

УДК 551.466.8

## ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУСУТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВНЫХ ВОЛН В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ: ИХ ДИНАМИКА И ЭНЕРГЕТИКА

© 2020 г. Б. А. Каган<sup>а</sup>, \*, А. А. Тимофеев<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Нахимовский проспект, 36, Москва, 117997 Россия

\*E-mail: kagan@ioras.nw.ru

\*\*E-mail: timofeev@ioras.nw.ru

Поступила в редакцию 29.08.2019 г.

После доработки 14.03.2020 г.

Принята к публикации 03.06.2020 г.

В рамках трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4 воспроизведены пространственные распределения динамических и энергетических характеристик внутренних приливных волн (ВПВ) в безледном море Лаптевых. Показано, что отличительной особенностью поля амплитуд ВПВ на глубине пикноклина является ограниченность площади с относительно высокими амплитудами ВПВ. Максимальные амплитуды ВПВ, достигающие 5 м и более, детектированы только в центральной части моря, в окрестности свала глубин, тогда как в западной и восточной частях моря амплитуды ВПВ не превышают 0.2 и 0.1 м соответственно. Как и амплитуды ВПВ, бароклинные скорости приливных течений выражены, главным образом, в центральной части моря и практически обращаются в нуль в западной и восточной частях. Отмечается присутствие зоны высоких бароклиновых скоростей вблизи северной открытой границы моря и усиление скоростей с приближением к побережью континента на устьевом участке р. Лена. Обсуждаются поля составляющих бюджета средней (за приливный цикл) интегральной по глубине бароклиновой приливной энергии. Средние по площади моря ее плотность, а также скорость преобразования и скорость диссипации бароклиновой приливной энергии равны соответственно  $1.2 \times 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>,  $-0.3 \times 10^{-3}$  и  $7.3 \times 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>. Отсюда следует, что время жизни ВПВ в море Лаптевых, определяемое как отношение средних значений плотности бароклиновой приливной энергии к скорости ее диссипации, составляет примерно 50 ч, т.е. время жизни ВПВ в море больше, чем продолжительность приливного цикла для гармоника  $M_2$ , в 4 раза.

**Ключевые слова:** амплитуды ВПВ, бароклинные составляющие скорости, компоненты бюджета бароклиновой приливной энергии, моделирование, море Лаптевых

DOI: 10.31857/S0002351520050041

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Какой бы удивительной ни показалась сложившаяся ситуация, но до сих пор внутренние приливные волны (ВПВ) в море Лаптевых остаются почти неизученными. Для подтверждения сказанного заметим, что нам не удалось найти ни одной публикации, которая была бы посвящена изучению ВПВ в море Лаптевых применительно как к результатам моделирования (особенно высокоразрешающим), так и к данным *in situ* измерений, кроме, пожалуй, [1] и [2]. В первой из этих работ была предпринята попытка доказать, что одним из возможных механизмов образования полыней (квазистационарных во времени и в пространстве участков открытой воды или моло-

дого льда) в море Лаптевых является интенсификация ВПВ. Для проверки этой гипотезы выполнялась серия численных экспериментов с использованием двумерной (в вертикальной плоскости) модели генерации ВПВ. Расчеты производились на меридиональном разрезе, расположенном приблизительно перпендикулярно к Ленской полынье, где уклоны дна между изобатами 20 и 30 м были наибольшими. Сами по себе ВПВ предполагались плоскими и распространяющимися по нормали к неровностям дна, а изменчивость параметров ВПВ в направлении нормали — много большей, чем по касательной к ним. Предполагалось также, что частота ВПВ в районе критической широты для приливной гармоника  $M_2$  близка к инерционной, вследствие чего ВПВ теряют

способность распространяться здесь как свободные волны и разрушаются (дезинтегрируются) в пакеты короткопериодных внутренних волн (КВВ). Принятые предположения, лежащие в основе двумерной модели генерации ВПВ, безусловно верны, что не исключает необходимости воспроизведения трехмерной структуры ВПВ, каковой она и является в действительности. Более того, имеются данные (см., например, [3]), свидетельствующие о том, что горизонтальный волновой поток бароклинной приливной энергии, контролирующей, помимо прочего, бюджет бароклинной приливной энергии, зависит от размерности модели, т.е. от того, является ли модель двумерной или трехмерной. Результаты численных экспериментов, полученные в рамках двумерной модели генерации ВПВ, показали, что их максимальные амплитуды на склоне дна составляют около 10 м, и что они сосредоточены в окрестности свала глубин. Предложенное авторами объяснение механизма образования волны выглядит правдоподобным, несмотря на отсутствие оценок последствий интенсификации ВПВ.

Кроме цитируемой выше, нам не известны публикации, проливающие свет на структуру динамики и энергетики ВПВ в море Лаптевых. Поэтому независимо от того, является ли интенсификация ВПВ достаточной или нет для разрушения ледяного покрова и образования полыней, наша цель состояла в том, чтобы воспроизвести ее, тем самым частично ликвидировав наметившийся пробел в наших знаниях о ВПВ в море Лаптевых, важных для понимания механизмов генерации глубинных вод, обладающих высокой плотностью, перемешивания, все еще остающегося недостаточно изученным, и формирования региональных климатов морских систем, каковой является море Лаптевых.

Мы уже говорили о том, что близость критической широты способствует потере ВПВ свойства их перемещения за пределами критической широты как свободных волн и их разрушению в пакеты нелинейных КВВ, свободно распространяющихся за пределами критической широты. Выбирая из всех КВВ, составляющих пакет, лидирующую из этих волн, авторы публикации [2] выяснили по данным SAR (Synthetic Aperture Radar) изображений, датированных маем-октябрем 2011 г., что очаги генерации КВВ располагаются, главным образом, выше критической широты на внешнем шельфе и в окрестности континентального склона. Они детектируются, в частности, в следующих четырех районах: к северо-западу от Арктического мыса, к востоку от о. Мал. Таймыр, к северо-западу от о. Котельный и на мелководном внутреннем шельфе к востоку от о. Бол. Бегичев, находящемся неподалеку от Хатангского залива. Основные отличия предсказаний, полученных в [1, 2], касаются направления

распространения КВВ: в [1] оно ориентировано в сторону открытого моря, в [2] — в обратном направлении. Единственный район, где направления распространения КВВ совпадают в обоих случаях, — тот из них, который расположен к востоку от Хатангского залива. Поэтому данную работу можно рассматривать в определенном смысле как пилотную в плане высокоразрешающего трехмерного моделирования ВПВ в море Лаптевых.

Из недавних экспериментальных исследований в море Лаптевых хотелось бы выделить микроструктурные измерения в районе критической широты, свидетельствующие о существовании коротких эпизодов (продолжительностью около 2 ч) усиления диссипации кинетической энергии турбулентности (КЭТ) в поверхностном и придонном пограничных слоях шельфовой зоны моря [4]. На их протяжении диссипация КЭТ была примерно на два порядка величины сильнее фоновой. Природа этих эпизодов пока не ясна. Не ясно также, существуют ли они, когда все три форсинга (ветровой, термохалинный и приливный) действуют одновременно, и вообще возможны ли они, если из трех перечисленных форсингов остаются любые два или даже один из них. Но это — совсем другая история.

## 2. ПАРАМЕТРЫ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ QUODDY-4 И ИСТОЧНИКИ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Документация модели и применяемые способы решения ее уравнений подробно изложены в [5]. Свойственные ей специфические особенности систематизированы в [6, 7]. Поэтому во избежание повторений мы ограничимся только перечислением параметров модели, используемых при ее реализации в море Лаптевых.

Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии рассчитываются по формуле Смагоринского [8], коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии — с помощью 2.5-уровневой схемы турбулентного замыкания, описанной в [9]. Придонное трение параметризуется квадратичным законом сопротивления с коэффициентом сопротивления  $5 \times 10^{-3}$ . Турбулентные потоки тепла и соли и характеристик турбулентности (КЭТ и масштаба турбулентности) на свободной поверхности моря задаются равными нулю. Такими же считаются потоки тепла и соли на дне моря. Характеристики турбулентности на дне моря находятся из условия локального баланса между продукцией и диссипацией КЭТ в придонном слое с учетом условия, что масштаб турбулентности в нем является линейной функцией расстояния от дна. Считается также, что морская поверхность свободна от льда, основанием чего следует считать тот факт, что

морской лед не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на поверхностные и внутренние приливы.

Далее, горизонтальное разрешение конечно-элементной сетки принимается в среднем по площади моря равным 3.2 км. В результате бароклинный радиус деформации Россби (или характерный масштаб внутренних волн Кельвина), равный в среднем в море 14.7 км, дискретизируется 4–5 конечными элементами. Вводится отслеживающая топографию дна вертикальная координата с неравномерным распределением слоев по вертикали. Толща моря делится на 40 слоев переменной протяженности по глубине, сгущающихся в поверхностном и придонном пограничных слоях. Шаг по времени задается равным 1.4 с. Необходимость выбора такого малого шага по времени диктуется решением эволюционных уравнений для скорости, температуры и солёности морской воды, а также характеристик турбулентности как систем нестационарных одномерных (по вертикали) неоднородных дифференциальных уравнений. Приливная частота и, соответственно, частота ВПВ полагаются равными частоте гармоники  $M_2$  приливного потенциала. Глубина заимствуется из банка данных ИВСаО, приливные колебания уровня на открытой границе моря, выступающие здесь в качестве приливного форсинга, – из высоко разрешающей арктической приливной модели [10], ассимилирующей всю имеющуюся на сегодняшний день эмпирическую информацию о приливах, включая данные спутниковой альтиметрии, полученные по программам TOPEX/Poseidon и ERS-1.

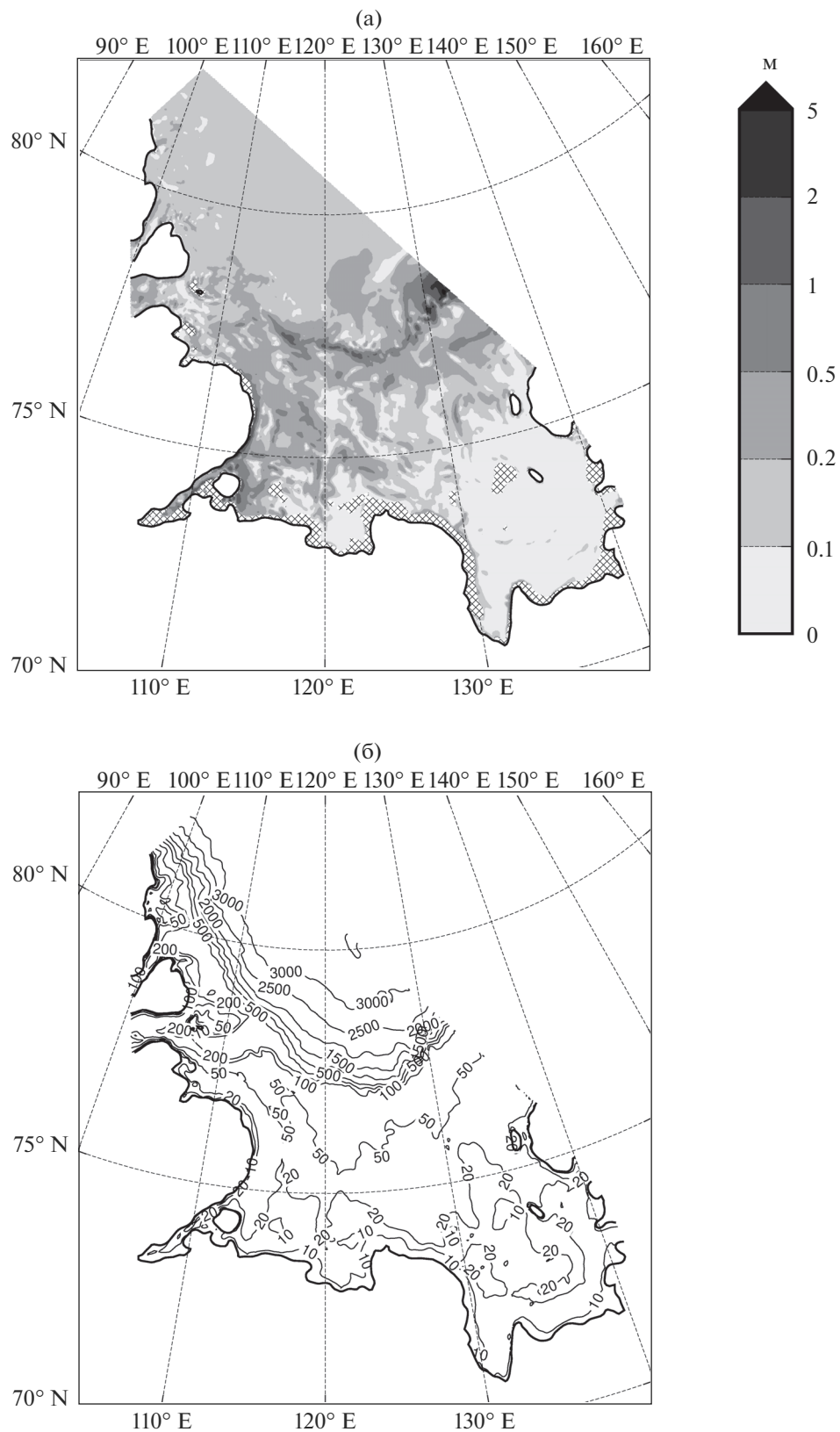
Средний (по площади моря) вертикальный профиль частоты плавучести определяется по данным *in situ* измерений температуры и солёности морской воды, систематизированным в цифровом атласе Арктики [11]. Вертикальный профиль используется для оценки глубины пикноклина, частоты плавучести на этой глубине и бароклинного радиуса деформации Россби, необходимых для моделирования в надежде понять, как горизонтальная изменчивость стратификации влияет на динамику и энергетику ВПВ в море. Для достижения поставленной цели были выполнены два численных эксперимента. В одном из них стратификация задавалась горизонтально-однородной, в другом – реалистичной (горизонтально-неоднородной). В результате выяснилось [7], что динамические характеристики ВПВ либо совсем не подвержены, либо подвержены весьма незначительным изменениям за счет горизонтальной структуры стратификации. Иное дело – энергетические характеристики ВПВ и, в частности, диссипация бароклинной приливной энергии. Переход от горизонтально-однородной стратификации к неоднородной сопровождается изменением локальной диссипации в диапазоне от 10

до 100 раз, причем диссипация может как ослабляться, так и усиливаться. Чтобы не привносить дополнительных усложнений, мы сочли возможным выбрать из двух рассматриваемых типов стратификации тот, который отвечает среднему по площади моря вертикальному профилю частоты плавучести. В этом случае средняя диссипация бароклинной приливной энергии получается несколько иной, чем при неоднородной по горизонтали (именно,  $8.2 \times 10^{-3}$  вместо  $5.5 \times 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>). Как видно, подобная замена типа стратификации приводит к отличиям средних по площади моря значений диссипации: они оказываются большими, но уже не такими большими по сравнению с локальными значениями диссипации. Это обстоятельство вместе со слабой зависимостью динамических характеристик ВПВ от горизонтальной изменчивости стратификации могут служить аргументом в пользу замены горизонтально-неоднородной стратификации однородной. Остальные параметры модели принимались такими же, как и в ее оригинальной версии.

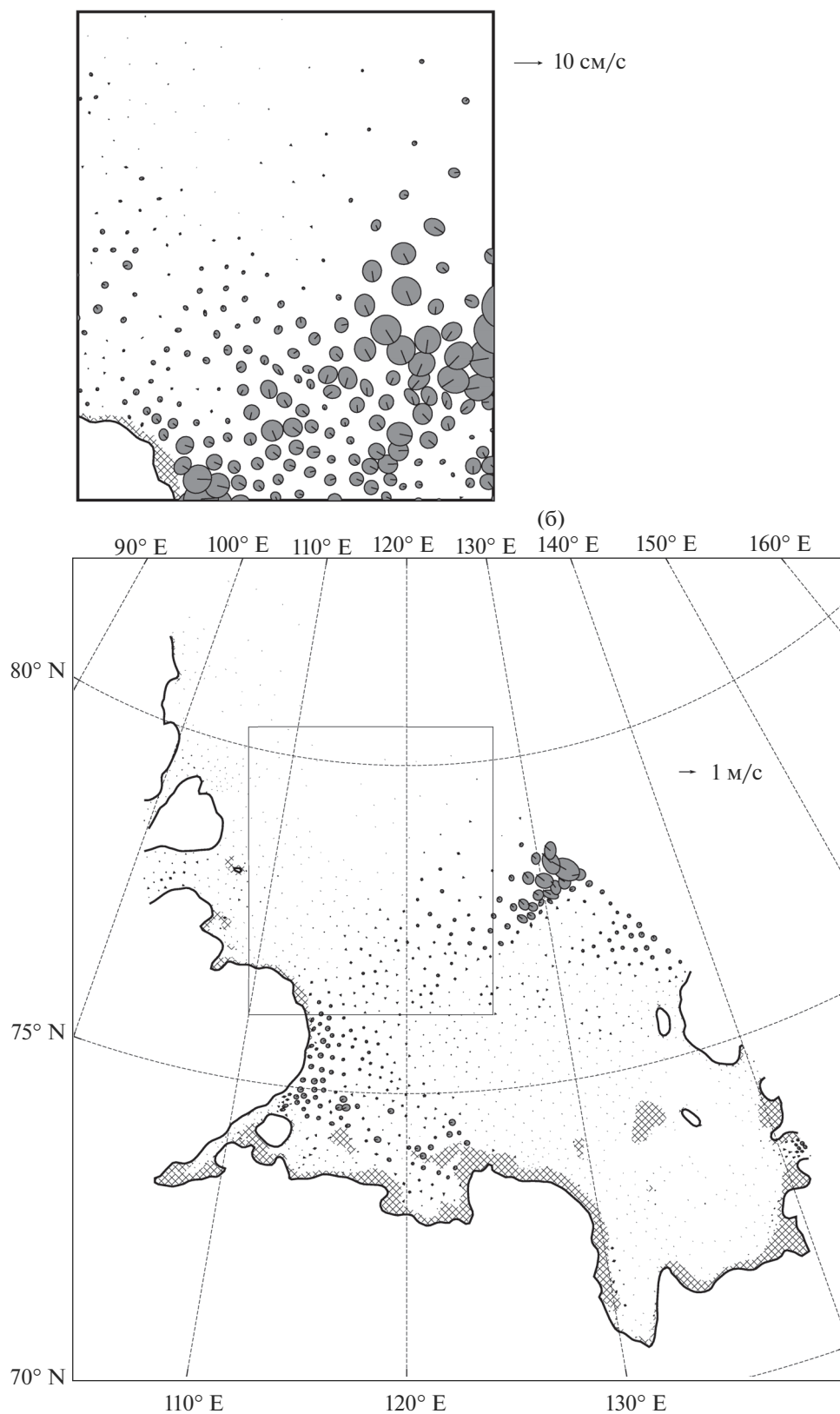
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Их обсуждение начнем с поля амплитуд ВПВ на глубине пикноклина (рис. 1а). Как видно, его характерной особенностью в море Лаптевых является ограниченность площади моря с относительно большими амплитудами. Эта площадь распространяется только на центральную часть моря к северо-востоку от Хатангского залива, где амплитуды ВПВ достигают 5 м и более. Напротив, в западной и восточной частях моря амплитуды ВПВ не превышают 0.2 и 0.1 м соответственно. Обращают на себя внимание еще следующие три особенности поля: во-первых, наличие больших амплитуд ВПВ в окрестности свала глубин и конечного участка северной открытой границы моря с максимальными перепадами глубин; во-вторых, быстрое вырождение ВПВ с удалением от очагов их генерации и, наконец, чередование в центральной части моря пятен с большими и малыми амплитудами ВПВ. Перечисленные особенности во многом отличают распространение ВПВ в море Лаптевых от его аналогов в других морях, и поэтому их можно считать специфическими.

Поле эллипсов бароклинной составляющей скорости приливного течения на глубине пикноклина, изображенное на рис. 2, в общем напоминает описанное выше. Как и поле амплитуд ВПВ, это поле содержит эллипсы в центральной части моря и исключает их (эллипсы вырождаются в точки из-за ослабления скоростей) в западной и восточной частях моря. Отметим в этой связи присутствие высоких скоростей вблизи участка северной открытой границы, где они достигают 1 м/с, а также тенденцию к уменьшению скоро-



**Рис. 1.** Поле амплитуд ВПВ на глубине пикноклина (а) и топография дна (б) в море Лаптевых. Штриховкой выделены подобласти, в которых глубина моря меньше глубины пикноклина. В среднем по площади моря последняя равна 10 м.



**Рис. 2.** Поле эллипсов бароклинной составляющей скорости приливного течения на глубине пикноклина в море Лаптевых. Заштрихованы эллипсы с вращением вектора скорости по часовой стрелке. На врезке дано поле бароклинной скорости в центральной части моря в увеличенном масштабе. Остальные пояснения см. на рис. 1.

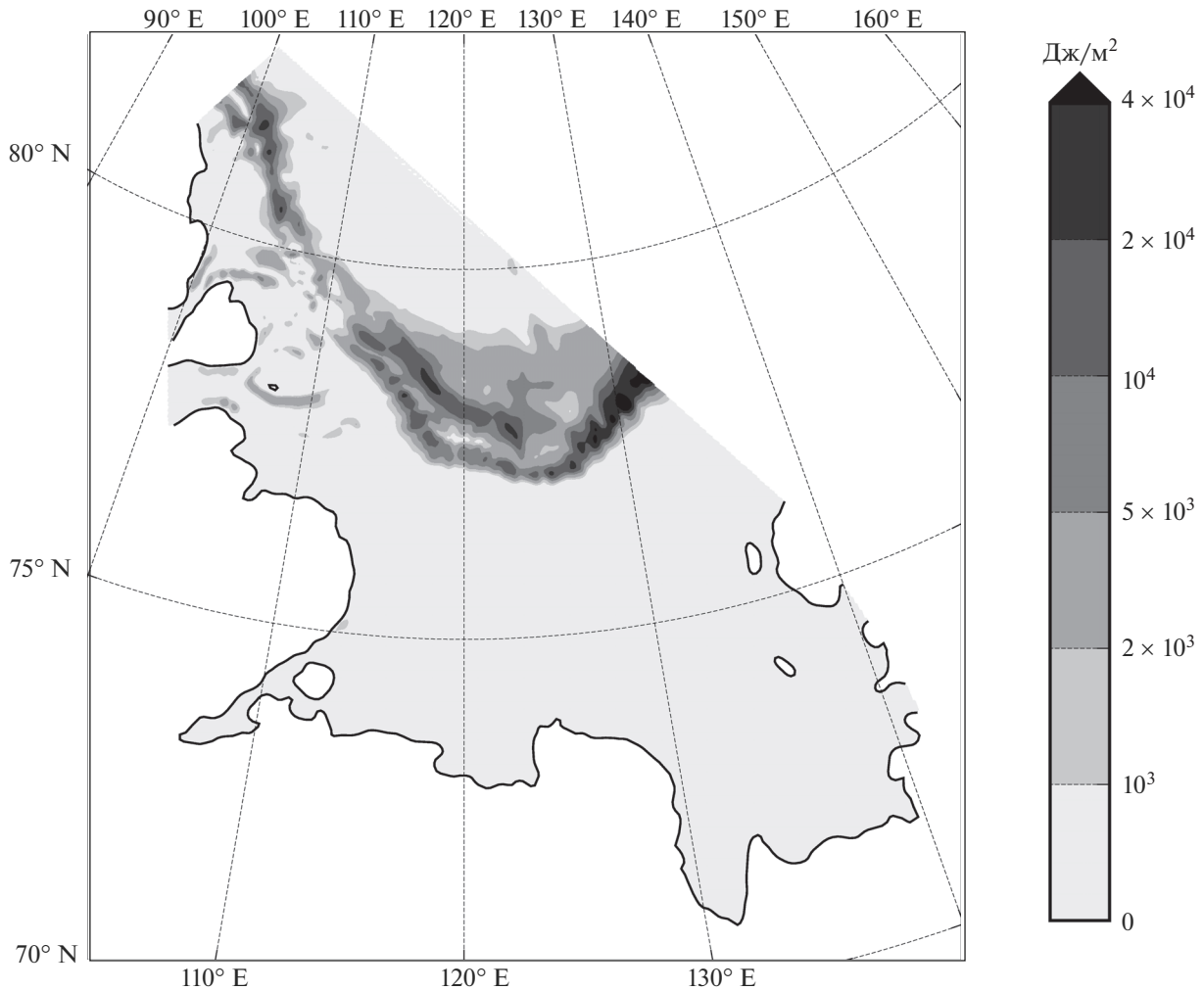
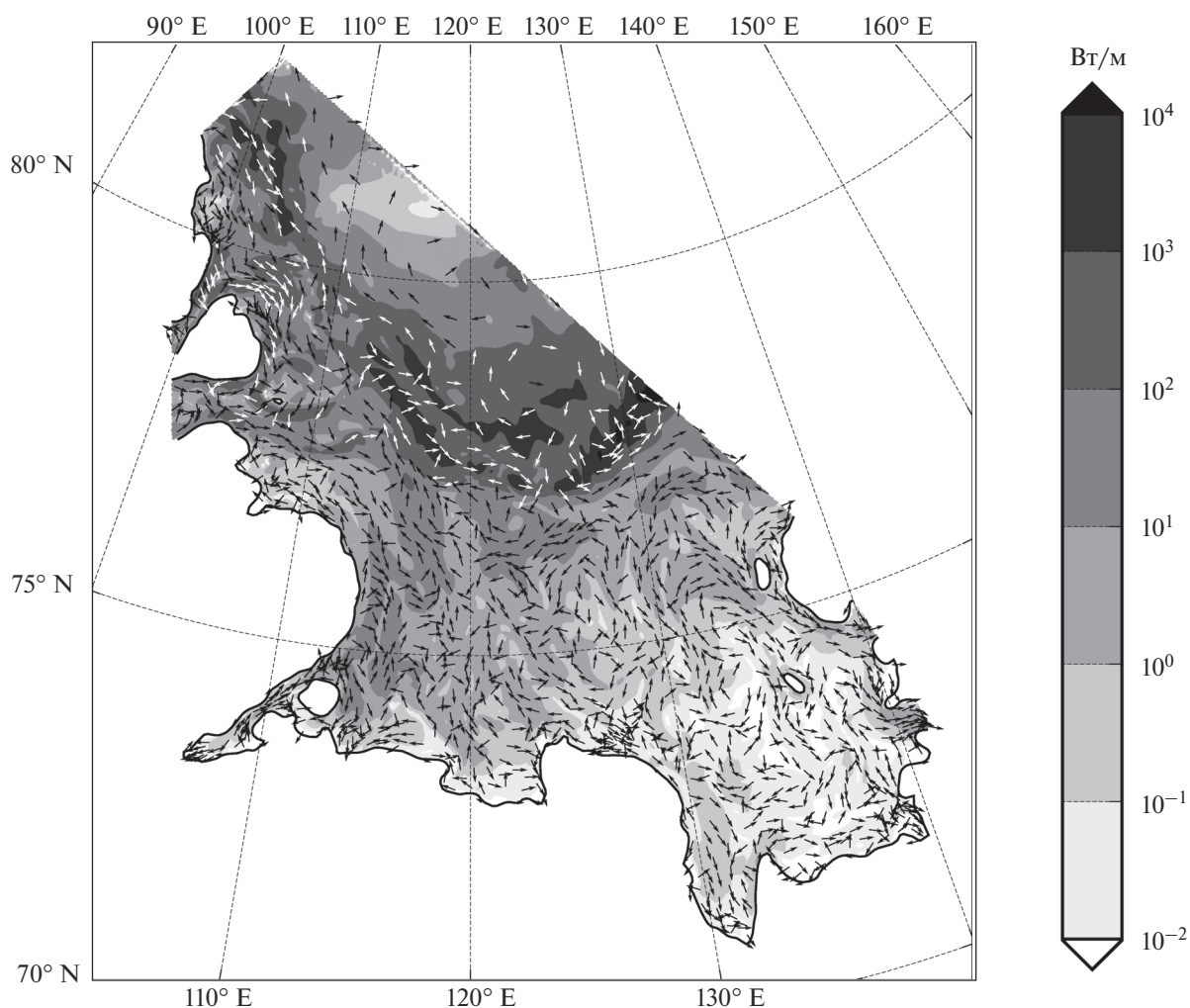


Рис. 3. Поле средней (за приливный цикл) интегральной по глубине плотности бароклинной приливной энергии.

стей на континентальном склоне и их увеличение с приближением к побережью континента вблизи устьев участка р. Лена. Заметим, кстати, что в полном соответствии с выводами, сделанными в [12], модель не предсказывает никакого заметного усиления бароклинной скорости в районе критической широты. Сказанное подтверждается отсутствием ограниченной области значительного повышения амплитуд ВПВ вблизи критической широты. Вместо нее из рис. 1 мы видим, что повышенные значения амплитуд охватывают преимущественно центральную часть моря от его северной открытой границы до береговой линии континента в меридиональном направлении и примерно от долготы 115 до 130°E в зональном. Это связано, по-видимому, с удержанием в уравнениях движения всех без исключения диффузионных членов, отвечающих за сглаживание любых неоднородностей в поле амплитуд, если они возникают, неоднородностей, имеющих хорошо выраженную пятнистую структуру и представля-

ющих собой чередование пятен с повышенными амплитудами и пятен с амплитудами, не превышающими 0.1 м.

Обсуждение энергетических характеристик ВПВ начнем со средней (за приливный цикл) интегральной по глубине плотности бароклинной приливной энергии (рис. 3). Как видно, указанный рисунок воспроизводит, помимо подобласти, находящейся в окрестности северной открытой границы моря, еще две с высокими значениями рассматриваемой переменной: одну в западной части моря, другую – в центральной. Вместе они объединяются в дугообразную область, простирающуюся от северной открытой границы моря до западной. Напомним, что в двух дополнительных подобластях высокие значения плотности бароклинной приливной энергии напрямую не связаны с усилением скорости на глубине пикноклина. В упомянутой области плотность бароклинной приливной энергии равна преимущественно



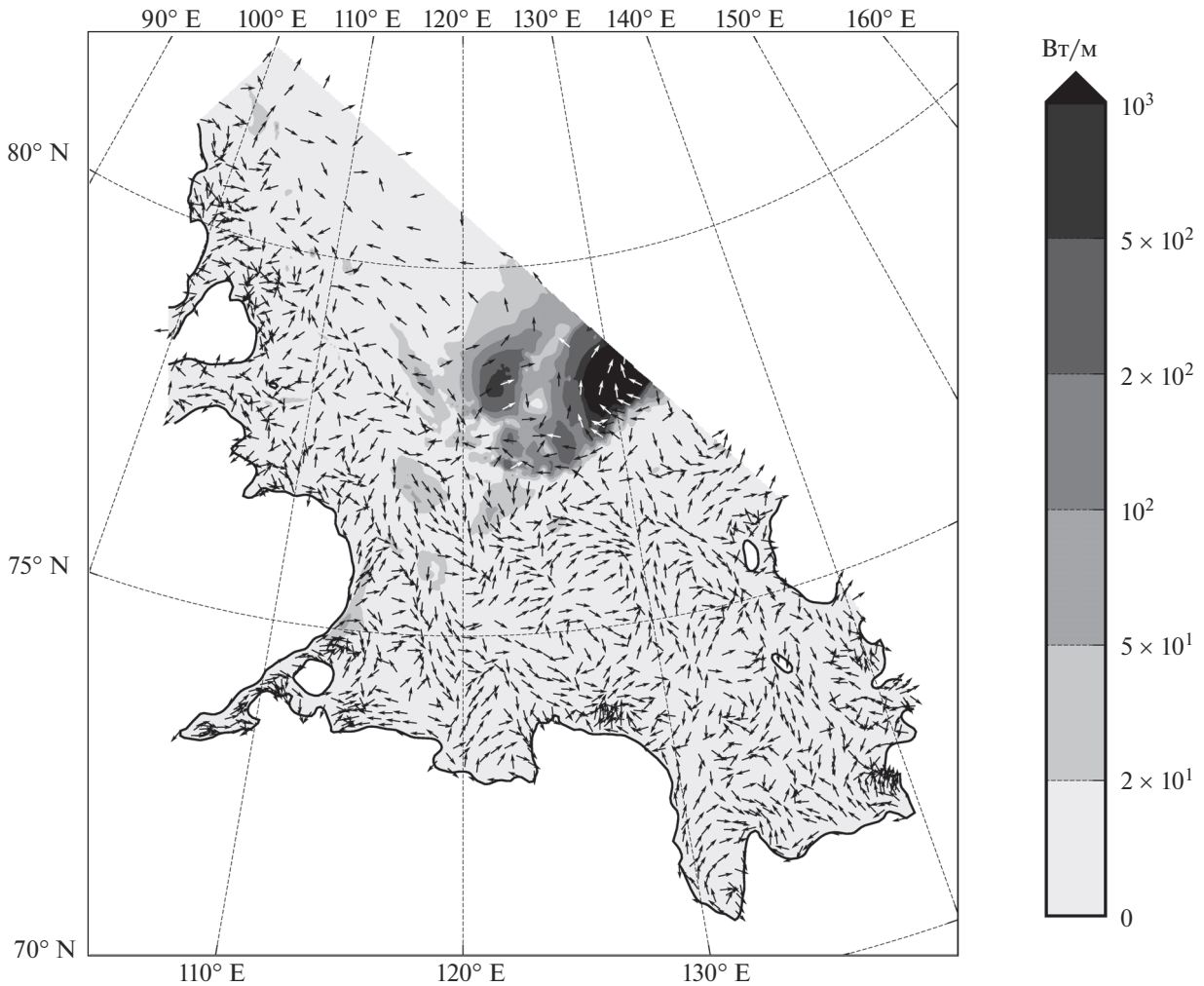
**Рис. 4.** Поле среднего (за приливный цикл) интегрального по глубине адвективного переноса кинетической бароклинной приливной энергии.

$(2...5) \times 10^3$  Дж/м<sup>2</sup> (ее верхнее предельное значение достигает  $4 \times 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>). Среднее по площади моря значение составляет  $1.2 \times 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>.

Поле среднего (за приливный цикл) интегрального по глубине адвективного переноса кинетической бароклинной приливной энергии (рис. 4) представляет собой сочетание отдельных круговоротов и разнонаправленных потоков вне их. Круговороты особенно часто проявляются в центральной и восточной частях моря (в частности, вокруг о-вов Бельковский, Столбовой и Бол. Бегичев), разнонаправленные потоки — на остальной акватории моря. Максимальные значения адвективного переноса составляют  $10^3...10^4$  Вт/м в центральной части моря, минимальные — в восточной, где они не превышают  $10^{-1}$  Вт/м.

Сочетание отдельных круговоротов и разнонаправленных потоков свойственно и полю среднего (за приливный цикл) интегрального по глубине горизонтального волнового потока потенциальной бароклинной приливной энергии (рис. 5). Единственное отличие его от поля адвективного переноса — вырождение круговоротов вокруг островов и усиление разнонаправленных потоков от  $(1...2) \times 10^2$  до  $10^3$  Вт/м, а в отдельных пятнах, разбросанных на периферии подобласти высоких (до 50 Вт/м) значений переменной, минимальные сосредоточены в западной и восточной частях моря, где они близки к 20 Вт/м.

В противовес рис. 3, на котором изображено поле средней (за приливный цикл) плотности бароклинной приливной энергии (оно является более или менее гладким), поле средней (за приливный цикл) скорости взаимного преобразования баротропной и бароклинной приливной энергии

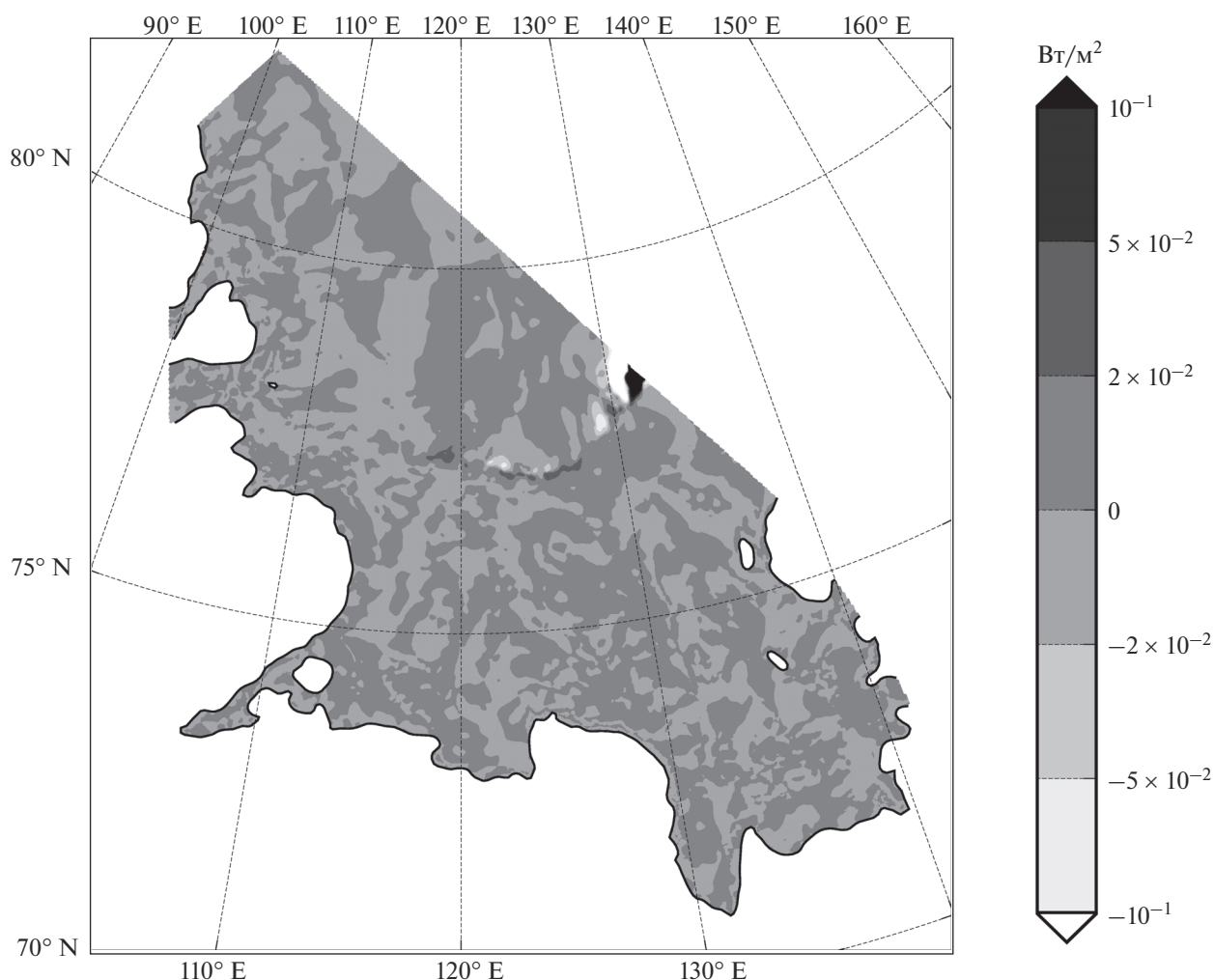


**Рис. 5.** Поле среднего (за приливный цикл) интегрального по глубине горизонтального волнового потока потенциальной бароклинной приливной энергии.

(рис. 6) имеет хорошо выраженную пятнистую структуру с преобладающими значениями скорости преобразования в пределах  $\pm 0.02 \text{ Вт/м}^2$ . Здесь и ниже знак “+” отвечает переходу баротропной приливной энергии в бароклинную, знак “-” – в обратном направлении. При усреднении по площади моря эти преобразования, очевидно, частично компенсируются. Иначе трудно было бы объяснить, почему мала средняя (по площади моря) скорость преобразования бароклинной энергии в баротропную (она равна  $-0.3 \times 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ ), тогда как локальные значения скорости преобразования в экстремальных случаях могут превышать  $\pm 0.10 \text{ Вт/м}^2$ . Положительные экстремальные значения скорости преобразования энергии приходятся на окрестности северной открытой границы моря, отрицательные – на районы южнее и западнее от нее.

Для скорости диссипации бароклинной приливной энергии (рис. 7) свойственны сглаженное поле в западной и центральной частях моря и пятнистая структура в восточной. Преимущественные значения скорости диссипации варьируют в диапазоне от  $10^{-5}$  до  $10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ , максимум скорости диссипации составляет  $0.10 \text{ Вт/м}^2$ , минимум –  $10^{-6} \text{ Вт/м}^2$ . Сравнивая теперь значения средних скоростей диссипации и преобразования бароклинной приливной энергии в баротропную, видим, что они несоизмеримы друг с другом: первая много больше второй по модулю (точнее, в 25 раз), и последнюю оправданно игнорировать по сравнению с первой. Мы поступим так в дальнейшем при оценке времени жизни ВПВ в море Лаптевых, а сейчас вернемся к обсуждаемой теме и заметим, что средняя скорость преобразования приливной энергии получается меньшей, чем ее локальные значения, почти на два порядка вели-





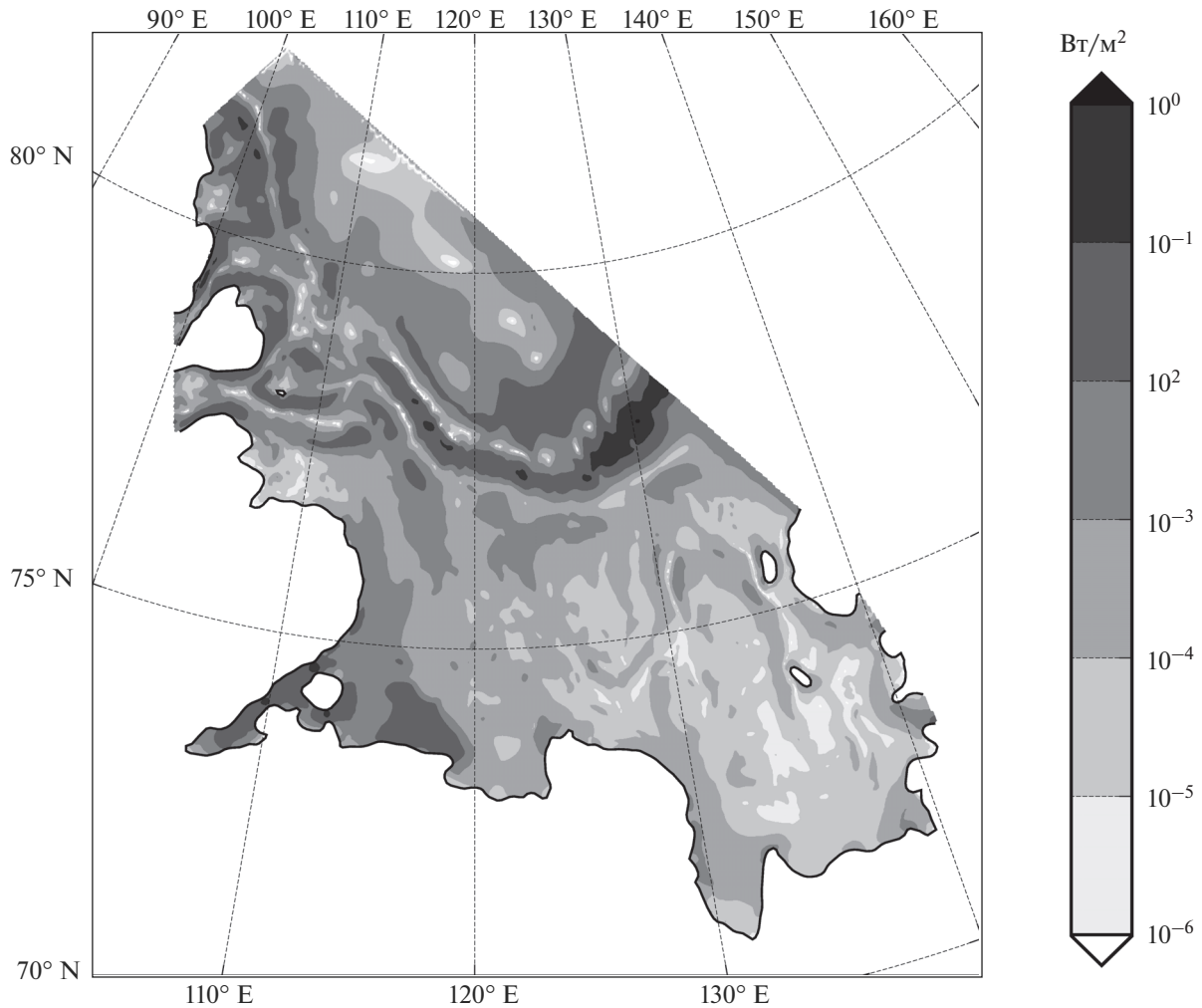
**Рис. 6.** Поле средней (за приливный цикл) скорости взаимного преобразования баротропной и бароклинной приливной энергии.

чины, тем самым означая, что она является малой разностью больших величин. Таким образом, окончательно получаем, что средние (за приливный цикл и по площади моря) значения скорости преобразования и скорости диссипации бароклинной приливной энергии равны  $-0.3 \times 10^{-3}$  и  $7.3 \times 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно. И еще одно напоминание. Обе приведенные цифры, как уже отмечалось выше, имеют разный смысл. Обращаясь к первой из них, характеризующей среднюю (за приливный цикл и по площади моря) скорость взаимного преобразования различных форм приливной энергии, заметим, что, если, как в данном случае, для определения параметров (амплитуд и фаз) полусуточных колебаний скорости приливного течения полученное решение подвергнуть гармоническому анализу, выделив приливные колебания и квазистационарную остаточную приливную составляющую скорости, обязанную

своим происхождением нелинейным взаимодействиям приливных колебаний с одинаковыми частотами, то при использовании неравномерных сеток и отсутствии приливного форсинга конечные значения скорости преобразования энергии связаны с невозможностью распространения полезного сигнала с одной и той же скоростью на сетках с разным горизонтальным разрешением [13]. Наоборот, при наличии приливного форсинга и прочих равных условиях они обусловлены тем же обстоятельством и связанными с ним ошибками определения квазистационарной остаточной приливной скорости.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя трехмерную конечно-элементную гидростатическую модель QUODDY-4, мы воспроизвели пространственные распределения динамических и энергетических характеристик ВПВ



**Рис. 7.** Поле средней (за приливный цикл) скорости диссипации бароклининой приливной энергии за счет придонного трения.

на глубине пикноклина в безледном море Лаптевых. Выяснилось, что специфической особенностью поля амплитуд ВПВ является ограниченность площади моря с относительно высокими амплитудами ВПВ: максимальные амплитуды, достигающие 5 м и более, детектируются в центральной части моря, в окрестности свала глубин (ср. рис. 1а и 1б), минимальные, как правило не превышающие 0.2 и 0.1 м соответственно, – в западной и восточной частях моря. Как и амплитуды ВПВ, бароклининая скорость отчетливо проявляется в центральной части моря и, по существу, вырождается, стремясь к нулю, в западной и восточной. Выявлена зона высоких бароклининых скоростей в дугообразной области, протянувшейся от северной открытой границы моря через центральную часть моря до западной подобласти. Отмечается усиление бароклининой скорости с при-

ближением к берегу континента и в окрестности устьевых участка р. Лена.

Обсуждаются модельные поля составляющих бюджета бароклининой приливной энергии, в том числе средней (за приливный цикл) интегральной по глубине плотности бароклининой приливной энергии. Поле этой характеристики является сравнительно гладким, включающим подобласти повышенных значений вблизи северной открытой границы моря, в центральной части и у западной открытой границы моря.

Средний (за приливный цикл) интегральный по глубине адвективный перенос кинетической бароклининой приливной энергии и средний (в том же смысле) интегральный по глубине горизонтальный волновой поток потенциальной бароклининой приливной энергии, напротив, характеризуются сочетанием отдельных круговоротов и разнонаправленных потоков вне их, а скорость

взаимного преобразования различных форм приливной энергии – пятнистыми структурами с чередованием пятен повышенных и пониженных значений переменной. Средние (по площади моря) значения плотности бароклинной приливной энергии, а также скорости ее преобразования и скорости диссипации составляют  $1.2 \times 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>,  $-0.3 \times 10^{-3}$  и  $7.3 \times 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Отсюда следует, что время жизни ВПВ в безледном море Лаптевых, определяемое с учетом несоизмеримости обоих стоков бароклинной приливной энергии как отношение средних (за приливный цикл и по площади моря) значений интегральной по глубине плотности бароклинной приливной энергии к скорости ее диссипации за счет придонного трения, равно приблизительно 50 ч, т.е. в 4 раза больше, чем продолжительность приливного цикла для гармоники M<sub>2</sub>. Эта оценка совпадает с полученной в [14].

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема 0149-2019-0015).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Е.Г., Писарев С.В. Внутренние волны и образование полыней в море Лаптевых // Докл. АН. 2004. Т. 397. № 3. С. 1–4.
2. Kozlov I.E., Zubkova E.V., Kudryavtsev V.N. Internal solitary waves in the Laptev Sea: First results of spaceborne SAR observations // IEEE Geoscience. Remote Sensing Lett. 2019 (accepted).
3. 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.
4. Janout M.A., Lenn Y.-D. Semidiurnal tides on the Laptev Sea shelf with implications for shear and vertical mixing // J. Phys. Oceanogr. 2014. V. 44. № 1. P. 202–219.
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. [http://www-nml.dartmouth.edu/Publications/internal\\_reports/NML-95-1/95-1/Q3\\_3.ps](http://www-nml.dartmouth.edu/Publications/internal_reports/NML-95-1/95-1/Q3_3.ps)
6. Каган Б.А., Тимофеев А.А. Моделирование поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Карском море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 265–275.
7. Каган Б.А., Софьина Е.В., Тимофеев А.А. Влияние горизонтальной неоднородности стратификации на внутренние приливы и индуцируемую ими диапикническую диффузию в безледном Карском море // Океанология. 2020 (в печати).
8. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // Month. Weather Rev. 1963. V. 91. № 3. P. 99–164.
9. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20. № 4. P. 851–875.
10. Padman L., Erofeeva S. A barotropic reverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L02303, <https://doi.org/10.1029/2003GL019003>
11. Environmental Working Group Joint US-Russian Atlas of the Arctic Ocean, Version 1. Oceanography Atlas for the summer period / Ed. by Tanis E., Timokhov L. Boulder, Colorado USA. NSIDC. 1997. <https://doi.org/10.7265/N5H12ZX4>
12. Каган Б.А., Софьина Е.В., Тимофеев А.А. Критическая широта в динамике приливов на примере Карского моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 232–238.
13. Каллен М.Дж.П. Метод конечных элементов. В кн. “Численные методы, используемые в атмосферных моделях” (пер. с англ. под ред. В.П. Садокова). Л.: Гидрометеиздат. 1982. С. 215–244.
14. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A. Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. № 12. P. 2774–2791.

## High-Resolving Modeling of the M<sub>2</sub> Internal Tidal Waves in the No-Ice Laptev Sea: Their Dynamics and Energetics

B. A. Kagan<sup>1</sup>, \* and A. A. Timofeev<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Nahimovsky pr., 36, Moscow, 117997 Russia

\*e-mail: kagan@ioras.nw.ru

\*\*e-mail: timofeev@ioras.nw.ru

The spatial distributions of the ITW dynamic and energetic characteristics in the no-ice Laptev Sea have been simulated in the framework of the 3D finite-element hydrostatic model QUODDY-4. It is shown that a distinctive feature of ITW amplitudes at the pycnocline depth is boundedness of the area where comparatively high ITW amplitudes occur. These amplitudes are detected in the central part of the sea where they are equal to 5 m or greater. Whereas, in the western and the eastern parts of the sea the ITW amplitudes do not exceed 0.2 and 0.1 m, respectively. As the ITW amplitudes, the baroclinic tidal velocities are only expressed in the

central part of the sea and, in essence, vanish in the western and eastern parts. A zone with the high values of the baroclinic tidal velocities in the vicinity of the northern open boundary is revealed. These velocities increase as we approach the continental coast in the Lena river's mouth. The fields of the averaged (over a tidal cycle) baroclinic tidal energy budget are discussed. The averaged (over a tidal cycle and the sea area) values of the density of baroclinic tidal energy as well as the tidal energy conversion and dissipation rates are  $1.2 \times 10^3 \text{ J/m}^2$ ,  $-0.3 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$  and  $7.3 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ , respectively. With allowance made for incommensurability of the latter two of them the ITW lifetime, defined as the ratio of the average density of baroclinic tidal energy to the dissipation rate, is about 50 h, i.e. the ITW lifetime in the Laptev Sea is 4 times greater than the tidal cycle duration for the  $M_2$  tidal harmonic.

**Keywords:** ITW amplitudes, baroclinic velocity, baroclinic tidal energy budget, modeling, Laptev Sea