

УДК 551.466.7

© Б. А. Каган, А. А. Тимофеев

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

kagan@ioras.nw.ru, timofeev@ioras.nw.ru

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОЛУСУТОЧНЫХ ПРИЛИВОВ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ

Статья поступила в редакцию 03.10.2016, после доработки 02.02.2017.

Цель работы состоит в изучении взаимодействия поверхностных полусуточных приливов в системе Баренцева и Карского морей и области его влияния. Для достижения этой цели используется трехмерная конечно-элементная гидростатическая модель QUODDY-4. С ее помощью выполнены два численных эксперимента. В первом из них считается, что приливы в Баренцевом и Карском морях свободно взаимодействуют друг с другом, во втором — что взаимодействия приливов в этих морях нет (на открытой границе между ними ставится непроницаемая твердая стенка, предотвращающая горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии от одного моря к другому). Установлено, что взаимодействие приливов не приводит к качественной перестройке их пространственной структуры, хотя количественные изменения последней проявляются достаточно заметно. Область взаимодействия приливов охватывает только северо-восточную часть Баренцева моря, тогда как за ее пределами усредненная (за приливный цикл) средняя квадратическая абсолютная векторная разность приливных колебаний уровня, полученных с учетом и без учета взаимодействия приливов, почти всюду меньше соответствующей погрешности предвычисления приливов, т.е. она находится в шуме модели.

Ключевые слова: взаимодействие приливов, моделирование, трехмерная конечно-элементная гидростатическая модель QUODDY-4, Баренцево море, Карское море.

B. A. Kagan, A. A. Timofeev

Saint-Petersburg Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Russia

INTERACTION OF THE SURFACE SEMIDIURNAL TIDES IN THE BARENTS AND KARA SEAS

Received 03.10.2016, in final form 02.02.2017.

A purpose of the work is to study the interaction between surface semidiurnal tides in the system of the Barents and Kara Seas. Using the 3D finite-element hydrostatic model QUODDY-4, we have carried out two numerical experiments. In the first of them it is assumed that the tides in the Barents and Kara Seas are free to interact with each other, whereas in the second one it is supposed that there is no interaction of tides in these seas (an impervious rigid wall, that prevents a horizontal wave flux of barotropic tidal energy between the seas, is placed here). It is shown that the tidal interaction does not lead to a qualitative reorganization of their spatial structure, although its quantitative changes are noticeable. An interaction domain covers the north-eastern part of the Barents Sea only, while outside this domain the averaged (over a tidal cycle) rms absolute vector difference between the tidal sea elevations obtained with and without tidal interaction is almost everywhere less than the corresponding error of the tidal predictions, thereby indicating that it lies in the model noise.

Key words: tidal interaction, modeling, 3D finite-element hydrostatic model QUODDY-4, Barents and Kara Seas.

Одной из первых книг, посвященных изучению взаимодействия приливов и его составного элемента — их интерференции, была книга [1]. В ней отмечалось, что баренцевоморская приливная волна, перемещаясь на север вдоль западного побережья о-вов Новая Земля, взаимодействует еще с одной приливной волной, распространяющейся через Карское море из района ее генерации в Центральной

Ссылка для цитирования: Каган Б. А., Тимофеев А. А. Взаимодействие поверхностных полусуточных приливов в Баренцевом и Карском морях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 1. С. 5—10.

For citation: Kagan B. A., Timofeev A. A. Interaction of the surface semidiurnal tides in the Barents and Kara Seas. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2017, 10, 1, 5—10.

DOI: 10.7868/S2073667317010014.

Арктике, тем самым оказывая непосредственное влияние на формирование пространственной структуры прилива в Карском море. К сожалению, из-за недостаточности сведений о приливах в арктических морях авторам книги пришлось предположить, что взаимодействие баренцевоморской приливной волны с приливной волной из Центральной Арктики происходит в пределах всей ширины прол. Макарова. Так иногда называют область между арх. Земля Франца-Иосифа и о-вами Новая Земля. Как дань традиции, мы будем именовать ее прол. Макарова, чтобы немного сократить текст.

Другие сведения о взаимодействии приливов следовали из [2]. В цитируемой статье обсуждались результаты моделирования, полученные в рамках высокоразрешающей трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4 применительно к системе Баренцева и Карского морей. На основании этих результатов было показано, что средний (за приливный цикл) полусуточный горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии, могущий служить количественной мерой интенсивности взаимодействия приливов в том смысле, что этот перенос, как и взаимодействие приливов, обращается в нуль, если взаимодействия приливов нет (пролив перекрыт непроницаемой стенкой), и отличаются от нуля в противном случае, вносит свой вклад в бюджет баротропной приливной энергии Карского моря только в узкой прибрежной полосе, окаймляющей северную оконечность о-вов Новая Земля. В остальной части ширины прол. Макарова горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии в среднем за приливный цикл направлен из Карского моря в Баренцево (рис. 1). Однако изменения вдоль ширины пролива коснулись не только направления, но и величины среднего (за приливный цикл) полусуточного горизонтального волнового переноса баротропной приливной энергии: она составляет 0.35 ГВт при ориентации переноса из Баренцева моря в Карское и 2.15 ГВт в обратном направлении. Иначе говоря, полусуточный горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии из Баренцева моря в Карское в среднем за приливный цикл в 6 раз меньше, чем из Карского моря в Баренцево.

Важно знать, каковы последствия взаимодействия полусуточных приливов в соседних бассейнах, и где они проявляются наиболее заметно. Мало того, поскольку ответы на эти вопросы обеспечивают

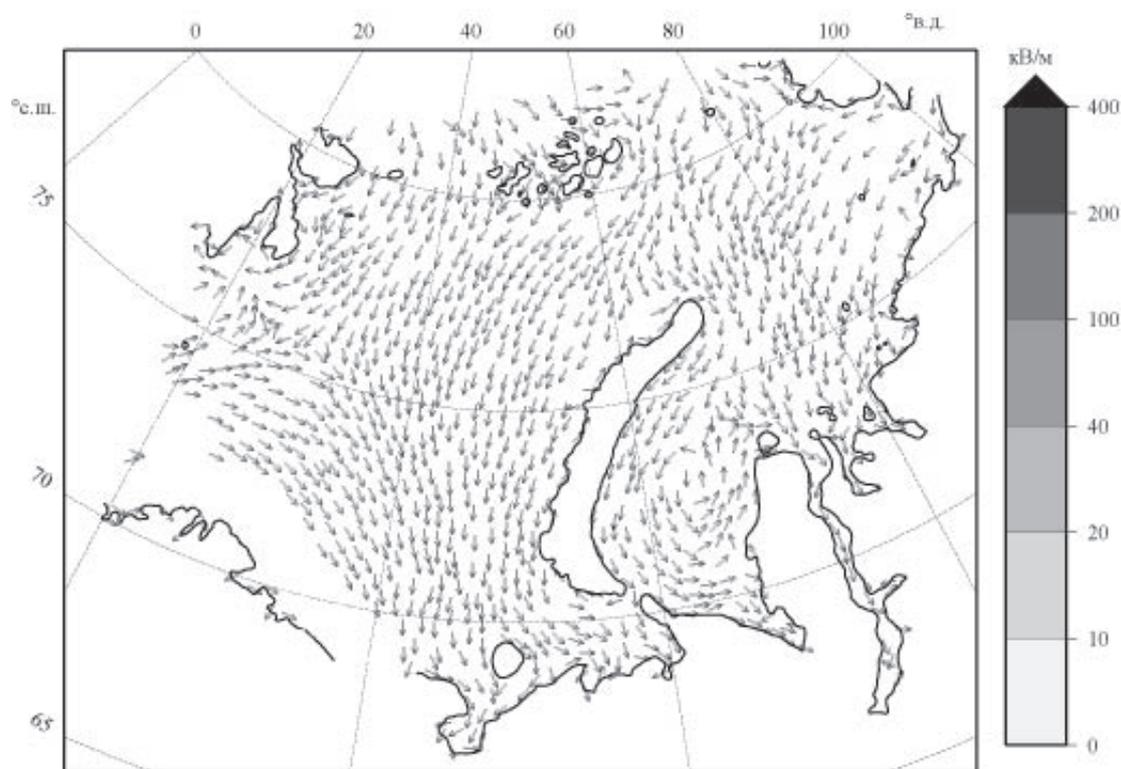


Рис. 1. Пространственное распределение среднего (за приливный цикл) горизонтального волнового переноса баротропной приливной энергии в Баренцевом и Карском морях, отвечающее полусуточной приливной гармонике.

При построении рисунка использовался каждый 16-й сеточный узел. Величины переноса показаны разными оттенками серого цвета, направление переноса — стрелками.

лучшее понимание природы изучаемого явления и повышение точности его предсказания, ответы на них нужно знать, не прибегая к привлечению лишь общих представлений об этом явлении и данных береговых мареографных измерений уровня. Цель настоящего сообщения и заключалась собственно в том, чтобы попытаться дать подходящие ответы на интересующие нас вопросы.

Исходные предпосылки и используемая модель. Несколько упростим задачу, для чего реалистическую геометрию бассейна заменим идеализированной, предполагая, что взаимодействие приливов в соседних бассейнах предотвращается перекрытием пролива, соединяющего их, непроницаемой твердой стенкой (на ней горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии обращается в нуль). Тогда сравнение результатов этого эксперимента с контрольным, в котором Баренцево и Карское моря рассматриваются как единая система, и каких-либо препятствий взаимодействию приливов в отдельных подсистемах нет, даст возможность получить необходимые сведения об интересующем нас аспекте проблемы динамики приливов.

При выполнении обоих экспериментов за основу была выбрана трехмерная конечно-элементная гидростатическая модель QUODDY-4. Ее детальное описание и изложение принятого метода интегрирования уравнений модели содержится в [4]. Поэтому, опуская их, сразу же обратимся к обсуждению полученных результатов.

Предварительно, однако, заметим, что частота приливов принимается совпадающей с частотой гармоник M_2 приливного потенциала. Приливный форсинг, определяемый приливыми колебаниями уровня на открытых границах системы морей, берется из высокоразрешающей арктической приливной модели [5], ассимилирующей всю имеющуюся эмпирическую информацию о приливах, включая данные альтиметрических измерений уровня моря, полученные в течение 364 циклов функционирования системы TOPEX/Poseidon и 108 циклов функционирования системы ERS-1.

Модельные результаты. На рис. 2 изображены приливные карты Баренцева и Карского морей, полученные с учетом и без учета взаимодействия приливов в отдельных морях. Первое, что обращает на себя внимание, — это то, что неучет взаимодействия приливов не сопровождается качественной перестройкой пространственной структуры приливов, хотя количественные изменения параметров (амплитуд и фаз) прилива, достигающие 12 см для амплитуд и нескольких десятков градусов для фаз, проявляются достаточно отчетливо. Особенно заметные изменения параметров прилива обнаруживаются к юго-западу от арх. Земля Франца-Иосифа. Их причиной является то, что часть горизонтального волнового переноса баротропной приливной энергии, которая при свободном энергообмене между соседними морями сосредотачивалась в пределах узкой прибрежной полосы, окаймляющей северную оконечность о-вов Новая Земля, теперь (при отсутствии взаимодействия приливов) остается в Баренцевом море, вызывая соответствующее усиление баренцевоморской приливной волны, перемещающейся вдоль перекрытия пролива на север и далее вдоль южных побережий архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген в виде приливной волны пока неустановленной природы. Это усиление переноса способствует преобразованию вырожденной амфидромии с центром на о. Александры (арх. Земля Франца-Иосифа) в истинную. Перенос на юг усиливается также в Карском море за счет западной ветви переноса, проникающей в море через впадину Св. Анны, которая теперь (при отсутствии взаимодействия приливов) не поступает в Баренцево море и перераспределяет свою энергию в пределах Карского моря. Примечательны также общее понижение амплитуд прилива в Баренцевом море и их повышение в Карском море. Именно такими и должны быть последствия перекрытия пролива при распространении приливной волны из Центральной Арктики в Карское море. Любопытно, однако, что максимальные повышения и понижения амплитуд приливных колебаний уровня обнаруживаются не у самой стенки, а на некотором удалении от нее. Эту особенность можно квалифицировать как артефакт, связанный с отказом от учета изменений фаз прилива. В том, что это действительно так, убеждают значения усредненной (за приливный цикл) средней квадратической абсолютной векторной разности приливных колебаний уровня, отвечающие обоим экспериментам. Она определяется следующим образом:

$$D_n = 2^{-1/2} \left[A_{1n}^2 + A_{2n}^2 - 2A_{1n}A_{2n} \cos(\varphi_{1n} - \varphi_{2n}) \right]^{1/2},$$

где A_{1n} , φ_{1n} и A_{2n} , φ_{2n} — амплитуды и фазы приливов, соответствующие обоим экспериментам, в n -й узловой точке.

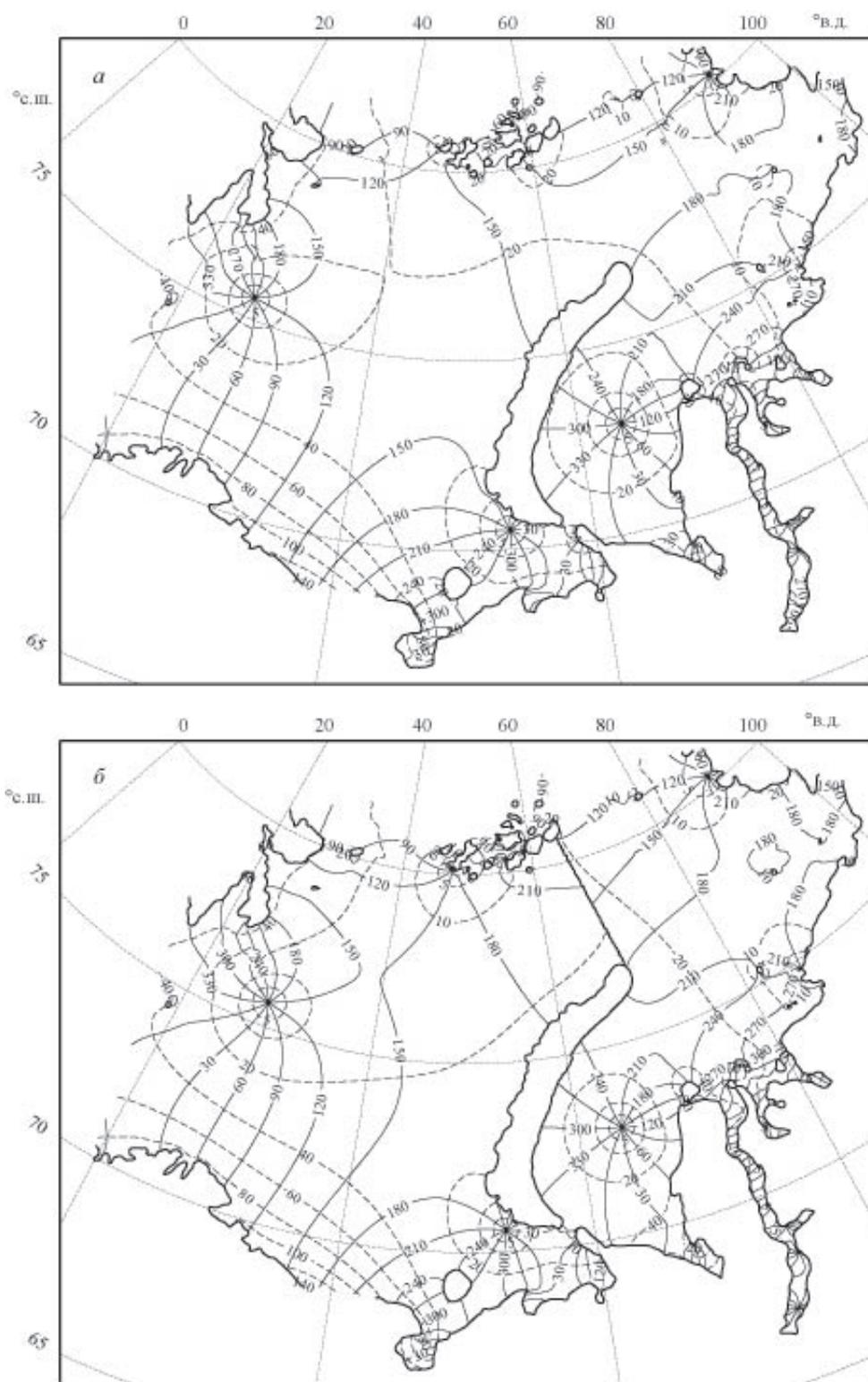


Рис. 2. Приливные карты Баренцева и Карского морей, полученные с учетом (а) и без учета (б) взаимодействия полусуточных приливов в прол. Макарова. Сплошные кривые — изофазы (градусы), пунктирные — изомплитуды (см). Сплошная черная прямая в прол. Макарова — непроницаемая твердая стенка.

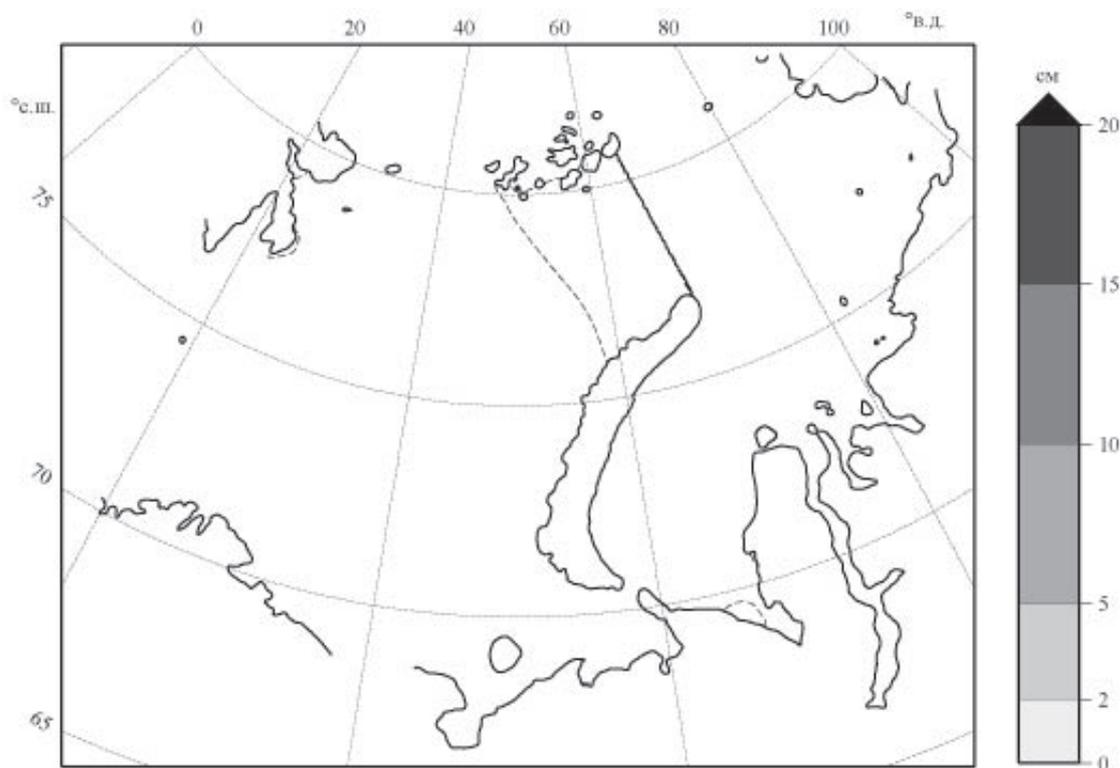


Рис. 3. Поле усредненной (за приливный цикл) средней квадратической абсолютной векторной разности приливных колебаний уровня в Баренцевом и Карском морях, полученных без учета и с учетом взаимодействия полусуточных приливов.

Белая пунктирная кривая — внешняя граница области взаимодействия приливов, на которой эта разность равна средней квадратической абсолютной векторной погрешности предсказания приливных колебаний уровня в Баренцевом и Карском морях.

Пространственное распределение разности D_n приводится на рис. 3. Из него следует, что максимальные отличия двух решений для приливных колебаний уровня действительно приходятся на окрестности стенки и, как правило, постепенно уменьшаются с удалением от нее, стремясь к почти нулевым значениям. Исключения составляют только четыре района, расположенные к югу от о. Западный Шпицберген и в Печорском море (Баренцево море), а также Байдарацкая губа и окрестности о. Белый (Карское море). Общим свойством всех этих четырех районов является их мелководность. Как известно, поднятие дна на мелководье вызывает разные изменения приливных колебаний уровня в зависимости от характерных вариаций баротропной приливной скорости (усиливается ли она или ослабевает). Например, перекрытие прол. Макарова (прекращение взаимодействия приливов в соседних морях) приводит к тому, что часть приливной волны, приходящей в Карское море из Центральной Арктики, перестает проникать в Баренцево море и остается полностью в Карском. Соответственно из-за прекращения поступления горизонтального волнового переноса баротропной приливной энергии в Баренцево море и его интенсификации в Карском море баротропная приливная скорость в Баренцевом море ослабнет, а в Карском море усилится. Как всегда, в этом случае взаимодействие баротропного приливного потока с поднятием дна на мелководье будет иметь своим следствием конкуренцию двух факторов — поднятия дна и перекрытия пролива, — в результате чего первый из них частично компенсируется вторым в Баренцевом море и сложится с ним в Карском море. Если эффект поднятия дна преобладает над эффектом перекрытия пролива, приливные колебания уровня несколько возрастут на мелководьях Баренцева моря и станут еще большими на мелководьях Карского моря.

Наоборот, при наличии взаимодействия приливов в соседних морях (свободном переносе баротропной приливной энергии между Баренцевым и Карским морями) западная ветвь приливной волны из Центральной Арктики не будет оставаться в Карском море и будет проникать в Баренцево море. В результате произойдет повышение баротропной приливной скорости и усиление приливных колебаний

уровня в Баренцевом море и, напротив, понижение баротропной приливной скорости и ослабление приливных колебаний уровня в Карском море. Если теперь эффект поднятия дна преобладает над эффектом перекрытия пролива, то они сложатся в Баренцевом море и частично компенсируются в Карском. В конечном счете усиление приливных колебаний уровня будет более выраженным в Баренцевом море, нежели в Карском, и средняя квадратическая разность D_n приливных колебаний уровня станет меньше в Баренцевом море, как это и имеет место к югу от о. Западный Шпицберген и в Печорском море, а также на большей части Карского моря, как это имеет место в Байдарацкой губе и вокруг о. Белый. Примерно то же самое видно из рис. 3, в основе которого лежат результаты моделирования.

Далее, имея пространственное распределение D_n , можно попытаться найти область взаимодействия приливов в соседних морях, допустив, что значения D_n на внешней границе этой области совпадают с усредненной (за приливный цикл) средней квадратической абсолютной векторной ошибкой E_A предсказания приливных колебаний уровня, определяемой условием $E_A = \sum_n (D_n/N)$, где D_n задается тем же выражением, что и D_n выше, с той лишь разницей, что A_{1n} , φ_{1n} теперь — амплитуда и фаза предсказанных приливных колебаний уровня, A_{2n} , φ_{2n} — их наблюдаемые значения и N — число пунктов береговых мареографных измерений уровня. При $N = 82$ погрешность E_A составляет 7.8 см. Соответствующая внешняя граница области взаимодействия приливов показана на рис. 3 пунктиром. Видно, что эта область охватывает северо-восточную часть Баренцева моря. Остальная часть Баренцева моря и почти все Карское море содержат значения D_n , меньшие, чем E_A , которые, следовательно, находятся в шуме модели. О причине, почему значения D_n в Байдарацкой губе превышает погрешность E_A , уже говорилось выше.

Используя трехмерную конечно-элементную гидростатическую модель QUODDY-4, мы показали, что взаимодействие приливов в Баренцевом и Карском морях не приводит к качественной перестройке пространственной структуры приливов, хотя количественные расхождения приливных колебаний уровня, полученных с учетом и без учета взаимодействия приливов, оказываются значимыми. Особенно ярко выражены они в северной части Баренцева моря, где благодаря перекрытию пролива Макарова приливная волна, огибающая его с запада и затем арх. Земля Франца-Иосифа с юга, усиливается, в результате чего вырожденная амфидромия с центром на о. Александры (арх. Земля Франца-Иосифа) преобразуется в истинную. Сказанное подтверждается увеличением в указанных двух случаях усредненной (за приливный цикл) средней квадратической абсолютной векторной разности приливных колебаний уровня на мелководьях Баренцева и Карского морей. При этом в Карском море она в общем больше, чем в Баренцевом, факт, объясняемый частичной компенсацией эффектов поднятия дна и неучета взаимодействия приливов в Баренцевом море и их сложением в Карском.

Область взаимодействия приливов распространяется только на северо-восточную часть Баренцева моря. В остальной части Баренцева моря и почти во всем Карском море, кроме Байдарацкой губы, средняя квадратическая абсолютная векторная разность приливных колебаний уровня остается меньше средней квадратической абсолютной векторной ошибки предсказания приливных колебаний уровня, свойственной принятой модели, т.е. можно говорить о том, что разность приливных колебаний уровня, о которой идет речь, находится в шуме модели.

Литература

1. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
2. Каган Б. А., Тимофеев А. А. Моделирование поверхностных и внутренних приливов в Карском море // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. doi: 10.7868/S0002351517020055.
3. Каган Б. А., Тимофеев А. А. Пространственная изменчивость коэффициента сопротивления и ее роль в динамике и энергетике прилива M2 в Баренцевом и Карском морях // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 113—128.
4. Ip J.T.C., Lynch D. R. QUODDY-3 User's Manual: Comprehensive coastal circulation simulation using finite elements: Nonlinear prognostic time-stepping model. Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, Report Number NML-95-1, 1995. 45 p.
5. Padman L., Erofeeva S. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31, № 2. doi: 10.1029/2003GL019003.