

УДК 551.466.88

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУД ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВНЫХ ВОЛН НА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ ШЕЛЬФЕ О. САХАЛИН

© 2023 г. Е. А. Рувинская<sup>1</sup>, О. Е. Куркина<sup>1</sup>, А. А. Куркин<sup>1,\*</sup>

Представлено академиком РАН Е.А. Маревым 10.11.2022 г.

Поступило 10.11.2022 г.

После доработки 12.11.2022 г.

Принято к публикации 14.11.2022 г.

Рассматривается трансформация многокомпонентного баротропного прилива в Охотском море в рамках полнонелинейных негидростатических расчетов. Для инициализации модели используются данные приливной модели и параметризуемые рельеф дна и вертикальные профили плотности морской воды на основе данных открытых международных атласов. Получены оценки амплитуд волн суточного и полусуточного бароклинного прилива в терминах смещения изопикнических поверхностей на различных горизонтах, представленные в виде географических карт. Показано, что распределение амплитуд существенно зависит от глубины, имеет сложную пространственную структуру с заметным преобладанием амплитуд бароклиных волн суточного периода и основными экстремумами, расположенными на шельфе напротив м. Елизаветы, Охинского перешейка и м. Терпения. Реализованный подход к построению карт амплитуд внутренних приливов может быть применен для других шельфовых акваторий морей РФ и использован при прогнозировании этих явлений, в том числе в инженерных оценках для проектирования и эксплуатации морской инфраструктуры.

*Ключевые слова:* бароклинные волны, уравнения Эйлера, полнонелинейная модель, Охотское море

**DOI:** 10.31857/S2686739722602551, **EDN:** TIIJEG

### ВВЕДЕНИЕ

Тематика, связанная с генерацией нелинейных внутренних волн приливными потоками, обтекающими неровности рельефа дна в стратифицированном океане, представляет повышенный интерес в последние десятилетия. При этом численное моделирование таких процессов часто служит мощным вспомогательным инструментом, отчасти компенсирующим скудость имеющихся натуральных измерений. Волновая динамика в прибрежных регионах, характеризующихся существенной неоднородностью батиметрии дна и находящихся в поле приливных волн, должна моделироваться с использованием негидростатических полнонелинейных моделей, поскольку в этом случае нельзя пренебречь вертикальным движением [1]. Важной особенностью процесса моделирования бароклиных волн является высокое разрешение сетки по горизонтали, чтобы

численно индуцированная дисперсия была малой по сравнению с физической дисперсией [2]. Любые негидростатические расчеты требуют высокого разрешения не только по пространству, но и по времени. Хотя в публикациях последних лет показаны примеры успешного трехмерного численного негидростатического моделирования процесса трансформации приливных волн на шельфе (см., например, [3–6]), такой подход остается крайне трудоемким и ресурсозатратным, создающим определенные сложности при анализе и интерпретации результатов. Российскими исследователями подобные расчеты проводились только для небольших акваторий, например, стратифицированных озер [7, 8]. Другой подход состоит в использовании двумерных негидростатических моделей (вертикальная плоскость), в которых физические величины изменяются только в поперечном к шельфу и вертикальном направлениях [9]. В таких работах, как [10–13], продемонстрировано хорошее соответствие полученных при моделировании результатов с данными натуральных наблюдений. В двумерных моделях генерируемые внутренние приливные волны предполагаются плоскими и распространяющимися по нормали к неровностям дна, а изменчивость

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

\*E-mail: aakurkin@ntnu.ru

параметров волновых полей в направлении нормали — много большей, чем по касательной к ним. В некоторых работах (например, [14]) высказано мнение о том, что горизонтальный волновой поток бароклинной приливной энергии зависит от размерности модели, причем авторы отмечают амплитуды внутренних приливов. Однако вопрос о том, насколько эти предположения справедливы, остается открытым (см. процитированные выше успешные работы). Выбор репрезентативного разреза, правильная параметризация стратификации плотности морской воды и донного рельефа и корректное задание граничных условий, как показывает практика, обеспечивают весьма достоверные результаты, даже для более простых классов негидростатических моделей (например, слабонелинейных).

В настоящей работе для определения амплитуд длинных бароклиных волн суточного и полусуточного периодов проведена серия расчетов с использованием полнонелинейной двумерной негидростатической модели на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Этот регион выбран не случайно — здесь расположено множество перспективных месторождений углеводородов, часть из которых активно разрабатывается уже сейчас, что приводит к необходимости строительства и обслуживания объектов морской инфраструктуры. Разрезы равномерно покрывают регион от м. Елизаветы до м. Терпения и расположены, в основном, перпендикулярно изобатам. Длина расчетной области для выбранных секций составляла в среднем 110 км, а перепады глубин внутри одной секции варьировались от 1000–1500 м в начале до 100 м в мелководной зоне, покрывая участок материкового склона и глубоководный шельф. Включение основного перепада глубин в расчетную область позволяет отследить весь процесс трансформации длинных баротропных волн в бароклинные (т.е., фактически, генерации внутренних приливных волн) и бароклиных — в солидоры и пакеты короткопериодных волн.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ И ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ

Исследование динамики внутренних волн проводилось в рамках программного комплекса, реализующего процедуру численного интегрирования полнонелинейной (вертикальная плоскость) системы уравнений гидродинамики невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости в приближении Буссинеска с учетом влияния баротропного прилива и вращения Земли [15]. На открытой глубоководной границе выбранных разрезов задавался баротропный форсинг в виде многокомпонентного прилива ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,

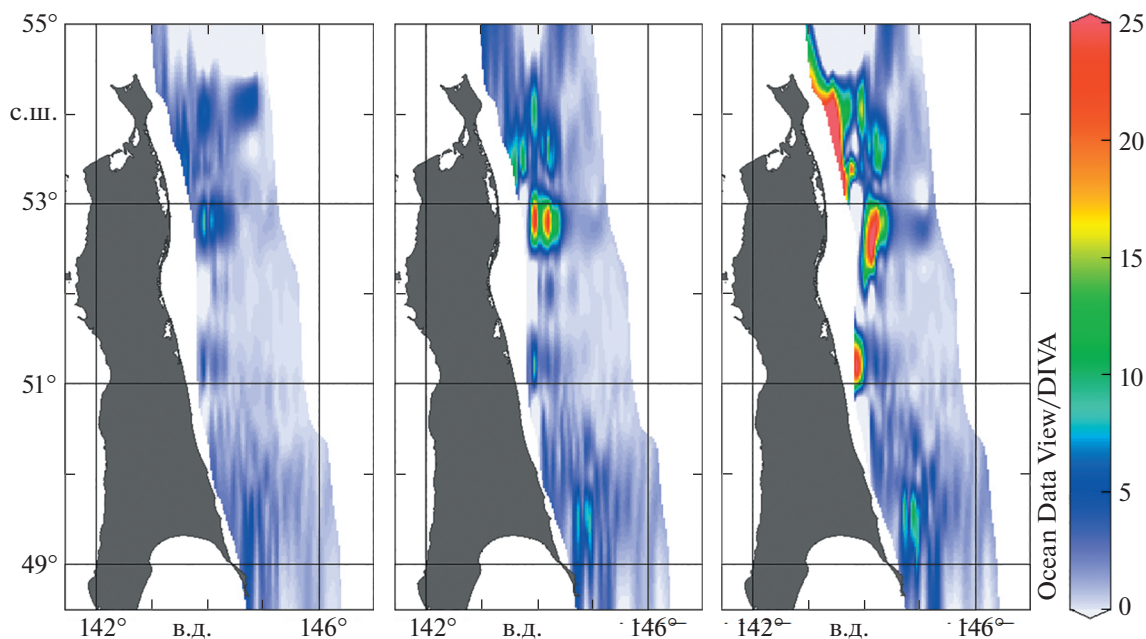
$Q_1$ ), амплитуды и фазы которого определены из модели TPXO 8 (A TOPEX/Poseidon Global Tidal Model), основанной на данных спутниковой альтиметрии [16]. Сложная структура баротропных течений (см., например, [17]) не позволяет выделить единственное направление распространения приливных волн к шельфу, поэтому было решено рассматривать несколько близких направлений, почти перпендикулярных изобатам. Данные о стратификации плотности морской воды взяты из климатического атласа WOA18 с разрешением 0.25 градуса для летнего сезона, а батиметрия — из GEBCO 2014 с разрешением 1 мин. Для того, чтобы при моделировании учитывать только наиболее характерные особенности вертикального профиля плотности и батиметрии дна (данные из атласов вдоль разрезов дополнительно усреднялись по ширине 10–15 км в зависимости от рельефа), обе функции параметризовались.

Подробное описание модели, ее настройки, а также волновой динамики вдоль отдельных разрезов дано в наших работах [18, 19]. Здесь обсудим лишь разделение масштабов, а также определение амплитуд внутренних приливных волн на различных горизонтах.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поскольку в “мелководной” зоне минимальные глубины составляли порядка 100–120 м для всех разрезов (процессы трансформации короткопериодных волн на шельфе и их обрушение остались вне рамок данного исследования), анализировались смещения линий одинаковой плотности (изопикн), расположенных на глубинах 30, 70 и 100 м. Необходимость выделения изопикн на разных глубинах обусловлена сложной, многомерной вертикальной структурой генерируемых бароклиных полей (см., например, [19]), которая делает невозможным построение универсальных карт амплитуд бароклиного прилива на одном единственном уровне по глубине. Также стоит отметить, что в процессе движения нижние изопикны, упирающиеся в дно в “мелководной” зоне, могут испытывать очень большие локальные колебания по вертикали за счет эффекта “внутреннего наката–отката”, приводящего к усилению амплитуд в 2 и более раз — эту стадию мы исключили из рассмотрения при оценке амплитуд внутренних приливных волн, поскольку она требует отдельного более пристального изучения.

Амплитуды суточных и полусуточных бароклиных волн в каждой точке разреза определялись из спектров осциллограмм смещений — как значение амплитуды на фиксированной частоте. Тут стоит отметить, что не во всех расчетах на частотах суточных и полусуточных волн наблюда-



**Рис. 1.** Карты амплитуд полусуточных (12 ч) бароклиных приливов для смещений изопикн, расположенных на глубине 30, 70 и 100 м в невозмущенном состоянии. Цветовая шкала дана в метрах.

лись пики. Это связано с нелинейностью самой системы и, возможно, с частотно-избирательными особенностями шельфа, над которым происходит трансформация бароклиных волн. Более того, на исследуемом участке Охотского моря суточные бароклиные волны являются субинерционными и, в рамках общих представлений линейной волновой теории, не могут распространяться свободно и существуют лишь недалеко от мест генерации [20], и, действительно, во многих случаях мы видим большое разнообразие пиков в амплитудном спектре осциллограммы и масштабов при разложении смещений по модам методами EMD, видимо, связанными с каскадом энергии из длинных суточных волн.

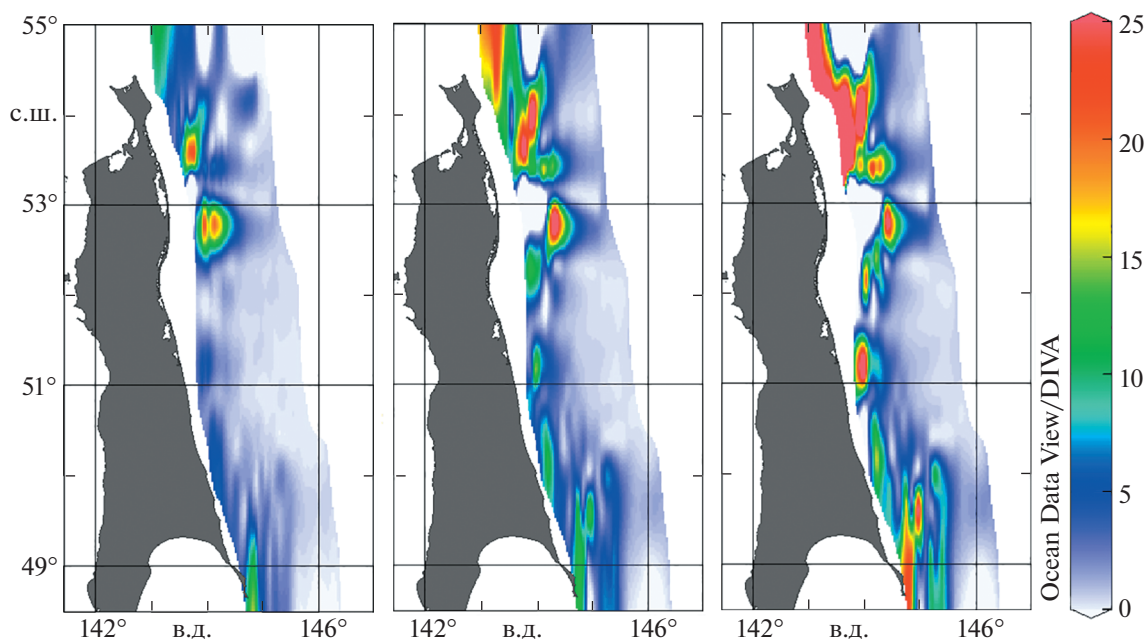
На рис. 1 представлены амплитуды волн полусуточного бароклиного прилива в исследуемом регионе для изопикн, расположенных в невозмущенном состоянии на глубине 30, 70 и 100 м. Как видно из рисунка, для верхней изопикны значение амплитуды бароклиной волны не превышает 10 м, максимальные значения достигаются между зал. Пильтун и зал. Чайво, что примерно соответствует расположению платформы Пильтун-Астохское-А. Локальные экстремумы с амплитудами от 5 м, в том числе в глубоководной зоне, для верхнего “слоя” наблюдаются также севернее – напротив Охинского перешейка, где расположено Кайганско-Васюканское месторождение, и южнее – вокруг м. Терпения.

Для “средней” изопикны (70 м) основные максимумы расположены в тех же районах, что и

максимумы верхней изопикны, а также напротив зал. Пильтун (вблизи платформы Одопту-море, которая расположена на меньшей глубине) и м. Беллинсгаузена (Богатинский и Центрально-Пограничный лицензионные участки). Максимальные амплитуды бароклиных волн на этом уровне достигают 20 м, причем в том числе на значительном удалении от берега.

По нижней изопикне (расположенной на глубине 100 м в невозмущенном состоянии) распространяются бароклиные смещения, имеющие амплитуды, достигающие 25–30 м. Хотя морская инфраструктура расположена в исследуемом регионе на меньшей глубине, такие волны могут быть источником генерации интенсивных короткопериодных внутренних волн. Стоит отметить также, что на северо-восточном шельфе о. Сахалин преобладают волны суточного баротропного прилива [21], поэтому, ожидаемо, и бароклиные волны полусуточного периода имеют умеренные амплитуды на большей части исследуемой области.

Пространственное распределение амплитуды колебаний для волн с периодом 25 ч (среднее значение для всех используемых суточных компонент баротропного прилива) представлено на рис. 2. Амплитуды волн суточного бароклиного прилива на верхней изопикне достигают 20 м. Основные максимумы расположены в том же диапазоне широт, что и для полусуточных волн, но при этом значения амплитуд в 2–3 раза больше. Для изопикны, расположенной в невозму-



**Рис. 2.** Карты амплитуд суточных (24 ч) бароклинных приливов для смещений изопоикн, расположенных на глубине 30, 70 и 100 м в невозмущенном состоянии. Цветовая шкала дана в метрах.

шенном состоянии на глубине 70 м, на большей части северо-восточного шельфа о. Сахалин (для глубин менее 200 м) амплитуды суточных приливных волн превышают 10–15 м. На “нижней” изопоикне отчетливо видны волны суточного периода, превышающие амплитуду 25 м, на северной оконечности о. Сахалин, где и волны баротропного прилива имеют максимальные значения амплитуд.

Однако максимумы, расположенные южнее — ближе к м. Терпения, не характерны для амплитуд баротропных суточных волн и, скорее всего, связаны именно с особенностями батиметрии и стратификации плотности в этой зоне.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе построены и проанализированы карты распределения амплитуд бароклинных волн суточного и полусуточного прилива вдоль северо-восточного шельфа о. Сахалин. Численные решения для выбранных двумерных разрезов ожидаемо оказались существенно бароклинными, в некоторых областях генерируются внутренние приливы достаточно больших амплитуд (до 5–10 м на изопоикне, расположенной на глубине 30 м, до 15–20 м на изопоикне 70 м и до 25 м на изопоикне, расположенной на глубине 100 м для волн полусуточного периода; до 20 м на “верхней” изопоикне, до 25 м на “средней” и до 30 м на “нижней” изопоикне для бароклинных волн суточного периода) — в том числе, в непосредственной близости к разрабатываемым ме-

сторождениям углеводородов на шельфе, что свидетельствует о необходимости учета бароклинных эффектов при проектировании морской инфраструктуры. Динамика внутренних волн в исследуемом регионе соответствует классической схеме генерации и трансформации внутренних приливных волн с последующим образованием волновых боров и интенсивных короткопериодных внутренних волн. Стоит отметить, что вертикальная структура расчетных волновых полей в основном соответствует низшей бароклинной моде, т.е. для смещений изопоикнических поверхностей имеется единственный экстремум в толще жидкости, и смещения убывают к дну и поверхности. Однако на отдельных участках выбранных разрезов наблюдаются и характерные для старших мод структуры. Поэтому анализ амплитуд внутренних приливных волн в дальнейшем необходимо дополнить разложением на вертикальные бароклинные моды.

Предложенный подход оценки амплитуд внутренних приливов может быть применен для других шельфовых акваторий и использован для создания дорожной карты по методологии прогнозирования этих явлений в морях РФ, включая дальневосточные моря и Арктику, в том числе в интересах безопасного проектирования и эксплуатации морской инфраструктуры.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности

(тема № FSWE-2020-0007 “Волновой климат стратифицированного морского шельфа: нелинейные динамические процессы и их влияние на прибрежную зону и гидротехнические сооружения”).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вольцингер Н.Е., Андросов А.А., Клеванный К.А., Сафрай А.С.* Океанологические модели негидростатической динамики: обзор // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11. № 1. С. 3–20.
2. *Vitousek S., Fringer O.B.* Physical vs. numerical dispersion in nonhydrostatic ocean modeling // *Ocean Model*. 2011. V. 40. P. 78–86.
3. *Vlasenko V., Stashchuk N., Inall M.E., Hopkins J.E.* Tidal energy conversion in a global hot spot: On the 3-D dynamics of baroclinic tides at the Celtic Sea shelf break // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014. V. 119 (6). P. 3249–3265.
4. *Vlasenko V., Stashchuk N.* Internal tides near the Celtic Sea shelf break: A new look at a well-known problem // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. V. 103. P. 24–36.
5. *Vlasenko V., Stashchuk N., Inall M.E., Porter M., Aleynik D.* Focusing of baroclinic tidal energy in a canyon // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. V. 121 (4). P. 2824–2840.
6. *Zeng Z., Brandt P., Lamb K.G., Greatbatch R.J., Dengler M., Claus M., Chen X.* Three-Dimensional Numerical Simulations of Internal Tides in the Angolan Upwelling Region // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021. V. 126 (2). <https://doi.org/10.1029/2020JC016460>
7. *Семин С.В., Куркина О.Е., Куркин А.А., Гиниятуллин А.Р.* Численное моделирование динамики стратифицированного озера // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2012. № 2 (95). С. 48–65.
8. *Зайцев А.И., Семин С.В., Костенко И.С.* Натурные измерения и численное моделирование гидрологических параметров в озере Тунайча // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2014. № 1 (103). С. 46–52.
9. *Морозов Е.Г., Нейман В.Г., Писарев С.В., Ерофеева С.Ю.* Внутренние приливные волны в Баренцевом море // *Доклады Академии наук*. 2003. Т. 392. № 5. С. 686–688.
10. *Rijnsburger S., Flores R.P., Pietrzak J.D., Lamb K.G., Jones N.L., Horner-Devine A.R., Souza A.J.* Observations of multiple internal wave packets in a tidal river plume // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021. V. 126 (8). <https://doi.org/10.1029/2020JC016575>
11. *Lamb K.G., Farmer D.* Instabilities in an internal solitary-like wave on the Oregon shelf // *Journal of Physical Oceanography*. 2011. V. 41 (1). P. 67–87.
12. *Bai X., Lamb K.G., Hu J., Liu Z.* On Tidal Modulation of the Evolution of Internal Solitary-Like Waves Passing through a Critical Point // *Journal of Physical Oceanography*. 2021. V. 51 (8). P. 2533–2552.
13. *Rivera-Rosario G., Diamessis P.J., Lien R.C., Lamb K.G., Thomsen G.N.* Formation of recirculating cores in convectively breaking internal solitary waves of depression shoaling over gentle slopes in the South China Sea // *Journal of Physical Oceanography*. 2020. V. 50 (5). P. 1137–1157.
14. *Katsumata K.* Two- and three-dimensional numerical models of internal tide generation at a continental slope // *Ocean Model*. 2006. V. 12. № 1–2. P. 217–234.
15. *Lamb K.* Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge // *J. Geoph. Res.* 1994. V. 99. P. 843–864.
16. *Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2002. V. 19 (2). P. 183–204.
17. *Путов В.Ф., Шевченко Г.В.* Особенности приливного режима на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Тематический выпуск Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института № 1. Владивосток: Дальнаука. 1998. С. 61–82.
18. *Рувинская Е.А., Куркина О.Е., Куркин А.А.* Перенос частиц и динамические эффекты при трансформации бароклинной приливной волны в условиях шельфа дальневосточных морей // *Экологические системы и приборы*. 2021. № 11. С. 109–118.
19. *Kuznetsov P.D., Rouvinskaya E.A., Kurkina O.E., Kurkin A.A.* Transformation of baroclinic tidal waves in the conditions of the shelf of the Far Eastern seas // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 946. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012024>
20. *Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K.* Baroclinic Tides: Theoretical Modeling and Observational Evidence. – Cambridge University Press: Cambridge. 2005.
21. *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.

## SPATIAL DISTRIBUTION OF AMPLITUDES OF INTERNAL TIDAL WAVES ON THE NORTH-EASTERN SHELF OF SAKHALIN

**E. A. Rouvinskaya<sup>a</sup>, O. E. Kurkina<sup>a</sup>, and A. A. Kurkin<sup>a, #</sup>**

<sup>a</sup>*R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail aakurkin@nntu.ru*

Presented by Academician of the RAS E.A. Mareev November 10, 2022

The transformation of a multicomponent barotropic tide in the Sea of Okhotsk is considered in the framework of fully nonlinear non-hydrostatic calculations. The data of the tidal model and parameterized bottom topography and vertical profiles of sea water density based on data from open international atlases are used to

initialize the model. Estimates of the wave amplitudes of the diurnal and semidiurnal baroclinic tides in terms of the displacement of isopycnal surfaces at different horizons are obtained and presented in the form of geographical maps. It is shown that the distribution of amplitudes significantly depends on depth, has a complex spatial structure with a noticeable predominance of the amplitudes of baroclinic waves of the diurnal period and the main extrema located on the shelf opposite Cape Elizabeth, Okhinsky Isthmus and Cape Patience. The implemented approach to mapping the amplitudes of internal tides can be applied to other shelf areas of the seas of the Russian Federation and used for predictions of these phenomena, including engineering assessments for the design and operation of marine infrastructure.

*Keywords:* baroclinic waves, Euler equations, fully nonlinear model, Sea of Okhotsk