317.
- Владимирский, Н. П. и Стахевич, В. С. (1941). *Руководство по обработке и предсказанию приливов*. Л.: Изд-во Гидрограф. упр. ВМФ СССР.
- Войнов, Г. Н. (2019). Общая характеристика приливов на основе новых значений гармонических постоянных в Финском заливе. *Ученые записки РГГМУ*, 56, 81–97. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-56-81-97>
- Дуванин, А. И. (1960). *Приливы в море*. Л.: Гидрометеиздат.
- Марчук, Г. И. и Каган, Б. А. (1991). *Динамика океанских приливов*. Л.: Гидрометеиздат.
- Тирон, К. Д., Сергеев, Ю. Н., Мичурин, А. Н. (1967). Карта приливов Тихого, Атлантического и Индийского океанов. *Вестник ЛГУ*, 24, 123–135.
- Courtier, A. (1938). Classification of tides in four types. In: *Conferenes sur les Marees*. Paris: Service Hydrographique de la Marine Francaise.
- Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19 (2), 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOVO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOVO>2.0.CO;2)
- Fu, Y., Feng, Y., Zhou, D. (2020). Accuracy assessment of global ocean tide models in the South China Sea using satellite altimeter and tide gauge data. *Acta Oceanologica Sinica*, 39 (12), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13131-020-1685-y>
- Gerkema, T. (2019). *An introduction to tides*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316998793>
- Hart-Davis, M. G., Piccioni, G., Dettmering, D. (2021). EOT20: A global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. *Earth System Science*, 13, 3869–3884. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3869-2021>
- ИНО (1953). *Limits of Oceans and Seas, special publication*. Special Publication No. 28. 3rd ed. Monte-Carlo: International Hydrographic Organization.
- Lee, S. H. and Chang, Y. S. (2019). Classification of the global tidal types based on auto-correlation analysis. *Ocean Science*, 54 (2), 279–286. <https://doi.org/10.1007/s12601-019-0009-7>
- Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrere, L., Picot, N. (2021). FES2014 global ocean tide atlas: Design and performance. *Ocean Science*, 17, 615–649. <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>
- Matthews, J. B. and Matthews, J. B. R. (2014). Physics of climate change: harmonic and exponential processes from in situ ocean time series observations show rapid asymmetric warming. *Advanced Physics*, 2, 1137–1171. <https://doi.org/10.24297/jap.v6i2.6960>
- Oreiro, F. A., D'Onofrio, E., Grismeyer, W., Fiore, M., Saraceno, M. (2014). Comparison of tide model outputs for the northern region of the Antarctic Peninsula using satellite altimeters and tide gauge data. *Polar Science*, 8, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2013.12.001>

- Schwiderski, E. W. (1980a). Ocean tides, II, a hydrodynamic interpolation model. *Marine Geodesy*, 3, 219–255. <https://doi.org/10.1080/01490418009387998>
- Schwiderski, E. W. (1980b). On Charting Global Ocean Tides. *Reviews of Geophysics*, 18 (1), 243–268. <https://doi.org/10.1029/RG018i001p00243>
- Seifi, F., Deng, X., Andersen, O. B. (2019). Assessment of the Accuracy of Recent Empirical and Assimilated Tidal Models for the Great Barrier Reef, Australia, Using Satellite and Coastal Data. *Remote Sensing*, 11, 1211–1240. <https://doi.org/10.3390/rs11101211>
- Stammer, D., Ray, R. D., Andersen, O. B. (2014). Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models. *Reviews of Geophysics*, 52, 243–282. <https://doi.org/10.1002/2014RG000450>
- Stok, van Der J. P. (1897). *Wind and weather, currents, tides and tidal streams in the East Indian Archipelago*. Batavia: Government Printing Office.
- Sun, W., Zhou, X., Zhou, D., Sun, Y. (2022). Advances and Accuracy Assessment of Ocean Tide Models in the Antarctic Ocean. *Frontiers in Earth Science*, 10, 3389–3403. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.757821>
- Ueno, T. (1964). Theoretical studies on tidal waves travelling over the rotating globe. *Oceanography Magazine*, 15 (2), 99–101.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2023 г.
Статья рекомендована к печати 18 сентября 2024 г.

Информация об авторах:

Репинская Наталья Глебовна — <https://orcid.org/0009-0006-8474-9001>,
nata.lion@mail.ru

Май Руслан Игоревич — <https://orcid.org/0000-0002-5602-1391>, rimay@mail.ru

Characteristics of tides in the World Ocean according to the Global tidal models

N. G. Repinskaia, R. I. May

St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Repinskaia, N. G., May, R. I. (2024). Characteristics of tides in the World Ocean according to the Global tidal models. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (4), 764–780. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.408> (In Russian)

The article presents numerical characteristics of the spatial distribution of type and height of tides in the World Ocean according to the data of three global tidal models: EOT20, FES2014 and TPX09. To obtain these estimates, a preliminary comparison of methods of determining tidal types was carried out. An algorithm for quickly pre-calculating tide heights for a long period of time for a grid area covering the entire World Ocean was also developed. Moreover, a method for calculating the probability density function of the spatial distribution of tidal characteristics was implemented. The characteristics of the tide were determined both in the entire World Ocean and in individual oceans. In addition, estimates of changes in tide characteristics depending on latitude, distance to the coast and sea depth were obtained. Mean, median and mode values of tidal heights and types were calculated. Our results showed that the main patterns of distribution of tidal characteristics remain unchanged regardless of the chosen global tidal model. It was revealed that the semi-diurnal type of tide dominates over the entire area of the World Ocean. The distribution of frequencies of occurrence of various heights in the World Ocean and in its individual parts has been determined for the first time. It has been established that the probability density function of tide heights has a single-mode distribution with positive skewness. The most common are average tidal heights equal to 0.6 m and extreme tidal heights equal to 0.9 m.

The dependence of the characteristics of tides on latitude is most clearly manifested. Nevertheless, this dependence is not symmetrical relative to the equator. The spatial distribution of tidal types does not depend on sea depth and distance to the coast, while tide heights decrease with distance from the mainland.

Keywords: tides, global tidal models, type of tide, height of tide.

References

- Bogdanov, K. T. and Magarik, V. A. (1967). Numerical solution of the problem of the propagation of tidal waves (M_2 and S_2) in the World Ocean. *Doklady AN SSSR*, 172 (6), 1315–1317. (In Russian)
- Courtier, A. (1938). Classification of tides in four types. In: *Conferenes sur les Marees*. Paris: Service Hydrographique de la Marine Francaise.
- Duvanin, A. I. (1960). *Tides in the sea*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19 (2), 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- Fu, Y., Feng, Y., Zhou, D. (2020). Accuracy assessment of global ocean tide models in the South China Sea using satellite altimeter and tide gauge data. *Acta Oceanologica Sinica*, 39 (12), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13131-020-1685-y>
- Gerkema, T. (2019). *An introduction to tides*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316998793>
- Hart-Davis, M. G., Piccioni, G., Dettmering, D. (2021). EOT20: A global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. *Earth System Science*, 13, 3869–3884. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3869-2021>
- IHO (1953). *Limits of Oceans and Seas, special publication*. Special Publication No. 28. 3rd ed. Monte-Carlo: International Hydrographic Organization.
- Lee, S. H. and Chang, Y. S. (2019). Classification of the global tidal types based on auto-correlation analysis. *Ocean Science*, 54 (2), 279–286. <https://doi.org/10.1007/s12601-019-0009-7>
- Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrere, L., Picot, N. (2021). FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. *Ocean Science*, 17, 615–649. <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>
- Marchuk, G. I. and Kagan, B. A. (1991). *Dynamics of ocean tides*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Matthews, J. B. and Matthews, J. B. R. (2014). Physics of climate change: harmonic and exponential processes from in situ ocean time series observations show rapid asymmetric warming. *Advanced Physics*, 2, 1137–1171. <https://doi.org/10.24297/jap.v6i2.6960>
- Oreiro, F. A., D'Onofrio, E., Grismeyer, W., Fiore, M., Saraceno, M. (2014). Comparison of tide model outputs for the northern region of the Antarctic Peninsula using satellite altimeters and tide gauge data. *Polar Science*, 8, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2013.12.001>
- Schwiderski, E. W. (1980a). On Charting Global Ocean Tides. *Reviews of Geophysics*, 18 (1), 243–268. <https://doi.org/10.1029/RG018i001p00243>
- Schwiderski, E. W. (1980b). Ocean tides, II, a hydrodynamic interpolation model. *Marine Geodesy*, 3, 219–255. <https://doi.org/10.1080/01490418009387998>
- Seifi, F., Deng, X., Andersen, O. B. (2019). Assessment of the Accuracy of Recent Empirical and Assimilated Tidal Models for the Great Barrier Reef, Australia, Using Satellite and Coastal Data. *Remote Sensing*, 11, 1211–1240. <https://doi.org/10.3390/rs11101211>
- Stammer, D., Ray, R. D., Andersen, O. B. (2014). Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models. *Reviews of Geophysics*, 52, 243–282. <https://doi.org/10.1002/2014RG000450>
- Stok, van Der J. P. (1897). *Wind and weather, currents, tides and tidal streams in the East Indian Archipelago*. Batavia: Government Printing Office.
- Sun, W., Zhou, X., Zhou, D., Sun, Y. (2022). Advances and Accuracy Assessment of Ocean Tide Models in the Antarctic Ocean. *Frontiers in Earth Science*, 10, 3389–3403. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.757821>
- Tiron, K. D., Sergeev, Yu. N., Michurin, A. N. (1967). Map of the tides of the Pacific, Atlantic, and Indian oceans. *Vestnik LGU*, 24, 123–135. (In Russian)

Ueno, T. (1964). Theoretical studies on tidal waves travelling over the rotating globe. *Oceanography Magazine*, 15 (2), 99–101.

Received: September 13, 2023

Accepted: September 18, 2024

Authors' information:

Natalya G. Repinskaia — <https://orcid.org/0009-0006-8474-9001>, nata.lion@mail.ru

Ruslan I. May — <https://orcid.org/0000-0002-5602-1391>, [rimay@mail.ru](mailto:rimary@mail.ru)