

УДК: 551.466.8

ВЛИЯНИЕ ПРИЛИВОВ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРСКОГО МОРЯ В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД

© 2019 г. Б. А. Каган¹, Е. В. Софьина^{1,2}, А. А. Тимофеев¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский проспект, 36

E-mail: kagan@ioras.nw.ru, soffina_k@mail.ru, timofeev@ioras.nw.ru

²Российский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

E-mail: soffina_k@mail.ru

Поступила в редакцию 26.09.2018 г.

Принята к печати 28.11.2018 г.

Используя высокоразрешающую версию трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4, мы выполнили две серии численных экспериментов. Первая из них предназначалась для оценки приливных изменений, характеризующих роль приливов в формировании климатических характеристик Карского моря в безледный период (как-то: модуля и направления скорости поверхностных постоянных течений, температуры и солёности морской воды в основании пикноклина и уровня свободной поверхности моря). Вторая привлекалась для проверки, адекватен ли косвенный способ описания приливных изменений в терминах индуцируемых приливами диссипации бароклинной приливной энергии и диапикнической диффузии, по сравнению с явным, и определения количественной меры, могущей быть использованной при их сравнении. На основании результатов моделирования убеждаемся, что приливные изменения являются если не главными, то весьма значимыми, что косвенный способ их учёта адекватен по отношению к явному, что пренебрежение ими, как это обычно делается при прогнозе и расчете климатов морских систем, не имеет под собой оснований и что, наконец, в качестве количественной меры подобия одноименных полей климатических характеристик, полученных при суммарном (ветровом + термохалинном + приливном) форсинге, с одной стороны, и комбинированном (ветровом + термохалинном) форсинге, дополненным косвенным способом учёта приливных изменений, с другой, может быть принят средний по площади моря коэффициент корреляции.

Ключевые слова: приливные изменения, явный и косвенный способы их описания, моделирование, климатические характеристики морской системы, Карское море.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555251-60>

1. ВВЕДЕНИЕ

Известны два способа описания приливных изменений, характеризующих роль приливов в формировании региональных климатов морских систем (в дальнейшем приливных эффектов). Один из них (явный), предложенный в [1], представляет приливные эффекты как результат реакции морских систем на воздействие суммарного (ветрового + термохалинного + приливного) форсинга. При этом зависимость коэффициентов вертикальной турбулентной вязкости и диффузии от локального числа Ричардсона считается заданной. Каких-либо объ-

яснений механизма генерации приливных эффектов не приводится. В основе второго способа (он называется еще косвенным) лежит такое объяснение: в соответствии с ним приливные эффекты считаются обязанными своим происхождением генерации диссипации бароклинной приливной энергии и связанной с ней диапикнической диффузии. Последние индуцируются либо сопротивлением формы дна [2], аналогичным орографическому сопротивлению в атмосфере, либо поверхностным и внутренним приливами [3]. В обоих случаях неявно принимается [4], что выполняется приближение «слабого взаимодействия». Иначе говоря, предпо-

лагается, что, если разность характерных частот и пространственных масштабов турбулентности различного происхождения достаточно велика, то нелинейным взаимодействием между отдельными составляющими турбулентности можно пренебречь, и потому их можно считать аддитивными. То же самое можно сказать и в отношении отдельных составляющих форсинга, если характерные для них частоты и пространственные масштабы сильно разнесены между собой.

Как уже отмечалось, при использовании явного способа описания или учета приливных эффектов их происхождение тесно связывается с воздействием суммарного форсинга (точнее, его приливной составляющей), и сами по себе приливные эффекты определяются решением соответствующей начально-краевой задачи в следующей последовательности: сначала находится решение вспомогательной задачи, отвечающей комбинированному (ветровому + термохалинному) форсингу. Затем полученные решения, отвечающее суммарному и комбинированному форсингам, сравниваются, и результат сравнения дает искомую оценку приливных эффектов (в частности, того, где именно названные эффекты проявляются наиболее ярко и какова их значимость). Во втором (косвенном) способе задача сводится к определению индуцируемой сопротивлением форм дна или внутренними приливными волнами диссипации бароклинной приливной энергии и связанной с ней диапикнической диффузии, для чего привлекаются решения задач о динамике индуцирующих их явлений. В итоге вертикальная турбулентная диффузия, генерируемая комбинированным форсингом, корректируется суммированием с диапикнической диффузией. Далее, уравнения гидротермодинамики океана при скорректированной вертикальной турбулентной диффузии интегрируются до выхода решения на квазистационарный или квазипериодический (в зависимости от характера форсинга) режимы. Сопоставление решения, отвечающего комбинированному форсингу и скорректированной интенсивности вертикальной турбулентной диффузии, имеющей ветровое, термохалинное и приливное происхождение, с одной стороны, с решением, отвечающим комбинированному форсингу при отказе от учета приливных эффектов и имеющим чисто ветровое и термохалинное происхождение, с другой, позволяет судить о том, какова роль приливных эффектов в формировании климата морской системы. Здесь будет уместно заметить, что в предлагаемом в [2] варианте косвенного способа диссипация бароклинной

приливной энергии определяется не из решения вспомогательной задачи, а следуя результатам полевых измерений в Бразильской впадине, считается, варьирующей с расстоянием от дна по экспоненциальному закону. В этом состоит основное отличие предлагаемых в [2] и [3] вариантов косвенного способа учета приливных эффектов.

Цель настоящей статьи заключается в том, чтобы, используя высокоразрешающую версию трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4 и второй вариант косвенного способа учета приливных эффектов, оценить последние, определяя их как разности значений одноименных климатических характеристик (как-то: параметров скорости поверхностных постоянных течений, температуры и солености морской воды и уровня свободной поверхности) безледного Карского моря, отвечающих либо суммарному и комбинированному форсингам, либо только комбинированному форсингу и избранному варианту косвенного способа описания приливных эффектов, в котором они или учитываются, или могут быть исключены из рассмотрения (отсутствуют). Цель статьи заключалась также в том, чтобы сравнить те же климатические характеристики Карского моря, полученные при суммарном форсинге и комбинированном форсинге, дополненном избранным вариантом косвенного способа учета приливных эффектов. В этих двух случаях степень подобия полей климатических характеристик дает представление о том, адекватен ли он по сравнению с явным и, если да, возможно ли охарактеризовать его какой-либо количественной мерой подобия, скажем, средним по площади моря коэффициентом корреляции. Таковы цели работы. Пояснение, почему предсказываемые значения переменных выбираются в качестве контрольных вместо климатических данных, можно найти ниже.

Наконец, поясним, что собственно понимается под словосочетаниями «региональный климат морской системы» и «косвенный способ описания приливных эффектов при отказе от их учета». Региональным климатом морской системы, каковой является Карское море, мы называем характерную для данного региона совокупность средних годовых пространственных распределений и их сезонных изменений указанных выше климатических характеристик, знание которых необходимо для совершенствования существующих методов расчета и прогноза климата рассматриваемой морской системы, используемых, в частности, при разведке и освоении месторо-

ждений углеводородов в шельфовой зоне океанов. Косвенный способ описания приливных эффектов при отказе от их учета означает, что определение климата морской системы происходит при задании комбинированного форсинга и исключении приливных эффектов из рассмотрения. Иначе говоря, ответственность за формирование климата морской системы в данном случае возлагается только на факторы неприливно-го (ветрового и термохалинного) происхождения.

2. ПРИНЯТАЯ МОДЕЛЬ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ НА ОТКРЫТОЙ ГРАНИЦЕ И СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

Отдельные элементы модели QUODDY-4 и модель в целом были подробно изложены в [5]. Источники эмпирической информации, используемые при ее реализации, были указаны в [6]. Поэтому во избежание повторений мы остановимся на них бегло и ограничимся перечислением граничных условий на открытой границе и свободной поверхности моря.

В качестве таковых для температуры и солености морской воды на открытой границе моря мы воспользуемся наблюдаемыми значениями этих переменных [7] на участках втока и условиями излучения на участках вытока, сводящихся при достаточно большой вычислительной фазовой скорости распространения сигнала к градиентным условиям (равенствам нулю градиентов от переменных). Значения уровня на свободной поверхности моря задаются по данным наблюдений, дополненными результатами спутниковых альтиметрических изменений уровня [8], а приливные колебания уровня — по данным высокоразрешающей арктической приливной модели [9], полученным в рамках программ TOPEX/Poseidon и ERS-1 спутниковой альтиметрии. Массообмен с атмосферой будем параметризовать т. н. восстанавливающими (restoring) граничными условиями, представляющие потоки массы пропорциональными разностям климатических и предсказываемых значений переменных с коэффициентом пропорциональности, имеющим смысл обратного времени восстановления. Последнее для температуры и солености морской воды на свободной поверхности моря принимается одинаковым и равным 10^5 с, т. е., согласно терминологии, принятой в [10], восстановление предсказыва-

емых значений температуры и солености морской воды на свободной поверхности моря к их климатическим значениям считается сильным. Сведения о способе задания ветрового форсинга в приземном слое атмосферы приводятся в NCEP-R1 реанализе данных о циркуляции атмосферы в Арктике [11], признанных оптимальными с точки зрения сравнения их с данными наблюдений за приземной скоростью ветра на дрейфующих станциях «Северный полюс».

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Достижение двух намеченных во Введении целей статьи производилось с помощью двух серий численных экспериментов: по одной применительно к каждой цели. Численные эксперименты в одной серии отличались друг от друга учетом или отказом от учета приливных эффектов. Все прочие данные, включая данные о форсинге, задавались одинаковыми. Во второй серии оба эксперимента, относящиеся ко второй цели статьи, отличались друг от друга способом учета приливных эффектов. В первом из них привлекался явный способ, во втором — косвенный. Как и раньше, все прочие данные второй серии экспериментов принимались такими же. Разность значений переменных в двух экспериментах первой серии рассматривались как показатель вклада приливных эффектов, подобная же разность во второй серии — как мера адекватности косвенного способа по сравнению с явным. К тому же, если разность переменных характеризуется какой-либо количественной мерой подобия между обоими сравниваемыми способами описания, важно знать, насколько они близки друг к другу. Сказанное раскрывает суть проделанной работы, предпринятой в этом разделе.

Полученные результаты моделирования поверхностных постоянных течений при обоих форсингах (суммарном и комбинированном) в Карском море оказались близкими к представленным в [12], тем самым свидетельствуя о существовании 3 мезомасштабных круговоротов в юго-западной части, еще 6 таких же круговоротов в остальной части моря и разнонаправленных течений вне их. Качественное подобие полей скорости течений в обоих случаях связано, во-первых, с малостью приливных эффектов по сравнению с другими, участвующими в формировании поверхностной циркуляции вод, и, во-вторых, с использованием одинакового высокого горизонтального разрешения. При более грубом горизонтальном разрешении и/или

большом расстоянии между соседними *in situ* измерениями скорости некоторые из этих круговоротов могут не воспроизводиться. Иллюстрацией сказанного могут служить две схемы поверхностной циркуляции вод в Карском море, составленные в [13] и [14]. В первой из цитируемых работ приведенная схема основывалась исключительно на данных *in situ* измерений скорости, во второй — на тех же данных, дополненных (с учетом малочисленности измерений) результатами динамических расчетов. В итоге выяснилось, что обе схемы содержат разное количество круговоротов: одного мезомасштабного в юго-западной части моря, как предполагалось в [13], и двух (в том числе по одному в юго-западной и восточной частях моря), как предполагалось в [14]. Короче, обе схемы циркуляции вод зависят от расстояния между соседними *in situ* измерениями скорости и выбранного шага сетки. Если это расстояние и/или принятый шаг сетки больше горизонтального масштаба круговорота, то он может не обнаруживаться. С этим связано разное количество круговоротов, присутствующих в двух упомянутых выше схемах циркуляции вод. Свойственное им сочетание мезомасштабных круговоротов и разнонаправленных течений вне их является наиболее примечательной особенностью циркуляции вод в поверхностном слое Карского моря.

О количественном соответствии между предсказываемыми и наблюдаемыми полями скорости течений здесь речь не идет: соответствие между ними можно будет оценить только в будущем, когда количество *in situ* измерений скорости станет достаточным для этого. Пока же из-за отсутствия надлежащей информации мы вынуждены довольствоваться таким сравнением только для температуры и солёности морской воды и уровня свободной поверхности моря. Ничто не мешает, однако, обратиться к сравнению предсказываемых значений тех же переменных, в том числе параметров скорости (модуля и направления) поверхностных течений, полученных посредством явного и косвенного способов описания регионального климата Карского моря. Воспользуемся этим сравнением, но предварительно заметим, что задание восстанавливающего граничного условия для температуры и солёности морской воды на свободной поверхности моря может привести к тому, что такое сопоставление будет непоказательным. Действительно, если время установления квазистационарного или квазипериодического режимов много больше времени восстановления, то предсказываемые значения

температуры и солёности морской воды на свободной поверхности моря имеют тенденцию стремиться к их наблюдаемым (климатическим) значениям. В этом смысле более показательными будут значения указанных переменных, относящиеся к глубинному слою моря, например, к основанию пикноклина.

Отмеченная выше наиболее примечательная особенность структуры поля поверхностной результирующей циркуляции вод в Карском море — сочетание мезомасштабных круговоротов и разнонаправленных течений — остается в силе и в данном случае, представляющем пространственные распределения климатических характеристик моря в безледный период, отвечающие комбинированному форсингу и косвенному способу учета приливных эффектов и их отсутствию. Из рис. 1а и б видно, что оба поля качественно подобны друг другу, и, значит, приливные эффекты в нем сказываются не столь значительно. Отличия полей касаются, главным образом, количества и местоположений круговоротов. Отказ от учета приливных эффектов сопровождается уменьшением количества круговоротов из-за их слияния. То, что это так, может быть детектировано на крайнем юго-западе и в центральной части моря. Отличия модулей скорости в рассматриваемых двух случаях (рис. 1в), имеющие место в окрестности юго-восточного побережья о-вов Новая Земля и к востоку от о. Белый, сосредоточены в пределах от 0 до ± 2 см/с, достигая иногда ± 5 см/с.

Результаты моделирования свидетельствуют также о том, что качественное подобие полей поверхностных постоянных течений в Карском море сохраняется (даже если не таким же, но близким) и для направления скорости. В этом можно убедиться, сравнивая первые два фрагмента рис. 2. Разности направлений скорости при учете и без учета приливных эффектов в основном варьируют в пределах $(-20, 20)^\circ$. Однако к северу и востоку от о. Белый, равно как и в центральной части моря и в желобе Св. Анны они могут превышать указанные значения. Если теперь учесть, что типичные значения модуля скорости поверхностных постоянных течений в Карском море изменяются в пределах от 0 до 50 см/с, а направления от -180 до 180° , то приведенные оценки разностей двух решений, связанные с приливными эффектами, можно считать значимыми.

Поле температуры морской воды в основании пикноклина в рассматриваемых двух случаях (при учете приливных эффектов и без них) также оста-

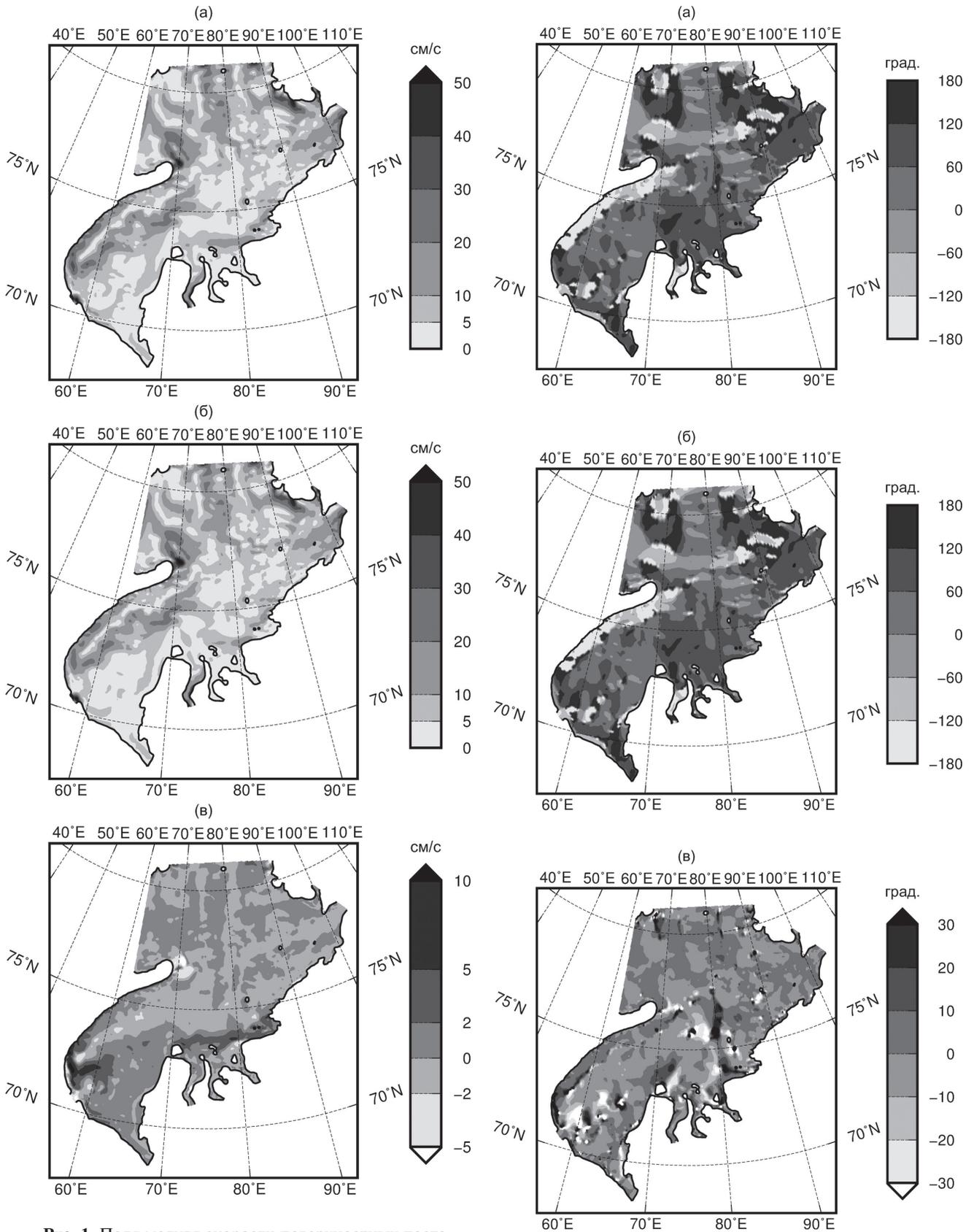


Рис. 1. Поля модуля скорости поверхностных постоянных течений в безледном Карском море, полученные при косвенном способе учета приливных эффектов (а) и без них (б) и разности решений (а) и (б).

Рис. 2. То же, что на рис. 1, для направления скорости.

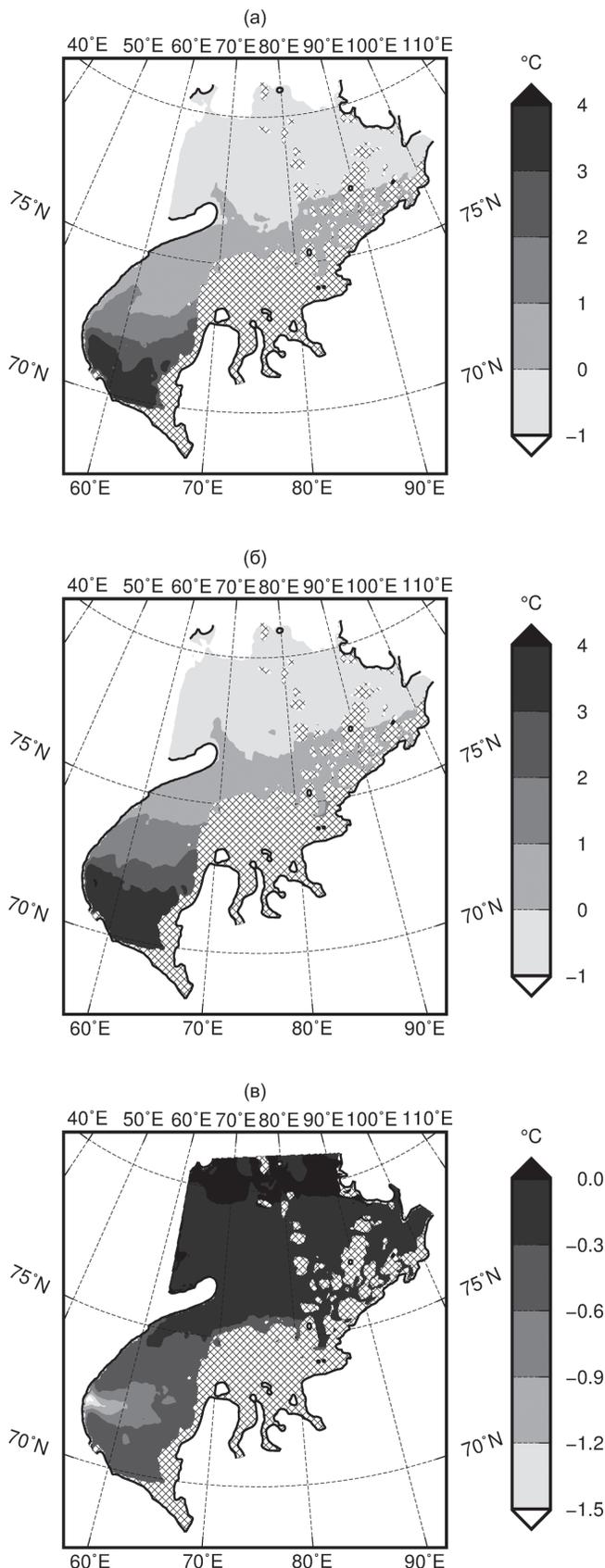


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для температуры морской воды в основании пикноклина. Косой клеткой выделена подобласть, в которой глубины меньше 40 м.

ются близкими друг к другу (ср. фрагменты а и б на рис. 3). В северной и северо-западной частях моря их значения приближаются к 0°C , к югу от параллели 75° с. ш. они составляют -0.6°C , а еще южнее, в южной половине Новоземельской впадины, достигают -1.5°C , так что к северу от пролива Карские Ворота образуется локальный минимум разности температур, своим происхождением обязанный приливным эффектами.

Качественное подобие полей солености морской воды в основании пикноклина сохраняется в северной половине моря (рис. 4). К югу от нее о таком подобии полей солености можно говорить только ориентировочно. Причина — различия значений солености, составляющие $31\text{--}32\text{‰}$ при учете приливных эффектов и $30\text{--}32\text{‰}$ без их учета в Новоземельской впадине. Соответствующие значения к востоку от нее составляют $32\text{--}34\text{‰}$ и $31\text{--}33\text{‰}$, а в юго-западной части моря они уменьшаются соответственно до 30 и 29‰ , в результате чего максимальная разность солености в этих двух случаях обнаруживается к северу от южной оконечности о-вов Новая Земля, где она равна 0.9‰ и изменяется от -0.3 до 0.3‰ в восточной части моря.

Качественное подобие полей соблюдается также для уровня свободной поверхности моря (рис. 5). Судя по результатам моделирования, он максимален у юго-восточного побережья и затем более или менее плавно уменьшается к северо-западу, причем максимальное повышение уровня (до 20 см) за счет приливных эффектов происходит в северной половине моря, максимальное понижение уровня (до -10 см) — на крайнем юго-западе моря. В остальной части моря повышения и понижения уровня приливного происхождения (или, иначе, приливные повышения и понижения уровня) принимают промежуточные значения. Приливные понижения уровня локализуются преимущественно в юго-западной и центральной частях моря, повышения уровня — в северо-западной части, включая желоб Св. Анны и Центральное Карское плато. Отмеченные понижения и повышения уровня охватывают, соответственно, прилегающую часть моря вплоть до побережья континента и западные берега арх. Северная Земля (рис. 5в). При этом оказывается, что желоб Воронина занят областью небольших понижений уровня, а Центральное Карское плато и желоб Св. Анны областью небольших повышений уровня. Максимальные приливные повышения уровня составляют 2 см, максимальные приливные понижения уровня, например,

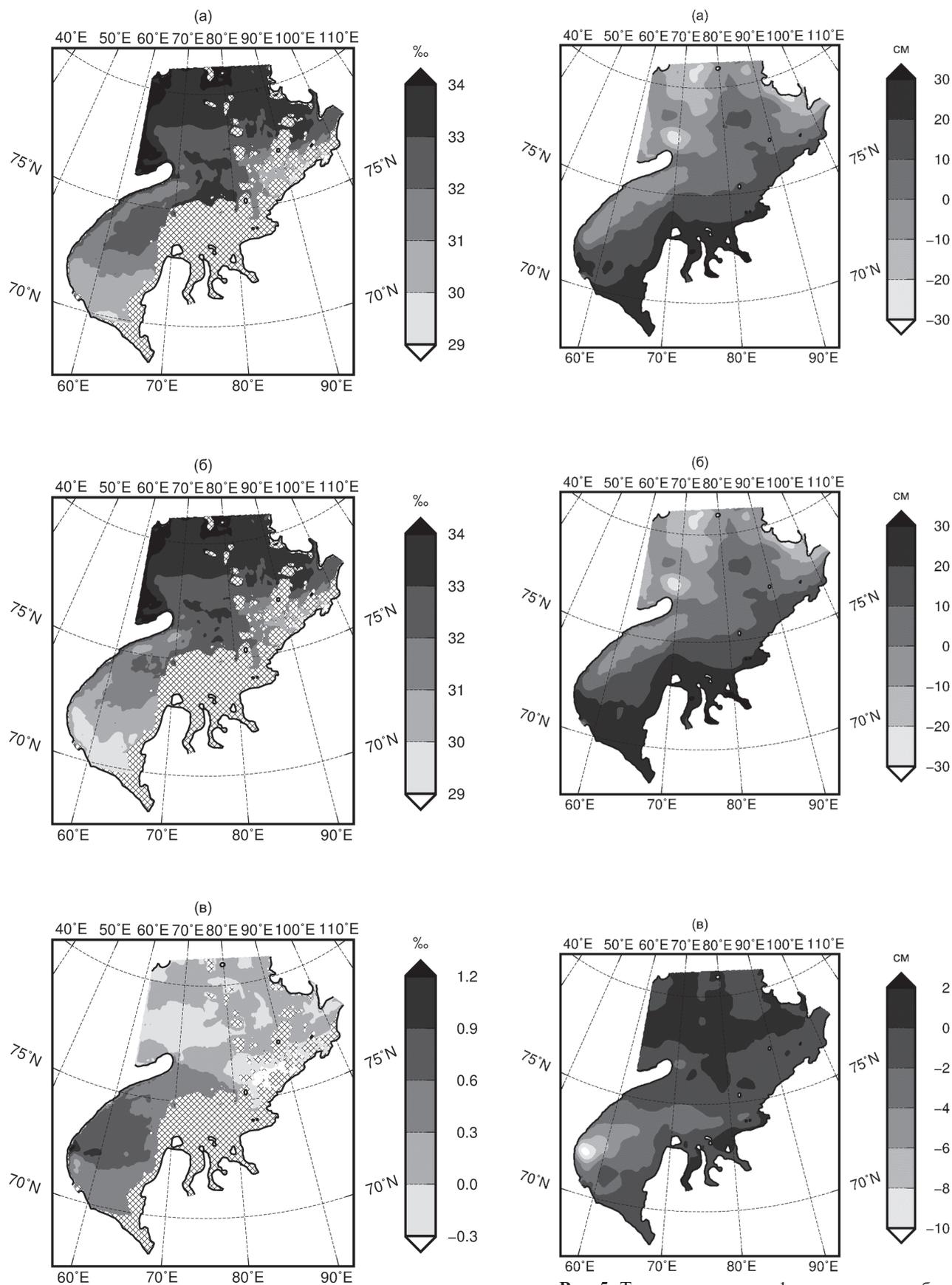


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для солёности.

Рис. 5. То же, что на рис. 1, для уровня свободной поверхности.

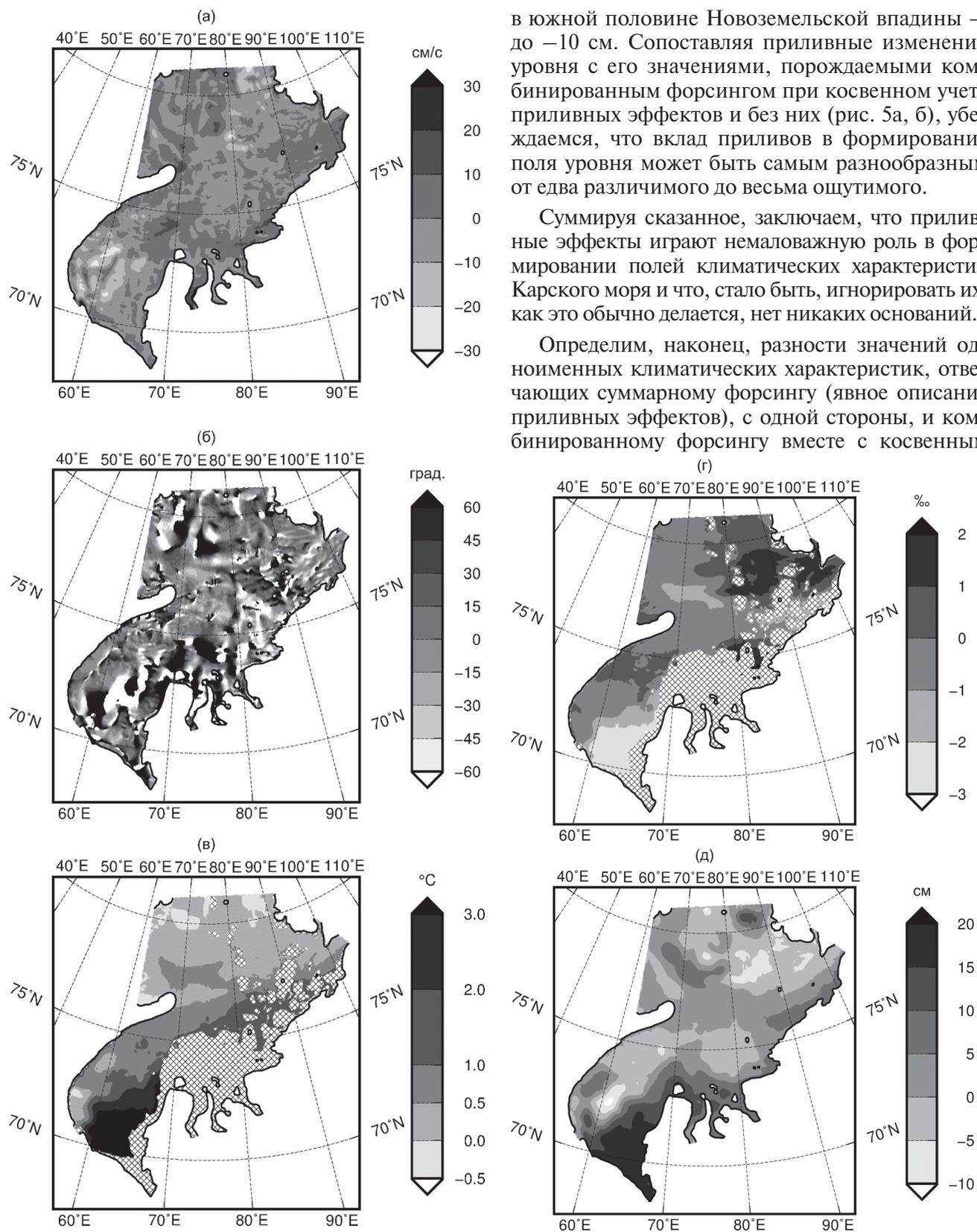


Рис. 6. Разность значений климатических переменных, отвечающих явному и косвенному способам учета приливных эффектов. Переменные: модуль (а) и направление (б) скорости поверхностных постоянных течений, температура (в) и соленость (г) морской воды в основании пикноклина и уровень (д) свободной поверхности моря.

в южной половине Новоземельской впадины — до -10 см. Сопоставляя приливные изменения уровня с его значениями, порождаемыми комбинированным форсингом при косвенном учете приливных эффектов и без них (рис. 5а, б), убеждаемся, что вклад приливов в формирование поля уровня может быть самым разнообразным от едва различимого до весьма ощутимого.

Суммируя сказанное, заключаем, что приливные эффекты играют немаловажную роль в формировании полей климатических характеристик Карского моря и что, стало быть, игнорировать их, как это обычно делается, нет никаких оснований.

Определим, наконец, разности значений одноименных климатических характеристик, отвечающих суммарному форсингу (явное описание приливных эффектов), с одной стороны, и комбинированному форсингу вместе с косвенным

способом их описания, с другой, позволяющих судить о том, адекватен ли косвенный способ по сравнению с явным, и найдем соответствующие им средние по площади моря коэффициенты корреляции между полями рассматриваемых климатических характеристик, могущими характеризовать корреляции этих переменных. Пространственные распределения разностей значений модуля и направления скорости поверхностных постоянных течений, температуры и солености морской воды на глубине 40 м (основание пикноклина) и уровня свободной поверхности моря представлены на рис. 6 а–д. Нетрудно видеть, что разности значений соответствующих переменных находятся в пределах ($-30, 30$) см/с для модуля и ($-60, 60$)° для направления скорости поверхностных постоянных течений, от -0.5 до 3.0 °С для температуры, от -2 до 2 ‰ для солености морской воды и от -10 до 20 см для уровня свободной поверхности моря. Средний по площади моря коэффициент корреляции между полями значений одноименных климатических характеристик, найденных с помощью явного и косвенного способов описания приливных эффектов, составляет 0.675, 0.487, 0.625, 0.619 и 0.885 соответственно. Отсюда следует, что косвенный способ обеспечивает, в общем, удовлетворительное описание приливных эффектов по сравнению с явным для всех переменных, кроме, пожалуй, направления скорости поверхностных постоянных течений. Можно предположить, что такой результат объясняется пренебрежением стационарной составляющей остаточных приливных течений при использовании косвенного способа описания приливных эффектов, когда она никак не учитывается, тогда как использование суммарного форсинга предполагает, что она учитывается автоматически. То, что сравнительно низкое значение коэффициента корреляции связано с игнорированием стационарной составляющей остаточных приливных течений, говорят его оценки, полученные при комбинированном форсинге в дополнении с косвенным способом учета приливных эффектов и без них, когда остаточные приливные течения не учитываются в обоих случаях. Теперь он получается равным 0.981, 0.891, 0.995, 0.980 и 0.994 соответственно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя высокоразрешающую версию трехмерной конечно-элементной гидростатической модели QUODDY-4, мы выполнили две серии численных экспериментов. Первая из них предназ-

начена для оценки приливных изменений (приливных эффектов) климатических характеристик безледного Карского моря (как-то: модуля и направления скорости поверхностных постоянных течений, температуры и солености морской воды в основании пикноклина и уровня свободной поверхности моря), вторая – для проверки адекватности косвенного способа описания приливных эффектов в терминах индуцируемых приливами диссипации бароклинной приливной энергии и диапикнической диффузии по сравнению с явным и определения количественной меры, могущей быть использованной для их сравнения. Сопоставление решений, полученных при комбинированном (ветровом + термохалинном) форсинге вместе с косвенным способом учета приливных эффектов и без них, показало, что приливные эффекты являются, если не главными, то весьма значимыми. Потому пренебрежение ими, как это обычно делается при прогнозе и расчете климатов морских систем, не имеет под собой оснований. Проверкой установлено, что косвенный способ учета приливных эффектов адекватен и что средний по площади моря коэффициент корреляции может быть принят в качестве количественной меры подобия полей одноименных климатических характеристик, найденных при суммарном форсинге, с одной стороны, и комбинированном форсинге, дополненным косвенным способом учета приливных эффектов, с другой. Для вышеперечисленных климатических характеристик средний коэффициент корреляции оказался равным 0.675, 0.487, 0.625, 0.619 и 0.885 соответственно. Как видно, косвенный способ обеспечивает в общем удовлетворительное согласие полей всех рассматриваемых климатических характеристик, кроме, пожалуй, направления скорости поверхностных постоянных течений. Вероятной причиной этого является пренебрежение стационарной составляющей скорости остаточных приливных течений, никак не учитываемых при использовании косвенного способа описания приливных эффектов. Сказанное подтверждается оценками среднего коэффициента корреляции между полями климатических характеристик, отвечающих комбинированному форсингу вместе с косвенным способом учета приливных эффектов и без них, когда остаточные приливные течения не учитываются в обоих случаях. Теперь он получается равным 0.981, 0.891, 0.995, 0.980 и 0.994 соответственно.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2019-0015) при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-05-00263).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mueller M., Haak H., Jungclaus J.H., Suendermann J., Thomas M.* The effect of ocean tides on a climate model simulation // *Ocean Model.* 2010. V. 35, № 4. P. 304–313.
2. *Jayne S.R., St. Laurent L.C.* Parameterizing tidal dissipation over rough topography // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, № 5. P. 811–814.
3. *Каган Б.А., Софьина Е.В.* Способ учета приливных изменений региональных климатов водоемов на примере безледного Баренцева моря // *Океанология.* 2017. Т. 57, №2. С. 275–283.
4. *Заславский Г.М., Сагдеев П.З.* Введение в нелинейную физику. М.: Наука, 1988. 368 с.
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. 45 p.
6. *Каган Б.А., Софьина Е.В.* Приливные изменения регионального климата Карского моря: результаты моделирования // *Фундам. прикл. гидрофиз.* 2019. Т. 12, № 1. С. 40–44.
7. *Tanis E., Timokhov L. (eds.).* Joint US-Russian Atlas of the Arctic Ocean, *Oceanography Atlas for the summer period.* Environmental Working Group, University of Colorado, Media Digital, 1998.
8. *Rio M.H., Guinehut S., Larnicol G.* New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, № C07018. doi:10.1029/2010JC006505.
9. *Padman L., Erofeeva S.* A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. doi: 1029/2003 GL019003.
10. *Jayne S.R.* The impact of abyssal mixing parameterizations in an ocean general model // *J. Phys. Oceanogr.* 2009. V. 39, № 7. P. 1756–1775.
11. *Kistler R. et al.* The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2001. V. 82. P. 247–267.
12. *Каган Б.А., Софьина Е.В.* Высокорастворимое моделирование поверхностной результирующей циркуляции вод в Карском море, ее баротропной и бароклинной составляющей и роль приливов в их формировании // *Фундам. прикл. гидрофиз.* 2018. Т. 11, № 2. С. 103–107.
13. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Изд-во МГУ. 1982. 192 с.
14. *Pavlov V.K., Phirman S.L.* Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // *Deep Sea Res. II.* 1995. V. 42, № 6. P. 1369–90.

The Tidal Effect on the Climatic Characteristics of the Kara Sea in the Ice-Free Period

B. A. Kagan, E. V. Sofina, A. A. Timofeev

e-mail: kagan@ioras.nw.ru, soffina_k@mail.ru, timofeev@ioras.nw.ru

Received: 26.09.2018

Accepted: 28.11.2018

Using a high-resolution version of the QUODDY-4 three-dimensional finite-element hydrostatic model, we have carried out two series of numerical experiments. The first estimates tidal changes characterizing the role of tides in the formation of climatic characteristics of the Kara Sea in the ice-free period (the magnitude and directions of velocity of permanent surface currents, temperature, and salinity at the pycnocline base and level of the free sea surface). The second series checks the adequacy of the indirect description of tidal changes in terms of tide-induced baroclinic tidal-energy dissipation and diapycnal diffusion when compared to the explicit method and obtains a quantitative measure that can be used for their comparison. The modeling results indicate, first, that the tidal changes are a significant, if not key, factor; second, that the indirect description of tidal changes is adequate when compared to the explicit method; third, that it is unjustified to disregard these changes (this is common in predicting and computing the climates of marine systems); and, finally, that the correlation averaged over the sea surface area can be taken as a quantitative measure of the similarity of the fields of climatic characteristics obtained for the total (wind + thermohaline + tidal) forcing, on the one hand, and the combined (wind + thermohaline) forcing coupled with the indirect method for the description of tidal changes, on the other.

Keywords: tidal changes, explicit and indirect descriptions, modeling, climate characteristics of a marine system, the Kara Sea.