

УДК 551.466.72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЛИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ В АКВАТОРИИ ПЕНЖИНСКОЙ ГУБЫ

© 2023 г. Д. Р. Шпачук^{1, 2, *}, О. В. Соколов¹, А. Н. Бугаец²¹Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия²Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, г. Владивосток, Россия

*e-mail: denis_den_r@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

В данном исследовании для определения характеристик основных волн прилива и приливных течений, происходящих в акватории Пенжинской губы, было проведено численное моделирование динамики гидрологических процессов средствами программного комплекса *Delft3D-Flow*. Начальные и граничные условия заданы по данным модели ТРХО9, соленость и температура воды для каждого слоя — на основе данных реанализа модели общей циркуляции океана НУСОМ, с шагом по времени, равным 3 часа. Пространственное распределение метеорологических характеристик — по данным реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA-5. Моделирование выполнено для безледного периода с мая по сентябрь 2005 г. Построены котидальные карты, карты приливных эллипсов, коэффициента реверсивности для основных волн прилива: полусуточной волны M2 и суточной волны K1. Верификация модели выполнена с помощью сопоставления опубликованных и расчетных гармонических постоянных для 9 постов, находящихся в акватории Пенжинской губы. Анализ количественных оценок в целом показывает высокую степень согласованности модельных и справочных данных. Значения коэффициента детерминации R^2 между рядами, сформированными по модельным и опубликованным гармоническим постоянным, находятся в интервале 0.96–0.99. По величине относительных ошибок результаты моделирования разбиты на две категории — высокой степени согласованности (1.48–2.14%) и удовлетворительной (2.93–4.27%). Пространственные закономерности распределения для значений относительных ошибок не обнаружены. Определенная несогласованность результатов предположительно связана с дискретизацией по времени сроков наблюдения и короткими рядами данных, использованных для расчета опубликованных гармонических постоянных на постах в Пенжинской губе.

Ключевые слова: моделирование, *Delft3D*, волны прилива, Пенжинская губа, Охотское море

DOI: 10.31857/S003015742306014X, **EDN:** UYWNJX

ВВЕДЕНИЕ

Пенжинская губа находится в северо-восточной части залива Шелихова и является одним из уникальных мест в мире по амплитуде приливных колебаний, достигающих значений в 13 м. Столь значительная амплитуда прилива вызывает приливо-отливные периодические течения больших скоростей, оказывающих влияние на термохалинную структуру вод, ледовый режим, протекание зональных геоморфологических процессов [20], гидрологический режим эстуария реки Пенжина [4]. Регион характеризуется суровым континентальным климатом, с периодом отрицательных температур около 7 месяцев, является труднодоступным и малоосвоенным. Как следствие,

проведение полевых работ и организация долгосрочных гидрометеорологических наблюдений в данном районе крайне затруднительны, данные эпизодических наблюдений не репрезентативны.

Существующие исторические базы опубликованных гармонических постоянных (ГП) содержат данные по ограниченному набору приливных волн, что связано с отсутствием ЭВМ достаточной производительности на момент проведения расчетов и применением упрощенных схем гармонического анализа, например, метода Дарвина [2], который в качестве исходных данных принимает короткий ряд наблюдений длительностью 15 или 30 сут [23]. Таким образом, историческая

справочная база ГП волн прилива соответствует уровню технологий начала и середины XX века, не в полной мере описывает спектральный состав прилива, не всегда может обеспечить требуемую точность предвычисления уровня по данным ГП.

Актуальной задачей является уточнение характеристик исторических справочных ГП с использованием современных средств гармонического анализа и численного моделирования с целью возможности их использования в научно-практических задачах, направленных на развитие, использование и комплексное управление прибрежными морскими акваториями. В отличие от физико-статистических методов, позволяющих получить оценки характеристик приливных явлений только в пунктах наблюдений, физически обоснованные трехмерные гидродинамические модели позволяют преодолеть проблемы пространственно-временной дискретизации наблюдаемых явлений [14, 19], осуществить расчет полей скоростей течений, температуры и солености по вертикально распределенным слоям.

Ранее проведенные исследования приливной динамики вод в акватории Охотского моря и Пенжинской губы с помощью методов гармонического анализа [24] и численных моделей, имеющих недостаточное пространственное разрешение [15, 17, 35], дают неполное представление о пространственном распределении характеристик ГП волн прилива на акватории. Для более точного описания и районирования гидрологических процессов, проходящих в Пенжинской губе, необходимо создание трехмерной модели высокого разрешения с привлечением современных цифровых моделей батиметрии и данных реанализа океана и атмосферы.

В данном исследовании для определения характеристик основных волн прилива и приливных течений было проведено численное моделирование динамики гидрологических процессов, происходящих в акватории Пенжинской губы, средствами программного комплекса *Delft3D-Flow* (<https://www.deltares.nl/en/>). Верификация модели выполнена с помощью сопоставления полученных модельных данных с опубликованными гармоническими постоянными. Построены котидальные карты, карты приливных эллипсов и коэффициента реверсивности для основных волн прилива: полусуточной волны M2 и суточной волны K1.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пенжинская губа вдается в северо-восточную часть залива Шелихова между мысами Тайгонос и Божedomова. По своим очертаниям Пенжинская губа (ПГ) представляет собой обширный, глубоко (порядка 300 км) вдающийся в материк

водный бассейн. Средняя ширина ПГ — около 63 км. В средней части, между мысами Средний и Водопадный, ПГ резко сужается до 25–30 км. Эта узость носит название “горла” и делит губу на две части: более значительную — южную и меньшую по длине — северную [9, 10]. Горло губы обладает скалистыми и обрывистыми побережьями, образованными под влиянием выступающих здесь в акваторию возвышенных полуостровов Елистратова и Маметчинским.

На входе в Пенжинскую губу, ближе к западному берегу, глубины составляют около 100 м. По мере продвижения к горлу вначале наблюдается резкое, а затем плавное уменьшение глубин до 20 м. Данная впадина является наиболее глубокой в южной части губы и смещена к западному берегу (рис. 1). В большей части горла морское дно пологое с глубинами в пределах от 28 до 40 м; вблизи западного берега горла расположена котловина, образовавшаяся вследствие воздействия мощных струйных течений, проходящих в близости от мыса Опасного. Максимальные глубины в котловине находятся в пределах 130 м, изобата 40 м вытянута в длину до 36 км, ширина ее при этом не превышает 6 км. Северная половина Пенжинской губы значительно более мелководна, чем южная ее часть и горло. Восточный берег почти не имеет осушек и рифов, в то время как западный берег подвержен значительным осушкам, глубины к берегам уменьшаются равномерно [9, 11].

Климат исследуемой территории резко континентальный с очень холодной, продолжительной и малоснежной зимой и коротким, сравнительно теплым и довольно сухим летом [3]. В районе исследований расположены морская гидрометеорологическая станция Тайгонос (Колымское УГМС) и метеорологическая станция Чемурнаут (Камчатское УГМС). По данным метеонаблюдений, абсолютный минимум, максимум и среднегодовая температура воздуха составляют -39.7°C (декабрь 1981 г.), 24.3°C (июль 1976 г.) и -3.6°C соответственно. Преобладающее направление ветра — ВСВ (70°), совпадающее с ориентацией оси акватории губы. Среднегодовая скорость ветра составляет 5.7 м/с, максимальная — 34 м/с (январь 1966 г.). Среднегодовое количество осадков достигает 510 мм, из них на зимний сезон приходится 276 мм, на летний — 133 мм, на переходные периоды — 105 мм [8]. Образование припая в мелких бухтах наблюдается обычно в первой декаде декабря, полное освобождение ото льда происходит к началу июня [7].

Величина прилива от входа в залив Шелихова увеличивается к вершине Пенжинской губы. Средняя величина тропического прилива в бухте Удача составляет 4.2 м, в вершине Гижигинской губы — 6.9 м, в вершине Пенжинской губы — около 10 м. Наибольшие приливы отмечаются у по-

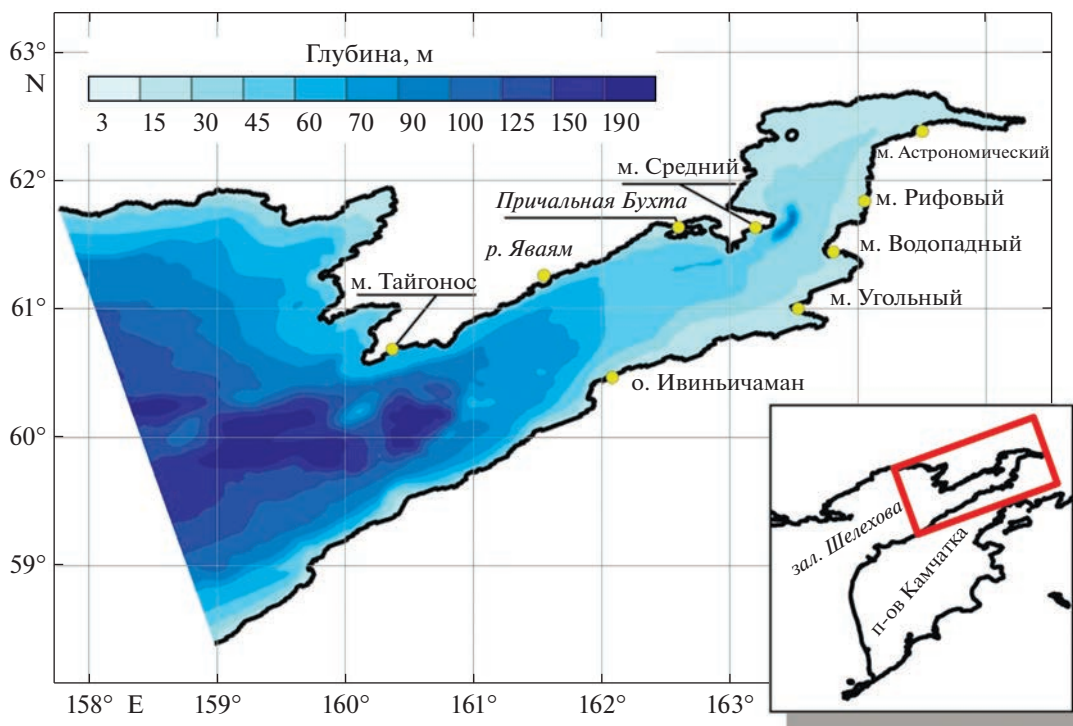


Рис. 1. Карта-схема района исследований, батиметрия расчетной области акватории залива Шелихова и Пенжинской губы; положение уровенных постов показано маркерами.

бережья полуострова Камчатки перед горлом Пенжинской губы — 13.9 м и в вершине Пенжинской губы — 13.4 м. В заливе Шелихова и в Пенжинской губе вследствие суперпозиции прямых и обратных полусуточных и суточных волн образуются прогрессивно-стоячие волны с преобладанием стоячих составляющих. Амплитуды суточных волн здесь возрастают больше, чем полусуточных. В результате приливная волна, приходящая из Охотского моря и имеющая перед входом в залив Шелихова неправильный полусуточный характер, индуцируется в нем в неправильные суточные приливы [1, 5]. Как следствие, на большей части акватории Пенжинской губы и залива Шелихова (по общепринятой классификации А.И. Дуванина [6]) наблюдаемый характер прилива — “неправильный-суточный”; “суточный” характер прилива проявляется только в акватории, прилегающей к мысу Средний.

Значительная амплитуда приливов в Пенжинской губе вызывает приливо-отливные периодические течения больших скоростей, в усилении которых свою роль играет относительная узость губы и ее большая длина. В тихую погоду, когда волнение не мешает наблюдать за явлениями на водной поверхности, последняя почти вся покрыта мелкими водоворотами и сулоями, напоминающая своим видом как бы быстро текущую широкую реку. Главная струя приливных течений в

южной части губы расположена ближе к западному берегу, к которому подходит вплотную, где основной водный поток занимает три четверти ширины губы; вблизи восточного берега скорости течения ослабевают и достигают меньших величин. Скорости течений в основном потоке могут достигать значений 1.3–1.5 м/с. С подходом к горлу губы, поступающий на приливе поток воды резко сжимается в более узкое русло, благодаря чему происходит быстрое увеличение скорости течений, достигающих в горле скоростей в 2.3–2.6 м/с. В западной части горла течения сильнее, чем в восточной, благодаря выступающему здесь в губу полуострову. Скорости течений в северной половине Пенжинской губы достигают 1.5–1.8 м/с и близки к скоростям течений южной половины. В проливах, образованных островами Крайний, Второй и южной оконечностью полуострова Елистратова, скорости течений могут достигать рекордных значений в интервале 3–3.6 м/с. Относительно слабые приливные течения со скоростями, не превышающими 0.8–1 м/с, наблюдаются в прибрежной акватории, примыкающей к восточному берегу южной половины губы и к западному берегу северной половины [9].

В качестве методической основы исследования использована 3D гидродинамическая модель с открытым кодом *Delft3D-flow*, разработанная Нидерландским институтом прикладных исследо-

ваний Deltares. Модель представляет собой комплексную программу гидродинамического моделирования, предназначенную для расчета нестационарных течений и явлений переноса, сформированных воздействием метеорологических и приливных явлений. *Delft3D-flow* основан на решении уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении мелкой воды и Буссинеска. Вычисления могут быть выполнены с использованием ортогональных или криволинейных расчетных сеток. Уравнение вертикального движения решается в гидростатическом приближении. В 3D-моделировании вертикальная компонента вектора скорости течения рассчитывается из уравнения неразрывности. Дискретизация уравнений мелкой воды производится с применением С-сетки Аракавы, в которой уровень воды рассчитывается в центре ячейки, а компоненты вектора скоростей течений U и V перпендикулярны граням ячейки. Решение систем дифференциальных уравнений мелкой воды в модуле *Delft3D-flow* производится с использованием неявного метода переменных направлений ADI (Alternating Direction Implicit), предложенного Леендертсе и Гриттоном [29–31].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Цифровая модель рельефа акватории Пенжинской губы построена на основе навигационной карты (М 1 : 500000, № 61027) и данных глобальной цифровой модели рельефа ETOPO1 [25]. С использованием программных средств сгенерирована ортогональная расчетная сетка с разрешением 50'' угловых секунд (283×637 расчетных ячеек) в горизонтальной плоскости (средний размер ячейки – 1487 $\times$ 880 м). Разрешение модели по вертикали составляет 5 равномерно распределенных σ -слоев. Расчетный шаг моделирования по времени равняется 12 с. На открытой границе расчетной области задана генерация уровня с использованием характеристик гармонических постоянных волн прилива по данным модели TPX09 [27, 36]. Использован набор из 13-ти волн прилива: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4, MN4 [6].

Соленость и температура воды на открытых границах заданы для каждого слоя модели на основе данных реанализа модели общей циркуляции океана HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) [32], с шагом по времени, равным 3 часа. Данные реанализа HYCOM также использованы для построения полей начальных условий по температуре и солености σ -слоев расчетной области. Поля метеорологических характеристик – приземного ветра на высоте 10 м, температуры воздуха на 2 м, относительной влажности воздуха, атмосферного давления на поверхности моря, общего облачного покрова – заданы на основе данных

реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA-5.

Моделирование выполнено для безледного периода с мая по сентябрь 2005 г. Выбор данного временного интервала обусловлен наблюдаемым максимумом величины прилива за нодальный период (18.6 года), в течение которого новолуние и полнолуние бывают в дни с наибольшим склонением Луны, т.е. сизигийные и тропические приливы осуществляются одновременно [6].

Наблюдения за уровнем моря в исследуемой акватории на регулярной основе не проводятся, и на текущий момент времени отсутствуют стационарные морские гидрометеорологические посты наблюдательной сети Росгидромета с программой наблюдений за уровнем моря. В связи с этим оценка точности диагностических расчетов уровня моря проводилась с использованием статистического анализа синхронных во времени рядов предвычисленного (ПП) и модельного (МП) приливного уровня моря [13]. Ряд значений предвычисленного уровня получен композицией основных приливных волн, опубликованных в работе Р.А. Деевой [5]. Ряды уровня МП с минутным разрешением по времени выбраны из ячеек расчетной области, соответствующей положению пунктов наблюдений (рис. 1). Вычисление характеристик ГП основных волн прилива (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1) и исключение модельной стонно-нагонной составляющей из МП выполнено с помощью оригинального программного комплекса гармонического анализа, основанного на методе наименьших квадратов (МНК).

Обработка результатов моделирования (полей компонент вектора горизонтальных скоростей течений и уровня моря), для построения пространственных характеристик ГП произведена с использованием утилиты гармонического анализа MATLAB T_Tide [34]. В таблице 1 приведены характеристики предвычисленных и модельных значений уровня моря: $H_{\max}$ и $H_{\min}$ – максимальные и минимальные значения; σ – среднеквадратическое отклонение; $|\bar{\delta}|$ – средняя абсолютная ошибка (отклонение) модельных и предвычисленных рядов [16]; $Ot = |\bar{\delta}| / (H_{\max} - H_{\min})$ – относительная ошибка расчетов, выраженная в процентах как отношение средней абсолютной ошибки к вариационному размаху ПП [18]; S/σ_x – критерий качества метода, S – среднеквадратическая ошибка расчетов, R^2 – коэффициент детерминации [16].

Оценки диагностического моделирования (табл. 1) ранжированы по убыванию значений Ot . Для первых пяти постов значения $|\bar{\delta}|$ находятся в интервале 0.17–0.24 м, значения Ot – в интервале 1.48–2.14%, S – 0.21–0.26 м, коэффициент детер-

Таблица 1. Оценки точности диагностического моделирования уровня моря в акватории Пенжинской губы

№	Пункт	Характеристики			Оценки качества моделирования				
		$\frac{H_{\max_M}}{H_{\max_П}}$	$\frac{H_{\min_M}}{H_{\min_П}}$	$\frac{\sigma_M}{\sigma_П}$	$ \bar{\delta} $, м	Ot , %	S , м	S/σ_x	R^2
1	о. Ивиньичаман	$\frac{6.91}{6.91}$	$\frac{-5.24}{-4.91}$	$\frac{2.94}{2.87}$	0.17	1.48	0.21	0.07	0.99
2	м. Рифовый	$\frac{6.64}{7.00}$	$\frac{-5.50}{-5.53}$	$\frac{2.98}{2.98}$	0.24	1.88	0.29	0.10	0.99
3	м. Водопадный	$\frac{6.93}{7.49}$	$\frac{-5.74}{-5.80}$	$\frac{3.03}{3.08}$	0.24	1.77	0.30	0.10	0.99
4	м. Средний	$\frac{5.57}{6.20}$	$\frac{-4.97}{-5.20}$	$\frac{2.64}{2.74}$	0.22	1.89	0.27	0.10	0.99
5	м. Тайгонос	$\frac{4.77}{5.24}$	$\frac{-4.28}{-4.33}$	$\frac{2.14}{2.28}$	0.20	2.14	0.26	0.11	0.99
6	м. Угольный	$\frac{7.24}{8.02}$	$\frac{-5.85}{-5.54}$	$\frac{3.15}{3.27}$	0.40	2.93	0.48	0.15	0.98
7	р. Яваям	$\frac{5.25}{6.20}$	$\frac{-4.72}{-4.90}$	$\frac{2.36}{2.64}$	0.34	3.10	0.44	0.17	0.97
8	б. Причальная	$\frac{5.41}{6.25}$	$\frac{-4.97}{-5.23}$	$\frac{2.47}{2.64}$	0.39	3.35	0.47	0.18	0.97
9	м. Астрономический	$\frac{7.57}{7.19}$	$\frac{-5.69}{-5.10}$	$\frac{3.27}{3.07}$	0.52	4.27	0.64	0.21	0.96

Примечание: $H_{\max_M}$ — максимальное значение модельного уровня моря (м), $H_{\max_П}$ — максимальное значение предвычисленного уровня моря (м), $H_{\min_M}$ — минимальное значение модельного уровня моря (м), $H_{\min_П}$ — минимальное значение предвычисленного уровня моря (м), σ_M — среднеквадратическое отклонение модельного ряда уровня (м), $\sigma_П$ — среднеквадратическое отклонение предвычисленного ряда уровня (м), $|\bar{\delta}|$ — средняя абсолютная ошибка расчетов (м), Ot , % — относительная ошибка расчетов, выраженная в процентах, S — среднеквадратическая ошибка расчетов (м), S/σ_x — критерий качества метода, R^2 — коэффициент детерминации.

минации R^2 имеет близкие к единице значения. Для остальных четырех постов (м. Угольный, р. Яваям, б. Причальная, м. Астрономический) $|\bar{\delta}|$ лежит в интервале 0.4–0.52 м, Ot — 2.93–4.27%, S — 0.48–0.64 м, R^2 — 0.96–0.98. Коэффициент наклона линии регрессии для первых пяти постов близок к единице (рис. 2а–д). Для остальных пунктов положение линии регрессии указывает на некоторое занижение моделью значений приливного уровня моря относительно ПП (рис. 2е–2и).

Пространственные распределения модельных характеристик основных волн прилива МП построены с использованием гармонического анализа для каждой ячейки расчетной сетки (рис. 3). В распределении амплитудных характеристик приливной волны К1 (рис. 3а) отражено плавное увеличение амплитуд от входа в залив Шелихова к вершине Пенжинской губы: у входа в залив Шелихова вблизи восточного берега амплитуда волны составляет 2.8 м, в то время как в вершине Пе-

нжинской губы, в районе мыса Астрономический, амплитуда волны достигает значений 4.3 м. У восточного берега залива Шелихова и Пенжинской губы амплитуда волны характеризуется большими значениями — наблюдается увеличение амплитуды волны К1 в направлении от западного к восточному берегу.

В Пенжинской губе изофазы волны К1 ориентированы перпендикулярно направлению распространения приливной волны, оканчиваются на противоположенных берегах губы, т.к. она образует узкий бассейн, где фронт распространения волны ориентирован перпендикулярно ее оси. Фаза волны постепенно увеличивается к вершине акватории. Общая картина распределения изоамплитуд и изофаз К1 говорит о преобладании прогрессивного типа распространения приливной волны, вследствие чего можно заключить, что в вершине акватории происходят процессы диссипации приливной энергии волны К1. В юго-западной части области исследований (район Ги-

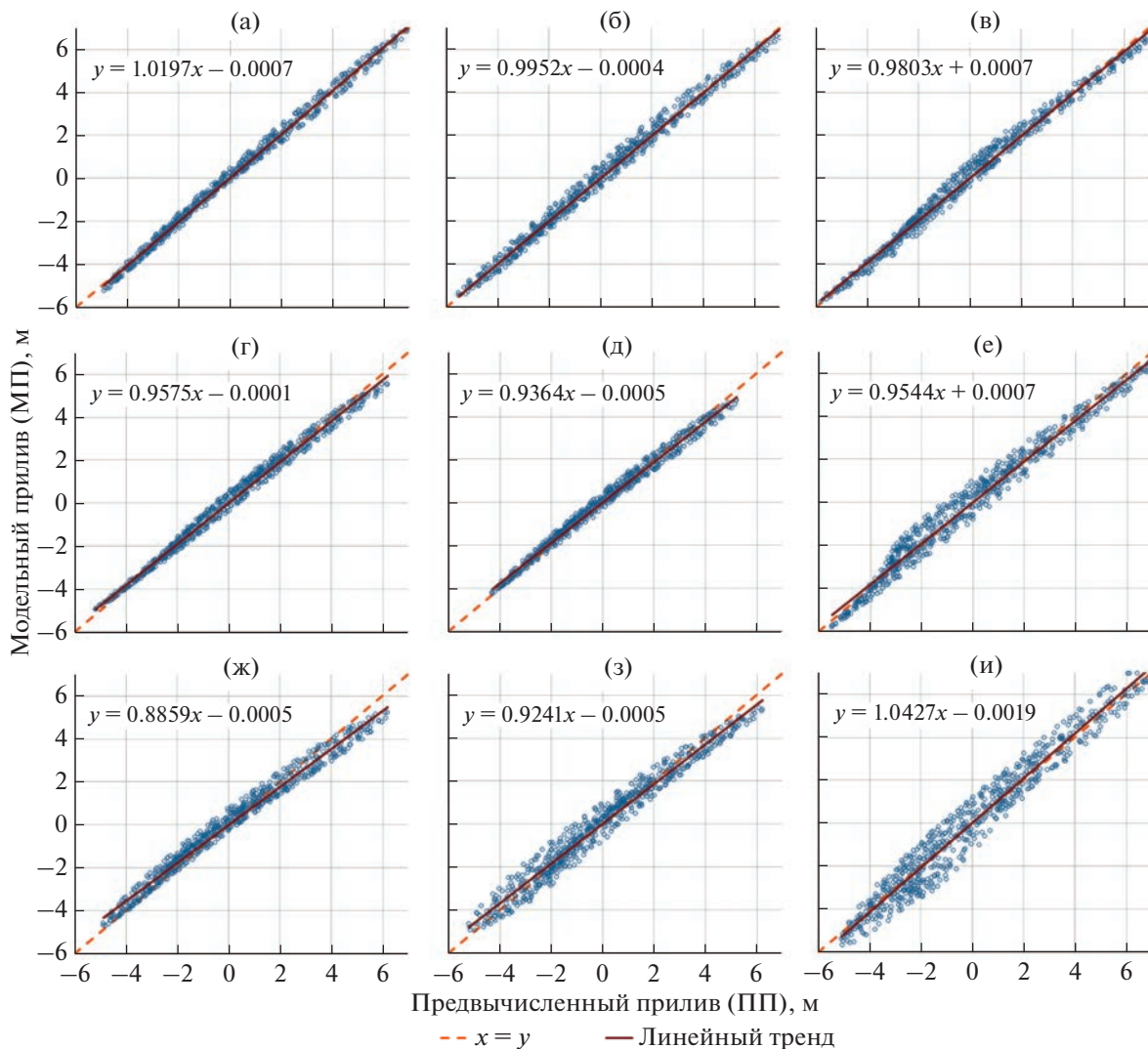


Рис. 2. Корреляционные диаграммы модельного и предвычисленного приливного уровня моря для постов в акватории Пенжинской губы: о. Ивиньчаман (а), м. Рифовый (б), м. Водопадный (в), м. Средний (г), м. Тайгонос (д), м. Угольный (е), р. Яваям (ж), б. Причальная (з), м. Астрономический (и).

жигинской губы) амплитуда волны достигает меньших значений и лежит в пределах 2.5–2.6 м, в этой области наблюдается расхождение изофаз.

Пространственное распределение амплитудных характеристик полусуточной приливной волны M2 (рис. 3б) имеет более сложный характер, в данном случае можно говорить о преобладании стоячей компоненты в распространении приливных колебаний. Аналогично приливной волне K1, изоамплитуды больших значений расположены от входа в залив Шелихова до мыса Водопадный вдоль камчатского берега. В районе северо-восточной оконечности полуострова Елистратова (мыса Опасный) наблюдается резкое падение амплитуды волны M2 до значений 0.7 м; от мыса Астрономический в направлении эстуария реки Пенжина происходит возрастание ам-

плитуды волны M2 до значений 1.4 м. Пространственное распределение изофаз в акватории Пенжинской губы соответствует “канальному типу” распространения волны. В юго-западной части области исследований от мыса Тайгонос до Гижигинской губы амплитуда волны M2 лежит в пределах 0.8–1.0 м и, аналогично волне K1, наблюдается расхождение изофаз. Общая картина пространственного распределения характеристик приливных волн M2 и K1 исследуемой акватории хорошо согласуется с результатами работ [21, 22, 28, 33].

Для оценки характера поля скоростей приливных течений выполнены расчеты коэффициента эллиптичности (реверсивности) E [26], который в скалярном виде представляет собой отношение величин малой и главной полуосей приливного

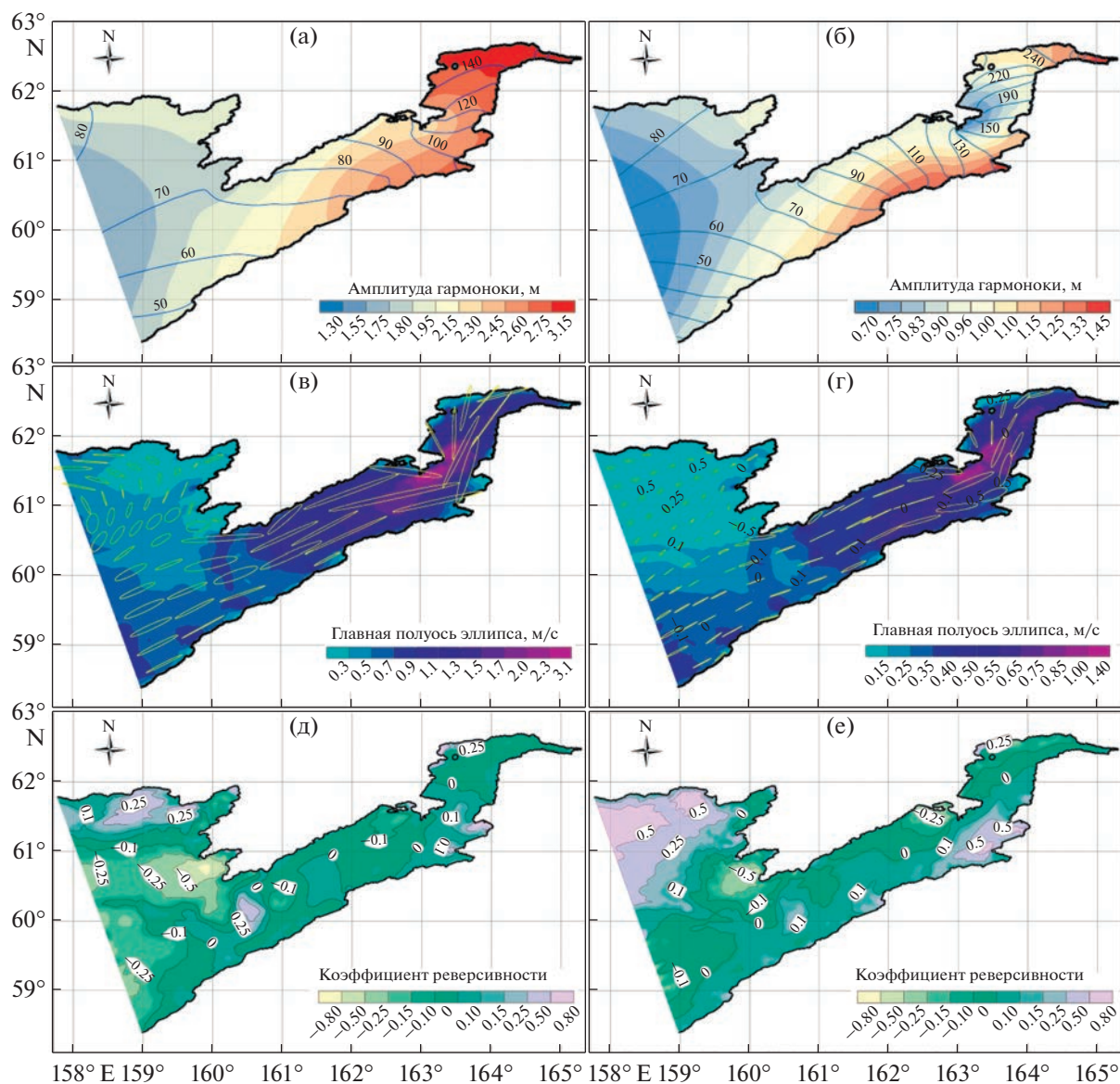


Рис. 3. Характеристики амплитуд и поверхностных течений основных волн прилива: (а) — котидальная карта амплитудных характеристик приливной “лунной-солнечной деклинационной, суточной” волны K1, (б) — котидальная карта амплитудных характеристик “главной лунной полусуточной” волны M2, (в) — приливные эллипсы волны K1, (г) — приливные эллипсы волны M2, (д) — пространственное распределение коэффициента реверсивности приливного эллипса и его полярность для суточной волны K1, (е) — пространственное распределение коэффициента реверсивности приливного эллипса волны M2.

эллипса. При значениях E , близких к нулю, течения классифицируются как “реверсивные”; при значениях, близких к единице, течения являются “круговыми”. Знак коэффициента реверсивности указывает на направление вращения вектора приливного течения (поляризацию приливного эллипса): отрицательные значения соответствуют вращению вектора по часовой стрелке (антициклоническое); положительные — против часовой стрелки (циклоническое).

Карты эллипсов приливных течений волн K1 и M2 для поверхностного слоя акватории исследо-

вания, полученные по результатам моделирования, представлены на (рис. 3в, 3г). Анализ пространственного распределения характеристик приливных эллипсов волн K1 и M2 и коэффициента реверсивности течения в акватории залива Шелихова (рис. 3д, 3е) позволяет сделать вывод о том, что приливные течения акватории относятся к категории реверсивных. В акватории, прилегающей к Внутренней губе (расположенной к западу от мыса Тайгонос, рис. 1), в центральной части залива Шелихова наблюдается антициклоническое вращение вектора скорости течения. В аква-

Таблица 2. Относительное отклонение амплитуд A , % и абсолютное отклонение фаз P , град модельных и справочных ГП волн прилива

Пост	M2		K1		O1	
	A	P	A	P	A	P
о. Ивиньичаман	7.44	−7.75	4.89	−4.63	1.02	0.12
м. Рифовый	−0.36	−1.80	−0.81	−5.70	−2.80	−3.36
м. Водопадный	−14.72	−5.83	−0.08	2.07	−6.32	4.98
м. Средний	−20.11	2.60	−1.97	3.60	−6.12	2.60
м. Тайгонос	6.19	−16.30	−6.43	−3.00	−6.98	−2.40
м. Угольный	−9.16	−0.30	−2.13	7.10	−4.85	10.20
р. Яваям	−11.69	−23.30	−9.62	−2.90	−13.47	−4.10
б. Причальная	−18.77	−21.59	−7.84	−5.75	−9.34	−0.62
м. Астрономический	−0.49	−0.07	−0.85	9.40	−7.16	−17.25

тории к западу от Гижигинской губы, в северной части залива, — циклоническое вращение вектора скорости течения.

У входа в Гижигинскую губу скорости приливных течений гармоника K1 минимальны и составляют ~0.3 м/с, максимальные скорости достигают величин 3.1 м/с в горле Пенжинской губы, над котловиной у полуострова Елистратова. Максимумы скоростей M2 также расположены над котловиной в горле Пенжинской губы. Порядок скоростей приливных течений, полученный в результате моделирования, согласуется с данными лоций Охотского моря [9, 12].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в результате моделирования пространственные характеристики ГП наиболее значимых волн прилива, наблюдаемых в акватории объекта исследования, хорошо согласуются с результатами ранее выполненных работ по моделированию акватории Охотского моря [21, 28]. Относительные отклонения амплитуд и абсолютные отклонения фаз модельных и справочных ГП волн прилива представлены в табл. 2. Величина относительного отклонения амплитуды наибольшей волны K1 предвычисленного и модельного приливов для всех постов не превышает 10%, второй по значимости волны O1 не превышает 13.5%. Фазовые отклонения для суточной волны прилива K1 в большинстве случаев не превышают 6°, для волны O1 не превышают 5°, завышенные значения отклонений фаз наблюдаются только на двух постах — р. Яваям и м. Астрономический.

Изменчивость ГП основных волн прилива за расчетный период, обусловленная влиянием атмосферного воздействия, рассчитана с использованием метода МНК [34] с суточным смещением расчетного окна, равного 32 сут. Ход относительных отклонений амплитуд и абсолютных откло-

нений фаз волн M2, K1 и O1, рассчитанных для каждого окна относительно средних значений за весь период (235 сут) для постов м. Тайгонос и б. Причальная представлен на рис. 4. Полученные значения отклонений характеристик гармонических постоянных незначительны, максимальные значения не превышают 3–4% по амплитуде и 2–3 градусов по фазе.

Абсолютные отклонения амплитуд и фаз четырех основных волн прилива, рассчитанных с помощью модели *Delft3D* и глобальной приливной модели TPXO9, представлены в табл. 3. Абсолютные отклонения характеристик ГП волн прилива в целом возрастают по направлению от входа к вершине Пенжинской губы. Максимальные значения отклонений по амплитуде и фазе составили 0.54 м (гармоника K1, пост м. Астрономический) и 30.5° (гармоника S2, пост м. Рифовый). Можно сделать вывод, что в районе исследования глобальная модель TPXO9 недостаточно точно описывает характеристики волн прилива в прибрежных мелководных акваториях.

На основе результатов гармонического анализа можно сделать заключение о корректности воспроизведения моделью суточных волн прилива (K1 и O1) для большинства постов. Существенные отклонения модельных и справочных характеристик ГП наблюдается только на двух постах — р. Яваям и м. Астрономический. Результаты сравнения главной полусуточной волны M2 ПП и МП — неоднозначные, характеристики ГП приливных волн согласуются со справочными только для половины постов. Относительная ошибка амплитуды ГП волны M2 лежит в широких пределах 0.36–20.11%, фазовые различия — в пределах 0°–23°.

Графики хода уровня моря для постов с различными количественными оценками представлены на рис. 5. На посту м. Средний ход уровня моря модельного прилива близок к предвычис-

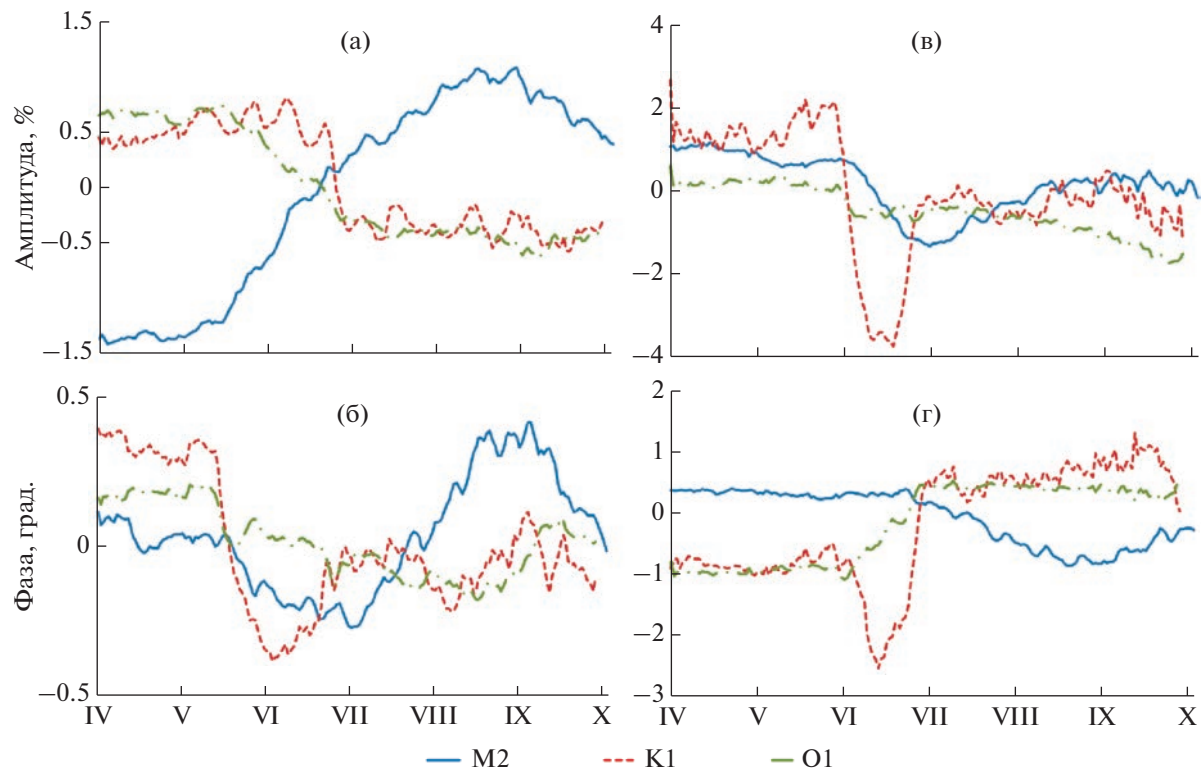


Рис. 4. Ход отклонений амплитуд и фаз волн M2, K1 и O1 за расчетный период: (а, б) – пост м. Тайгонос; (в, г) – пост б. Причальная за безледный период.

ленному, что свидетельствует о высокой согласованности модельных результатов и справочных данных. На посту м. Астрономический (рис. 5а) величины прилива для ПП и МП имеет схожие по амплитуде значения, но из-за отличий справочных и модельных фаз волн прилива наблюдается заметная разница в форме графиков: амплитуды волн модельного прилива не имеют существенных расхождений со справочными, но при этом наблюдаются фазовые сдвиги суточных волн K1 и

O1 на 9.4° и 17.2° градуса соответственно (табл. 2). На посту р. Яваям (рис. 5в) отмечается заметное постоянное превышение уровня ПП относительно МП в области полных вод.

Анализ количественных оценок соответствия МП и ПП показывает высокую степень согласованности модельных и справочных данных для 5 постов (о. Ивиньичаман, м. Рифовый, м. Водопадный, м. Средний, м. Тайгонос), для остальных

Таблица 3. Абсолютные отклонения амплитуд *A*, м и фаз *P*, град, рассчитанных с помощью модели *Delft3D* и глобальной приливной модели ТРХО9 характеристик ГП четырех главных волн прилива.

Пост	M2		S2		K1		O1	
	<i>A</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>P</i>
о. Ивиньичаман	0.26	−6.20	0.01	−12.03	0.23	−5.10	0.01	−3.78
м. Рифовый	0.05	−17.59	0.00	−30.51	0.40	−10.81	0.10	−6.83
м. Водопадный	0.26	−8.00	0.09	−18.61	0.41	−5.77	0.15	−3.49
м. Средний	0.11	16.65	0.00	12.64	0.38	1.29	0.07	2.67
м. Тайгонос	0.07	−0.06	−0.01	−5.39	0.09	2.08	0.02	0.39
м. Угольный	0.40	2.16	0.13	−7.03	0.49	−5.26	0.16	−2.32
р. Яваям	0.19	−7.88	0.02	−14.61	0.11	−5.37	0.00	−6.41
б. Причальная	0.33	−16.30	0.07	−22.73	0.20	−11.93	0.04	−12.20
м. Астрономический	−0.32	−16.53	−0.06	−27.76	0.54	−19.83	0.12	−13.39

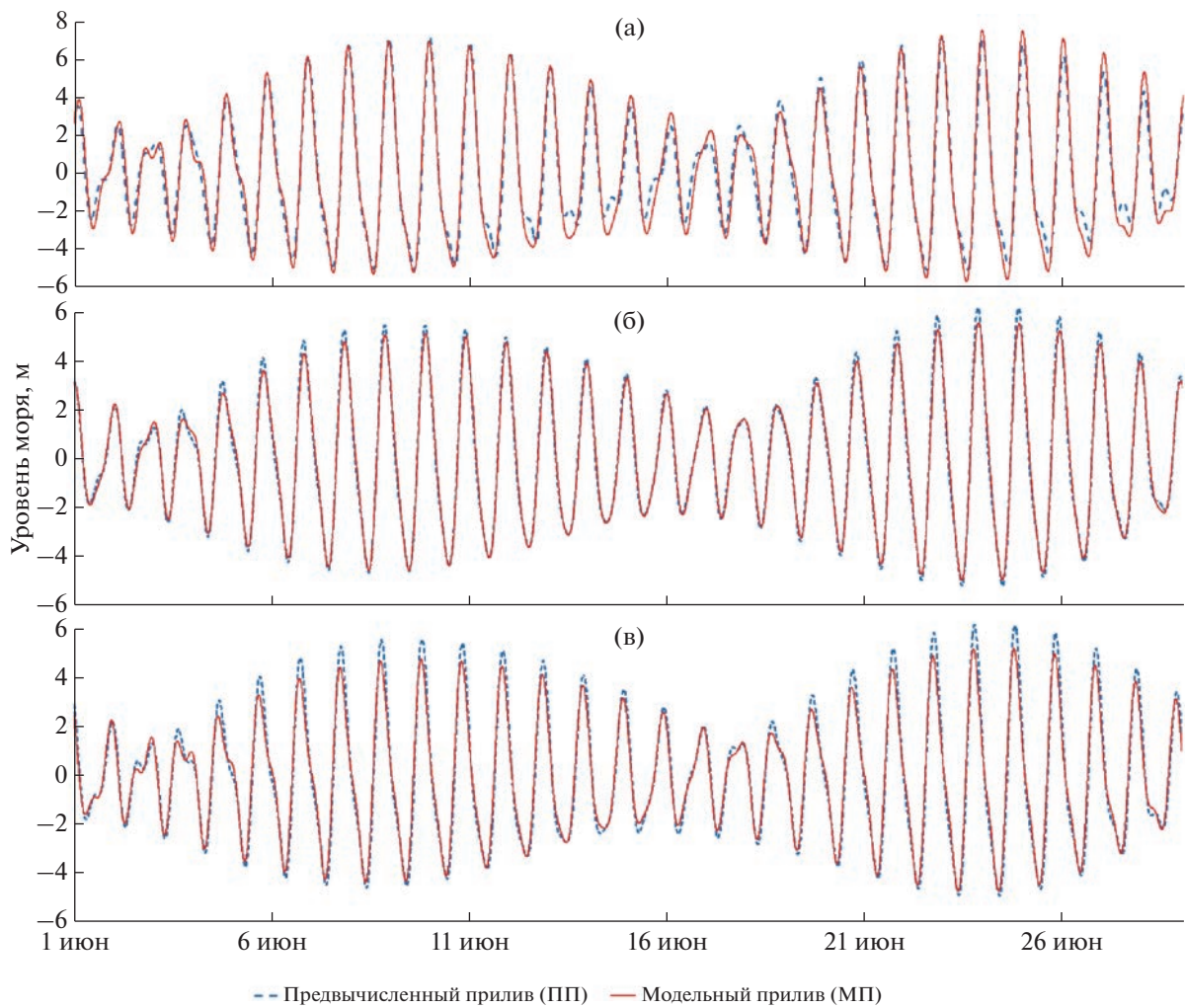


Рис. 5. График МП и ПП для постов с различными оценками моделирования: (а) м. Астрономический; (б) м. Средний; (в) м. Яваям.

четырёх постов нельзя сделать однозначных заключений. Посты с малыми (№ 3 м. Водопадный, № 2 м. Рифовый) и относительно большими (№ 6 м. Угольный, № 9 м. Астрономический) отклонениями МП и ПП географически расположены на восточном берегу северной части акватории и чередуются в шахматном порядке (рис. 1), из чего можно прийти к выводу, что пространственных закономерностей распределения значений невязки, которые можно интерпретировать как ошибки моделирования, не наблюдается.

Также следует отметить, что амплитуды полусуточной волны М2 меньше амплитуды суточной волны К1 ориентировочно в два раза. Различия гармонических постоянных, полученных по модельным данным и на основе натурных наблюдений, возможно, связаны с несинхронностью во времени сроков, в которые проводились наблюдения. В этом случае при большой величине прилива незначительные отклонения от сроков могут

привести к ошибкам при расчете характеристик приливных волн.

В целях контроля качества расчета справочных ГП был выполнен гармонический анализ (ГА) ежечасных архивных исторических рядов уровней наблюдений для рассматриваемых постов. ГА осуществлен с использованием программного комплекса, основанного на методе МНК, стонно-нагонная составляющая исключена из исходных рядов предварительной обработкой методами цифровой фильтрации. Полученные характеристики ГП основных волн прилива близки по значениям к справочным (величина относительного отклонения амплитуд основных гармоник лежит в пределах 3.1%, расхождение фаз — в пределах 2.5°). Остаточный уровень моря, полученный как разность исходных рядов наблюдений и предвычисленных рядов, характеризуется высокими значениями среднеквадратического отклонения. Возможно, учитывая предварительную

Таблица 4. Распределение по градациям отклонений предвычисленных и наблюдаемых (без учета сгонно-нагонной составляющей) уровней моря, выраженное в процентах, СКО остаточных рядов (σ), длительность рядов наблюдений

Пункт	Интервал, см											σ , см	Длина, сутки
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	>100		
о. Ивиньичаман	36.7	32.1	20.1	7.9	2.8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	19.2	60
м. Рифовый	23.7	22.8	19.4	15.4	8.5	4.2	2.9	1.6	0.6	0.7	0.2	31.6	68
м. Водопадный	34.1	25.7	18.7	11.0	5.7	2.3	1.5	0.5	0.3	0.1	0.2	25.2	63
м. Средний	40.6	30.9	18.9	7.9	1.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	50
м. Тайгонос	58.1	30.7	9.6	1.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	13.0	79
м. Угольный	33.6	29.1	19.6	9.9	4.5	1.8	1.0	0.3	0.2	0.0	0.0	23.1	79
б. Причальная	43.6	29.5	17.1	6.7	2.9	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	46
м. Астрономический	21.5	20.4	19.2	16.5	11.5	6.0	2.1	1.0	1.7	0.2	0.0	32.6	20

фильтрацию сгонно-нагонных явлений, это свидетельствует о содержании ошибок в данных измерений. Распределения по градациям ошибок гармонического анализа и значения среднеквадратического отклонения (СКО) для ряда постов приведены в табл. 4.

Таким образом, характеристики ГП Пенжинской губы, приводимые в справочниках [5], рассчитанные методом Дарвина по коротким рядам длительностью 30 суток, полученным по серии наблюдений в 60-годах прошлого века, а в отдельном случае (на м. Астрономический) — по серии наблюдений в 15 суток за 1915 год, не могут считаться абсолютным эталоном. Перспективы данного исследования связаны с уточнением вертикальной структуры модели, учетом стока основных рек водосбора акватории Пенжинской губы, анализом сгонно-нагонных явлений в акватории. Созданная для акватории гидродинамическая 3D-модель на основе современных данных позволяет более эффективно учесть влияние различных факторов на открытой границе (на входе в залив Шелихова), а также может постоянно уточняться с помощью дополнительной настройки модели по мере появления новых данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении исследований гидродинамического режима акваторий с использованием численного моделирования ключевую роль играют реперные посты уровней наблюдений, проводящие длительные наблюдения на постоянной основе. Плотность и репрезентативность наблюдательной сети, особенно в труднодоступных районах Дальнего Востока России, обладает крайней степенью неоднородности, что, в свою очередь, обуславливает актуальность проблемы оценки качества имеющихся данных наблюдений и возможности их эффективного использования для решения региональных научно-практических за-

дач. В представленной работе с использованием модуля *Delfi3D-flow* выполнено численное моделирование гидродинамического режима акватории Пенжинской губы, получены пространственные характеристики ГП наиболее значимых волн прилива, наблюдаемых в акватории объекта исследования. Показано, что пространственные распределения ГП приливных волн в целом хорошо согласуются с данными справочников и ранее опубликованных результатов. Невязки результатов модельных и справочных характеристик ГП не имеют пространственных закономерностей и предположительно связаны с искажением рассчитанных характеристик приливных волн по коротким рядам данных наблюдений, а также с дискретизацией по времени сроков наблюдения при больших градиентах изменения уровня моря во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов К.Т., Горбачев В.В., Мороз В.В. Атлас приливов Берингова, Охотского и Японского морей. Владивосток: Дальэрогеодезия, 1991. 29 с.
2. Войнов Г.Н. Приливные явления и методология их исследований в шельфовой зоне Арктических морей: диссертация докт. геогр. наук: канд. ист. наук: 25.00.28 / Войнов Геннадий Николаевич. — Санкт-Петербург, 2002. 350 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия // СПб: Гидрометеоздат, 1998. 342 с.
4. Горин С.Л., Коваль М.В., Сазонов А.А., Терский П.Н. Современный гидрологический режим нижнего течения реки Пенжины и первые сведения о гидрологических процессах в ее эстуарии (по результатам экспедиции 2014 г.) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. КамчатНИРО, 2015. Вып. 37. С. 33–52.
<https://doi.org/10.15853/2072-8212.2015.37.33-52>

5. Деева Р.А. Каталог гармонических и негармонических постоянных приливов отечественных вод морей Дальнего Востока // Труды ДВНИГМИ. 1972. Вып. 018. 248 с.
6. Дуванин А.И. Приливы в море. — Л.: Гидрометеоздат, 1960. 390 с.
7. Думанская И.О. Ледовые условия азиатской части России. — М.; Обнинск: ИГ — СОЦИН, 2017. 640 с.
8. Кондратюк В.И. Климат Камчатки. — М.: Гидрометеоздат, 1974. 200 с.
9. Лоция побережий РСФСР Охотского моря и восточного берега полуострова Камчатки с островом Карагинским включительно / по поручению Гл. гидрол. упр. сост. гидрограф-геодезист Давыдов. — Владивосток: Упр. по обеспечению безопасности кораблевождения Дал. Востока. 1923. 1498 с.
10. Лоция Охотского моря. Выпуск 2. Северная часть моря. — Л.: Гидрографическое управление ВМС. 1954. 214 с.
11. Лоция Охотского моря Выпуск 2 Северная часть Охотского моря Управление начальника гидрографической службы Военно-морского флота, 1960. 200 с.
12. Лоция Охотского моря. Вып. 2. Северная часть моря. М.: Гл. управление навигации и океанографии Мин-ва обороны СССР. 1986. 314 с.
13. Любичкий Ю.В. Об оценке качества прогнозов суммарных уровней приливного моря // Юбилейный выпуск “ДВНИГМИ — 65 лет”. Владивосток: Дальнаука, 2015. 270 с. С. 52—62.
14. Любичкий Ю.В. Результаты испытаний метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря на побережье Охотского моря, северной части Японского моря, восточного побережья полуострова Камчатка // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. — М.: Изд-во Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. 2020. № 47. С. 60—78.
15. Мартынов В.К. Моделирование прилива в Пенжинской губе Охотского моря с учетом ледяного покрова // Моделирование и экспериментальное исследование гидрологии шельфовых морей. Сб. научн. трудов. — Л.: Изд-во ЛГМИ, 1988. Вып. 100. С. 83—87.
16. Наставление по службе прогнозов // Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. РД 52.27.759-2011. — М.: ТРИАДА-ЛТД, 2011. 195 с.
17. Некрасов А.В., Романенков Д.А. Прогностическая оценка трансформации приливных колебаний уровня при крупномасштабном гидротехническом строительстве на побережье Белого и Охотского морей // Колебания уровня в морях. СПб: РГГМУ, 2003. С. 57—78.
18. Попов С.К. Моделирование и прогноз изменений уровня и скорости течений в морях России // Диссертация ... доктора Физико-математических наук: 25.00.29 / Попов Сергей Константинович; [Место защиты: ФГБУ “Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации”], 2019. 300 с.
19. Попов С.К., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л. и др. Метод краткосрочного прогноза уровня Баренцева и Белого морей // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов — М.: Изд-во Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. 2014. № 41. С. 98—110.
20. Романенко Ф.А., Горин С.Л., Коваль М.В. Формирование рельефа нижнего течения реки Пенжины и Пенжинской губы в голоцене // Сборник: XXXVI Пленум Геоморфологической комиссии РАН: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием “Геоморфология — наука XXI века” (Барнаул, 24—28 сентября 2018 г.). Изд-во Алтайского ун-та Барнаул, 2018. С. 324—329.
21. Романенков Д.А. Прогностическое моделирование приливов в Охотском море // Автореферат диссертации. СПб: РГГМИ, 1996. 16 с.
22. Сгибнева Л.А. О распространении приливной волны в Пенжинской губе Охотского моря // Труды ГОИН. 1975. Вып. 126. С. 51—63.
23. Стахевич В.С., Владимирский Н.П. Руководство по обработке и предсказанию приливов. Л.: Изд. Гидрографического управления ВМФ СССР, 1940. 348 с.
24. Шевченко Г.В., Романов А.А. Пространственная структура прилива в Охотском море на основе данных спутниковой альтиметрии // Колебания уровня в морях. Сборник научных статей. Российский гидрометеорологический университет. СПб: Гидрометеоздат, 2003. С. 92—110.
25. Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 2009. 19 p.
26. Carbajal N., Gaviño J.H. A new theory on tidal currents rotation // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. № 1, L01609. <http://dx.doi.org/05.10.2022> (Дата обращения: <https://doi.org/10.1029/2006GL027670>)
27. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V. 19. № 2. P. 183—204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOB>2.0.CO;2)
28. Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk // Journal of Physical Oceanography. 1998. V. 28. № 7. P. 1389—1409.
29. Leendertse J.J. Aspects of a Computational Model for Long Period Water Wave Propagation. Santa Monica, CA: Rand Corporation, Report RM-5294-PR. 1967. 165 p.
30. Leendertse J.J., Alexander R.C., Liu S.K. A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas. Santa Monica, CA: Rand Corporation, Report R-1417-OWRR. 1973. 57 p.

31. *Leendertse J.J., Gritton E.C.* A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas. Santa Monica, CA: Rand Corporation, Report R-708-NYC. 1971. 53 p.
32. *Metzger E.J., Helber R.W., Hogan P.J. et al.* Global Ocean Forecast System 3.1 Validation Testing. Naval Research Laboratory (NRL), Report NRL/MR/7320-17-9722, 2017. 56 p.
33. *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). P. 538–552.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.06.005>
34. *Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz, S.* Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE // *Computers and Geosciences*. 2002. V. 28. P. 929–937.
35. *Suzuki K., Kanari S.* Tidal simulation of the Sea of Okhotsk (in Japanese) // *Kaiyo Kagaku*. 1986. V. 18. P. 455–463.
36. TPXO9-atlas // <https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas> (Дата обращения: 16.12.2022).

Numerical Modeling of Tidal Phenomena of the Penzhinskaya Bay

D. R. Shpachuk^{a, b, #}, O. V. Sokolov^a, A. N. Bugaets^b

^a*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia*

^b*Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

[#]*e-mail: denis_den_r@mail.ru*

In this study, the *Delft3D-Flow* hydrodynamic model was used to determine the characteristics of the main tidal waves and currents in the Penzhina Bay (Sea of Okhotsk, Russia). The initial and boundary conditions are set according to the TPXO9 model data, the salinity and water temperature for each model layer are set based on the reanalysis data of the HYCOM ocean general circulation model, with a time step of 3 h. European Center for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) reanalysis ERA-5 was used as meteorological forcing. Modeling was performed for the ice-free period from May to September 2005. Maps of cotidal lines, tidal ellipses, and reversibility coefficient for the main tide waves: semidiurnal wave M2 and diurnal wave K1 were constructed. The model was verified by comparing the published and calculated harmonic components for 9 sea level monitoring points located in the Penzhina Bay. Conformance evaluation generally shows a high degree of consistency between model and reference data. The values of the coefficient of determination R^2 between the series formed by the model and published harmonic components are in the range of 0.96–0.99. According to the magnitude of relative errors, the simulation results are divided into two consistency categories — high (1.48–2.14%) and satisfactory (2.93–4.27%). Spatial patterns of distribution for the values of relative errors were not found. A certain inconsistency in the results is presumably due to the time discretization of the observation time support and the short sea level monitoring data series used to calculate the published harmonic components at the Penzhina Bay.

Keywords: numerical modeling, Delft3D, tide waves, Penzhinskaya Bay, sea of Okhotsk