

УДК 551.466.7

© Б. А. Каган*, А. А. Тимофеев, 2023

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

*kagan.ba@spb.ocean.ru

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛУСУТОЧНОГО ПРИЛИВА M_2 В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ: ЕГО ДИНАМИКА И ЭНЕРГЕТИКА

Статья поступила в редакцию 13.12.2022, после доработки 21.04.2023, принята в печать 02.05.2023

Аннотация

В рамках высокоразрешающей версии трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4 воспроизведены поля динамических характеристик (амплитуды и фазы приливных колебаний уровня и эллипсов баротропной приливной скорости), отвечающих поверхностному полусуточному приливу M_2 в безлёдном Восточно-Сибирском море. Показано, что соответствующая приливная карта моря включает 4 реальные амфидромии левого вращения, обязанные своим существованием интерференции встречных прогрессивных волн Пуанкаре в южной части моря, 1 ложную амфидромию с центром на о. Новая Сибирь и 4 мелкомасштабные амфидромии, обусловленные интерференцией встречных волн Кельвина. Из них 3 образуются в узких проливах, расположенных в окрестности о-вов Большой и Малый Ляховский и 1 — на входе в Чаунскую губу. В свою очередь, баротропная приливная скорость в области максимума в северо-западной части моря достаточно высока (достигает нескольких десятков см/с), а за пределами максимума ее поле имеет полосчатую структуру, в которой баротропная скорость не превышает 10 см/с. Приводятся поля средних (за приливный цикл) интегральных по глубине составляющих бюджета баротропной приливной энергии (плотности энергии, ее адвективного переноса, горизонтального волнового потока и скорости диссипации за счет придонного трения). Сравнение модельных значений приливных колебаний уровня с данными его мареографных измерений приводит к заключению, что оценка их соответствия может быть признана удовлетворительной, учитывая сравнительно небольшие амплитуды прилива в море в целом.

Ключевые слова: моделирование; поверхностный полусуточный прилив; приливные колебания уровня и приливные скорости; бюджет баротропной приливной энергии; Восточно-Сибирское море

© Б. А. Каган*, А. А. Тимофеев, 2023

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

*kagan.ba@spb.ocean.ru

HIGH-RESOLVING MODELING OF THE SURFACE SEMIDIURNAL M_2 TIDE IN THE EAST-SIBERIAN SEA

Received 13.12.2022, Revised 21.04.2023, Accepted 02.05.2023

Abstract

In the framework of a high-resolving version of the 3D finite-element hydrostatic model QUODDY-4 we have simulated the fields of dynamic characteristics (amplitudes and phases of tidal elevations and barotropic tidal velocity ellipses) corresponding to the surface semidiurnal M_2 tide in the no-ice East-Siberian Sea. It is shown that the obtained tidal chart has a complex structure, determined by 4 real amphidromes of left rotation which are induced by interference of counter-coming progressive Poincare waves in the southern part of the sea, 1 fake amphidrome with the center upon the Novaya Sibir Isl. and 4 small-scale amphidromes caused by interference of counter-coming Kelvin waves, from which 3 are formed in the narrow straits in the region of Bolshoy and Maly Lyahovsky Isls. and 1 near the entrance of the Chaunskaya Guba. Tidal amplitudes in the vicinity of the Novaya Sibir Isl. achieve 20–30 cm, whereas in the remaining part of the sea they are comparatively small and do not exceed 5–10 cm. Accordingly, the field of barotropic tidal velocities in the north-western part of the sea basically consists of high values (they are tens of cm/s), but in the other parts of the sea barotropic velocities are small (lower than 10 cm/s) and their field has a band structure. The fields of the averaged (over a tidal cycle) integrated in depth constituents of the barotropic tidal energy budget (namely, the barotropic tidal

Ссылка для цитирования: Каган Б.А., Тимофеев А.А. Высокоразабрашающее моделирование поверхностного полусуточного прилива M_2 в Восточно-Сибирском море: его динамика и энергетика // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 2. С. 64–72. doi:10.59887/2073–6673.2023.16(2)-5

For citation: Kagan B.A., Timofeev A.A. High-Resolving Modeling of the Surface Semidiurnal M_2 Tide in the East-Siberian Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 2, 64–72. doi:10.59887/2073–6673.2023.16(2)-5

energy density, the advective transport and the horizontal wave flux per unit length of this energy and the rate of its dissipation due to the bottom friction) are presented. Also, a comparison of predicted tidal elevations with the mareographic level measurement data states that an estimate of their agreement may be considered as satisfactory taking into account that the tidal amplitudes in the sea as a whole are small.

Keywords: modeling, surface semidiurnal tide, surface tidal elevations, barotropic tidal velocities, barotropic tidal energy budget, the East-Siberian Sea

1. Введение

Еще до последнего этапа моделирования океанских приливов авторы работы [1] предприняли немалые усилия, чтобы восполнить наметившийся пробел в наших знаниях о поверхностном полусуточном приливе M_2 в Северном Ледовитом океане и, в частности, в Восточно-Сибирском море. Сведения о нем в то время были весьма ограниченными. Впоследствии их работа была продолжена в [2–4], в результате чего было установлено, что приливная карта названного моря включает от 2 до 4 амфидромий неизвестного происхождения и 1 ложную амфидромию с центром на о-вах Новая Сибирь и Котельный. Следует, однако, иметь в виду, что приведенные в [1–4] приливные карты моря, кроме представленной в [4], были получены с использованием низкоразрешающих моделей и потому нуждаются в ревизии в рамках моделей с более высоким разрешением. Учитывая сказанное, мы поступим следующим образом: во-первых, с помощью высокоразрешающей версии трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4 воспроизведем новую приливную карту моря, отвечающую гармонике M_2 поверхностного прилива, и попытаемся выяснить, адекватна ли она в смысле адекватности сложившихся представлений о ней. С этой целью уточним количество и происхождение амфидромий, содержащихся в ней, и сравним модельные значения амплитуд и фаз приливных колебаний уровня с данными мареографных измерений. Данные спутниковой альтиметрии уровня и *in situ* измерений скоростей приливных течений не приводятся из-за того, что первые из них оказались недостаточными, а вторые, как ни странно, — фактически отсутствующими. Во-вторых, выполним анализ остающихся совершенно неизученными полей средних (за приливный цикл) интегральных по глубине составляющих бюджета баротропной приливной энергии (плотности, адвективного переноса и горизонтального волнового потока этой энергии и скорости ее диссипации из-за придонного трения). Такова была двойная цель настоящего сообщения.

2. Модель QUODDY-4 в приближении однородного моря

Давно замечено, что поверхностные приливы в стратифицированном и однородном море мало отличаются друг от друга. Это обстоятельство послужило объяснением того, что при воспроизведении поверхностных приливов стратифицированное море можно заменить однородным. Мы не будем отказываться от этой традиции и при воспроизведении поверхностного полусуточного прилива M_2 в Восточно-Сибирском море воспользуемся высокоразрешающей версией трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4 в однородном приближении. Ее подробное описание дается в [5], и потому здесь, во избежание повторений, ограничимся только перечислением модельных уравнений в приближении однородного моря и разъяснением физических предпосылок, лежащих в основе некоторых граничных условий. В приближении однородного моря модель QUODDY-4 включает так называемое двумерное обобщенное уравнение неразрывности в волновой форме для возмущений уровня свободной поверхности моря, непреобразованные уравнения движения в приближении Буссинеска для горизонтальной скорости, эволюционные уравнения для характеристик турбулентности (кинетической энергии турбулентности (КЭТ) и масштаба турбулентности), трехмерное уравнение неразрывности, служащее для определения вертикальной скорости, уравнение гидростатики и соотношение приближенного подобия для коэффициента вертикальной турбулентной вязкости. После переноса членов, характеризующих эффекты адвекции и горизонтальной турбулентной диффузии импульса, на предыдущий шаг по времени упомянутые модельные уравнения решаются как система нестационарных одномерных (по вертикали) неоднородных дифференциальных уравнений.

Граничные условия для КЭТ на свободной поверхности моря и его дне (точнее, на ближайших к ним расчетных уровнях) задаются условием Дирихле, вытекающим из приближенного равенства между продукцией и диссипацией КЭТ при аппроксимации масштаба турбулентности законом стенки, условием, связывающим КЭТ с квадратом скорости трения. При оценке горизонтальной скорости на свободной поверхности моря вертикальный турбулентный поток импульса считается равным нулю, а на ближайшем ко дну расчетном уровне параметризуется квадратичным законом сопротивления с коэффициентом сопротивления, равным 5×10^{-3} . Вертикальная скорость на свободной поверхности моря, как обычно, определяется

кинематическим соотношением. Вертикальное перемешивание описывается 2,5-уровневой схемой турбулентного замыкания [6], коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии — формулой Смагоринского [7]. Остальные граничные условия и их параметры принимаются такими же, как в оригинальной версии модели [5].

Горизонтальное разрешение конечно-элементной сетки задается в среднем (по площади моря) равным 3,5 км. Соответственно, баротропный радиус деформации Россби, равный 219,9 км, дискретизируется посредством 63-х конечных элементов. Вводится отслеживающая топографию дна вертикальная координата с неравномерным распределением слоев по вертикали. Толща моря делится на 40 слоев переменной толщины, сгущающихся по мере приближения к свободной поверхности моря и его дну. Шаг по времени задается равным 11,2 с, необходимость выбора которого диктуется используемым способом решения модельных уравнений по вертикали (см. выше). Приливная частота полагается равной частоте гармоники M_2 поверхностного прилива, а приливные колебания уровня моря, выступающие здесь в качестве приливного форсинга, — совпадающими с полученными в высокоразрешающей арктической приливной модели [4], дополненной данными спутниковой альтиметрии.

Модельные уравнения интегрируются до выхода решения на квазипериодический режим, когда среднее (за приливный цикл и по площади моря) изменение интегральной по глубине плотности баротропной приливной энергии становится меньшим 0,2 %. Это условие выполняется по истечении 23-х приливных циклов после начального момента времени.

3. Результаты моделирования

Мы уже говорили о сложной структуре поверхностного полусуточного прилива M_2 в Восточно-Сибирском море. Судя по рис. 1, на котором представлена модельная приливная карта прилива M_2 , она определяется существованием 4 реальных амфидромий левого вращения в южной части моря, 1 ложной амфидромии с центром на о. Новая Сибирь и 4 мелкомасштабных амфидромий, 3 из которых располагаются к западу и югу от о-вов Большой и Малый Ляховский и 1 — на входе в Чаунскую губу. Четыре крупномасштабные амфидромии левого вращения своим происхождением обязаны интерференции встречных прогрессивных волн Пуанкаре в южной части моря, примыкающей к побережью материка и западному побережью о. Врангеля, мелкомасштабные — интерференции встречных волн Кельвина. Из них три образуются при интерференции названных волн Кельвина, распространяющихся вдоль узких проливов в окрестности указанных выше островов, четвертая — еще в одной узкости, вызванной существованием сравнительно узкого входа в Чаунскую губу. Отметим заметное увеличение амплитуд приливных колебаний уровня вблизи о. Новая Сибирь, достигающее здесь 20–30 см, и их небольшие значения в остальной части моря, не превышающие 5–10 см.

Та же особенность заметна также на рис. 2, на котором изображено модельное поле эллипсов баротропных приливных скоростей. Оно имеет своеобразный характер, связанный с существованием максимума скоростей в северо-западной части моря и полосчатой структуры на остальной акватории моря. Максимум скоростей содержит значения до нескольких десятков см/с, в других частях моря скорости невелики и близки к нулю. В этих областях структура насчитывает 4 полосы. Одна примыкает к северной открытой границе моря и содержит близкие к нулю скорости. К югу от нее находится зональная полоса, в которой баротропные скорости принимают умеренные значения. Дальше к югу можно видеть еще одну полосу, скорости в которой уменьшаются с увеличением расстояния на юг, и, наконец, в окрестности материка лежит четвертая полоса, в которой скорости обращаются в нуль. Особо следует выделить своего рода круговорот скорости вокруг о. Новая Сибирь и фрагменты такого круговорота вокруг о. Врангеля.

Приведем оценки средней квадратичной абсолютной векторной ошибки определения амплитуд и фаз приливных колебаний уровня. Для 10-ти пунктов мареографных измерений уровня в Восточно-Сибирском море она оказалась равной 4,1 см, т. е. всего лишь на 1,1 см большей, чем в модели [4], ассимилирующей весь имеющийся массив эмпирических данных о приливе в море, включая данные спутниковой альтиметрии. Для сравнения: та же ошибка в модели [1], которая, как и наша модель, не использует какую-либо процедуру ассимиляции данных, составляет 7,5 см. Как видно, ошибки определения приливных колебаний уровня в двух последних моделях отличаются друг от друга разительно. Предположительно, это может быть вызвано, помимо прочего, выбором разных пространственных разрешений.

Переходя к обсуждению полей энергетических характеристик (их определения приводятся в [8]), начнем с поля средней (за приливный цикл) интегральной по глубине плотности полной (кинетической + потенциальной) баротропной приливной энергии (рис. 3). Как и поле эллипсов баротропных скоростей, оно

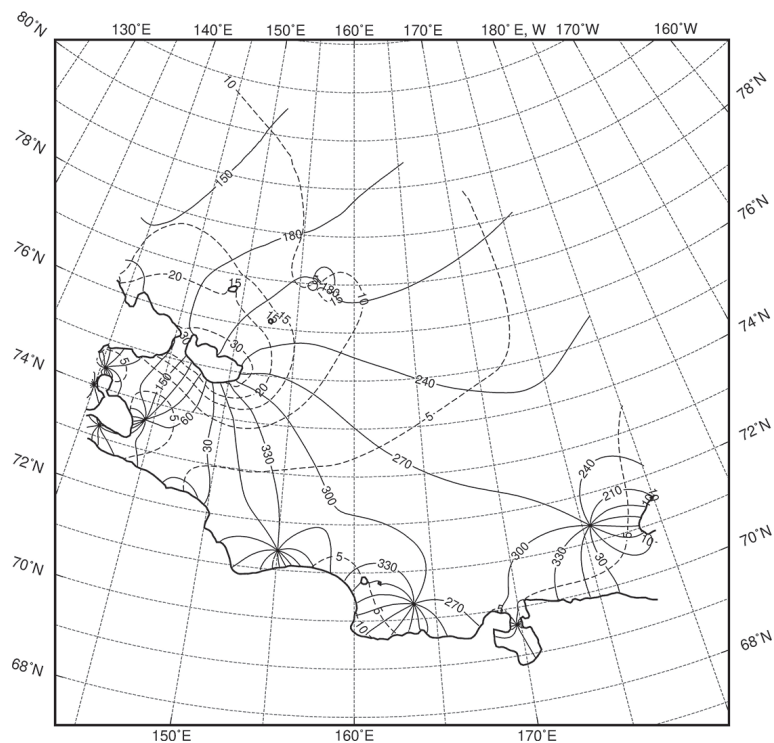


Рис. 1. Поле изоамплитуд (пунктир, см) и изофаз (сплошные линии, град.) приливных колебаний уровня, отвечающих гармонике M_2 в Восточно-Сибирском море

Fig. 1. Fields of isoamplitudes (dashed lines, cm) and isophases (solid lines, deg.) of tidal elevations for the M_2 harmonic in the East-Siberian Sea

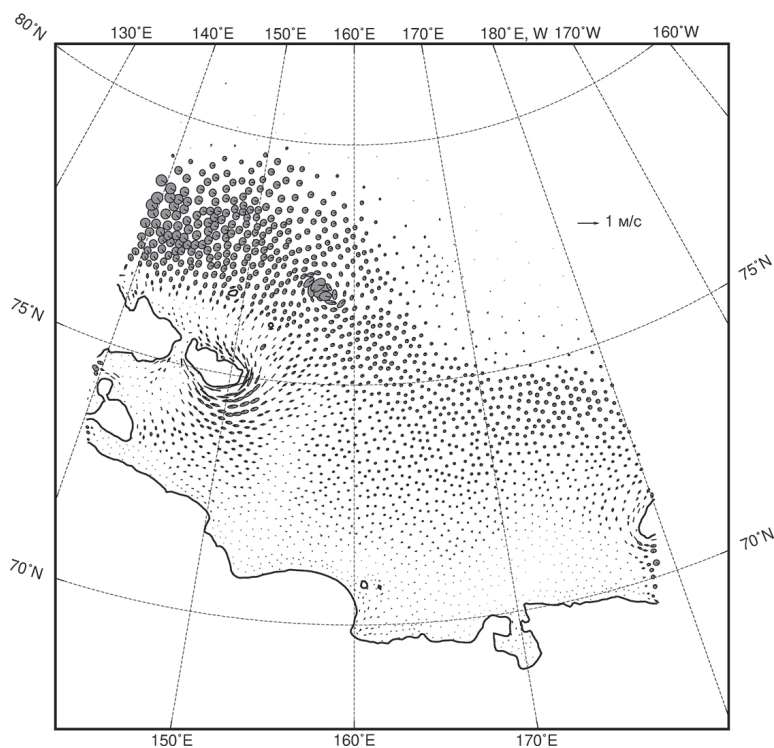


Рис. 2. Поле эллипсов баротропной приливной скорости в Восточно-Сибирском море. Штриховкой показаны эллипсы с вращением вектора скорости по часовой стрелке, без штриховки — против часовой стрелки

Fig. 2. Field of ellipses of the barotropic tidal velocities in the East-Siberian Sea. Ellipses with clockwise rotation of the velocity vector are shaded, with counterclockwise are not

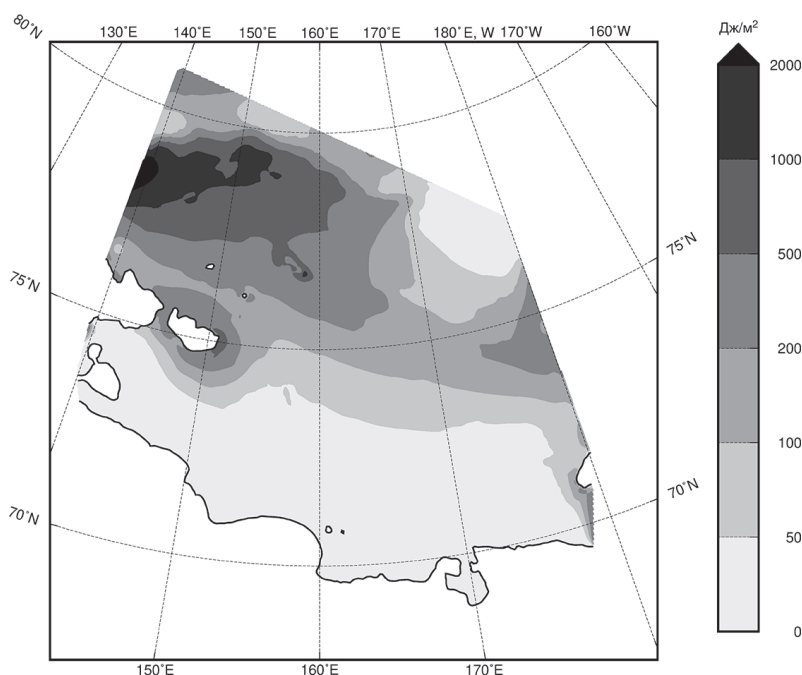


Рис. 3. Поле средней (за приливный цикл) интегральной по глубине плотности полной (кинетической + потенциальной) баротропной приливной энергии в Восточно-Сибирском море

Fig. 3. Field of the averaged (over a tidal cycle) integrated in depth total (kinetic + potential) barotropic tidal energy density in the East-Siberian Sea

обладает полосчатой структурой. В данном случае оно содержит три максимума. Один из них, более сильный, располагается в северо-западной части моря, другой — вокруг о. Новая Сибирь, третий — в окрестности центральной части восточной открытой границы моря. Подчеркнем систематическое уменьшение переменной по мере удаления от береговой линии островов, в результате чего очертания максимумов скорости вокруг о. Новая Сибирь и в окрестности восточной границы отдаленно напоминают по форме окружности. Обращает на себя внимание также заметное уменьшение переменной до 50 Дж/м^2 и меньше с приближением к береговой линии материка. Средняя (за приливный цикл и по площади моря) интегральная по глубине плотность баротропной приливной энергии составляет $102,6 \text{ Дж/м}^2$.

Согласно рис. 4, средний (за приливный цикл) интегральный по глубине адвективный перенос кинетической баротропной приливной энергии представляет собой сочетание отдельных так называемых круговоротов и разнонаправленных потоков этой энергии. Первые из них образуются вокруг о. Новая Сибирь, о-вов Большой и Малый Ляховский и о. Врангеля, а также в открытом море (к северу от м. Шелагского, Колымского побережья, Гусиной губы и в окрестности северо-западного максимума переменной). Хотелось бы отметить особо их ослабление с приближением северной открытой границы моря и береговой линии материка, а также четко выраженное ослабление разнонаправленных потоков.

Поле среднего (за приливный цикл) интегрального по глубине горизонтального волнового потока потенциальной баротропной приливной энергии (рис. 5) имеет более упорядоченную структуру, чем поле адвективного переноса (ср. рис. 4 и 5). Оба включают 3 максимума рассматриваемой переменной в северо-западной части моря, в области вокруг о. Новая Сибирь и в окрестности восточной открытой границы моря, но есть и отличие: поле первой более упорядоченно, чем второй. Это нетрудно видеть, сравнивая оба поля. Основная особенность касается организации горизонтального волнового потока, связанной с поступлением потока в море через северную и восточную открытые границы моря. Затем обе ветви потока распространяются на юго-запад, постепенно поворачивают на запад и проникают через западную открытую границу из Восточно-Сибирского моря в море Лаптевых. Обратим внимание также на несоизмеримость адвективного переноса и горизонтального волнового потока: второй из них на два порядка величины больше первого.

Поле средней (за приливный цикл) скорости диссипации баротропной приливной энергии за счет придонного трения в общем напоминает поле плотности баротропной приливной энергии в смысле существования

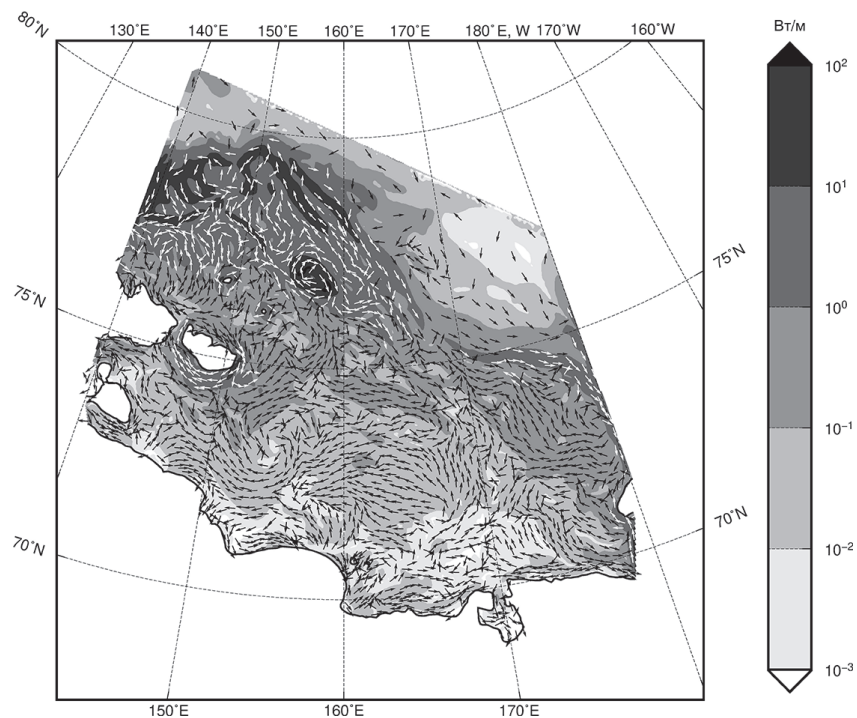


Рис. 4. Поле среднего (за приливный цикл) интегрального по глубине адвективного переноса кинетической баротропной энергии в Восточно-Сибирском море. Стрелками показаны направления переноса, оттенками серого цвета — абсолютные значения

Fig. 4. Field of the averaged (over a tidal cycle) integrated in depth advective transport of kinetic barotropic tidal energy in the East-Siberian Sea. Arrows indicate the transport direction, shades of gray — transport values

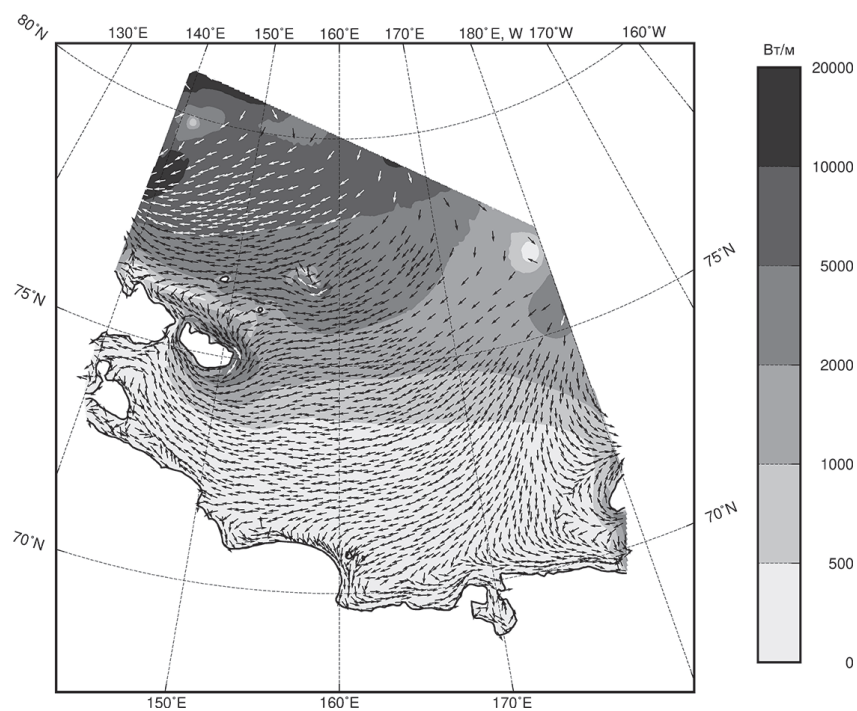


Рис. 5. Поле среднего (за приливный цикл) интегрального по глубине горизонтального волнового потока потенциальной баротропной приливной энергии в Восточно-Сибирском море. Пояснения см. на рис. 4

Fig. 5. Field of the averaged (over a tidal cycle) integrated in depth horizontal wave flux of potential barotropic tidal energy in the East-Siberian Sea. Explanations see in Fig. 4

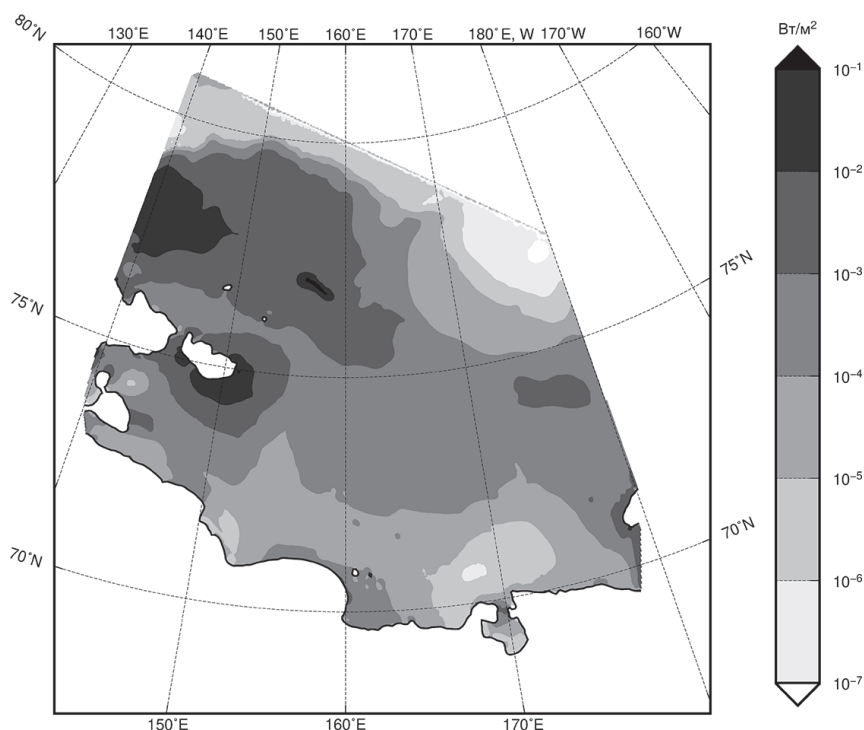


Рис. 6. Поле средней (за приливный цикл) скорости диссипации баротропной приливной энергии в Восточно-Сибирском море

Fig. 6. Field of the averaged (over a tidal cycle) dissipation rate of barotropic tidal energy in the East-Siberian Sea

3 максимумов переменных и полосчатой структуры за их пределами. В двух из них, упомянутых первыми, диссипация достигает 10^{-2} Вт/м², в третьем превышает 10^{-3} Вт/м². Примерно такое же изменение диссипации происходит в восточном направлении. В целом, полосчатая структура диссипации в открытом море проявляется достаточно отчетливо. В прибрежных районах материка диссипация равна 10^{-4} – 10^{-3} Вт/м² и меньше в основном из-за ослабления баротропных приливных скоростей. Средняя (за приливный цикл и по площади моря) скорость диссипации составляет $1,8 \times 10^{-3}$ Вт/м².

Теперь, располагая средними (в том же смысле) значениями плотности и скорости диссипации баротропной приливной энергии, можно оценить время диссипации, определяемое как отношение указанных переменных. Оно получилось равным 3 ч, т. е. примерно в 2 раза большим, чем в море Лаптевых [9]. Такое увеличение времени диссипации в Восточно-Сибирском море объясняется соответствующим уменьшением диссипации по сравнению с ее значением в море Лаптевых, вызванным ослаблением баротропных приливных скоростей в Восточно-Сибирском море.

4. Заключение

В рамках высокоразрешающей версии трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4 воспроизведены поля динамических и энергетических характеристик поверхностного полусуточного прилива M_2 в безледном Восточно-Сибирском море. Показано, что модельное поле изоамплитуд и изофаз приливных колебаний уровня имеет сложную структуру, включающую 4 реальные амфидромии левого вращения в южной части моря, вызванные интерференцией встречных прогрессивных волн Пуанкаре, 1 ложную амфидромию с центром на о. Новая Сибирь и 4 мелкомасштабные амфидромии, обязанные своим происхождением интерференции встречных волн Кельвина, распространяющихся вдоль узких проливов в районе о-вов Большой и Малый Ляховский и через вход в Чаунскую губу. Установлено заметное увеличение амплитуд приливных колебаний уровня (до 30 см) в окрестности о. Новая Сибирь, усиление баротропных приливных скоростей в северо-западной части моря и вблизи северной открытой границы моря, существование так называемых круговоротов скорости вокруг о-вов Новая Сибирь и Врангеля, вырождение эллипсов баротропных приливных скоростей в точки в восточной и центральной частях моря и особенно в окрестности береговой линии материка.

Приводится средняя квадратичная абсолютная векторная ошибка определения амплитуд и фаз приливных колебаний уровня, равная 4,1 см. Она сравнивается с результатами моделей [1, 4]. В модели [1], не использующей ассимиляцию эмпирических данных о приливе, ошибка составляет 7,5 см, в модели [4], включающей ее, — 3,0 см. Отсюда и из нашей модели следует, что согласие модельных оценок с данными наблюдений улучшается (ошибка будет меньше) как при ассимиляции данных наблюдений, так и при уменьшении пространственного разрешения. Последнее задается равным $10'$ в модели [1] и 5 км в модели [4]. Какой из названных способов предпочтительнее, судить рано. Об этом можно будет говорить, когда количество таких сравнений станет больше.

Описываются найденные впервые поля средних (за приливный цикл) интегральных по глубине составляющих бюджета баротропной приливной энергии (именно, плотности баротропной приливной энергии, адвективного переноса и горизонтального волнового потока этой энергии и скорости ее диссипации за счет придонного трения).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема FMWE-2021-0014).

Funding

This work was performed within the framework of the state assignment (theme FMWE-2021-0014).

Литература

1. Kowalik Z., Proshutinsky A. Yu. The Arctic Ocean tides // The Polar Oceans and their role in shaping the global environment. *Geophys. Monogr. Ser.*, Vol. 85, Eds. O.M. Johanessen et al., AGU, Washington, D.C. 1994. P. 137–158. doi:10.1029/GM085p0137
2. Прошутинский А.Ю. Полусуточные приливы Северного Ледовитого океана по результатам моделирования // Труды ААНИИ. 1993. Вып. 429. С. 29–44.
3. Поляков И.В., Дмитриев Н.Е. Прилив M_2 в Северном Ледовитом океане. Структура баротропного прилива // Метеорология и гидрология. 1994. № 1. С. 56–68.
4. Padman L., Erofeeva S. A barotropic reverse tidal model for the Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. L02303. doi:10.1029/2003GL019003
5. Ip J.T.C., Lynch D.R. QUODDY-3 User's Manual: Comprehensive coastal circulation simulation using finite elements: Nonlinear prognostic time-stepping model. Report Number NML-95-1, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, 1995, 46 p. URL: http://www-nml.dartmouth.edu/Publications/internal_reports/NML-95-1/95-1/Q3_3.ps
6. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. Vol. 20, No. 4. P. 851–875. doi:10.1029/RG020i004p00851
7. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // *Mon. Wea. Rev.* 1963. Vol. 91, No. 3. P. 99–164. doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
8. Каган Б.А., Тимофеев А.А. Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 4. С. 550–566.
9. Каган Б.А., Тимофеев А.А. Динамика и энергетика полусуточных приливов в море Лаптевых: результаты высококоразрешающего моделирования поверхностного прилива M_2 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 1. С. 15–23. doi:10.7868/S2073667320010025

References

1. Kowalik Z., Proshutinsky A. Yu. The Arctic Ocean tides. In: The Polar Oceans and their role in shaping the global environment. *Geophys. Monogr. Ser.*, Vol. 85, Eds. O.M. Johanessen et al., AGU, Washington, D.C. 1994, P. 137–158. doi:10.1029/GM085p0137. doi:10.1029/GM085p0137
2. Proshutinsky A. Yu. Semidiurnal tides in the Arctic Ocean from modeling results. *Trudy AANII*. 1993, 429, 29–44 (in Russian).
3. Polyakov I.V., Dmitriev N.E. M_2 tide in the Arctic Ocean: Structure of a barotropic tide. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 1994, 1, 56–68 (in Russian).
4. Padman L., Erofeeva S. A barotropic reverse tidal model for the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. 2004, 31(2), L02303. doi:10.1029/2003GL019003

5. *Ip J.T.C., Lynch D.R.* QUODDY-3 User's Manual: Comprehensive coastal circulation simulation using finite elements: Nonlinear prognostic time-stepping model. Report Number NML-95-1, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, 1995, 46 p. URL: http://www-nml.dartmouth.edu/Publications/internal_reports/NML-95-1/95-1/Q3_3.ps
6. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1982, 20(4), 851–875. doi:10.1029/RG020i004p00851
7. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations. *Mon. Wea. Rev.* 1963, 91(3), 99–164. doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099: GCEWTP>2.3.CO;2
8. *Kagan B.A., Timofeev A.A.* Dynamics and energetics of surface and internal semidiurnal tides in the White Sea. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2005, 41(4), 498–512.
9. *Kagan B.A., Timofeev A.A.* Dynamics and energetics of tides in the Laptev Sea: The results of high-resolving modeling of the surface semidiurnal tide M_2 . *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020, 13(1), 15–23. doi:10.7868/S2073667320010025 (in Russian)

Об авторах

КАГАН Борис Абрамович, РИНЦ Author ID: 1171, ORCID ID: 0000-0003-0637-3636,
Scopus Author ID: 7005584755, WoS ResearcherID: AAD-1931–2021, kagan.ba@spb.ocean.ru
ТИМОФЕЕВ Андрей Александрович, РИНЦ Author ID: 69284, ORCID ID: 0009-0009-3680-3220,
Scopus Author ID: 57208159130, WoS ResearcherID: AAB-4597–2021, timofeev.aa@spb.ocean.ru