УДК 551.446.7

© *Б. А. Каган, Е. В. Софьина*
Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН
sofjina@ioras.nw.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛУСУТОЧНОГО ПРИЛИВА И ЕГО ЭНЕРГЕТИКИ В КАНАДСКОМ АРКТИЧЕСКОМ АРХИПЕЛАГЕ, ВКЛЮЧАЯ СИСТЕМУ ВОДОЕМОВ ГУДЗОНОВА ЗАЛИВА

Для исследования поверхностного полусуточного прилива в Канадском арктическом архипелаге и системе водоемов Гудзонова залива (бассейн Фокс, Гудзонов залив и Гудзонов пролив) используется трехмерная конечно-элементная гидростатическая модель QUODDY-4. Приводятся оценки ошибок предсказания приливных колебаний уровня в девяти подобластях исследуемой области. Они, равно как и модельные параметры эллипсов баротропной скорости приливного течения, удовлетворительно согласуются с данными наземных измерений. Обсуждаются результаты моделирования энергетических характеристик (плотности, горизонтального волнового переноса и скорости диссипации баротропной приливной энергии).

Ключевые слова: приливы, моделирование, Канадский арктический архипелаг, система водоемов Гудзонова залива.

По ряду причин (труднодоступность, суровые погодные условия и сложность геометрии) поверхностные приливы в Канадском арктическом архипелаге (КАА) оказались изученными несравненно хуже, чем в любом другом географическом объекте умеренных и низких широт. Свидетельство тому — наличие лишь четырех работ [1—4], две из которых представлены в виде научно-технических отчетов, и еще две опубликованы в рецензируемых журналах. В перечисленных работах, говоря о КАА, мы говорим об области, ограниченной с юга параллелью 63° с.ш. Бассейн Фокс, Гудзонов залив и Гудзонов пролив в этих работах не рассматриваются. Между тем названные водоемы связаны с КАА так тесно, что без них понимание различного рода процессов, протекающих там, будет неполным. Имеются, правда, работы, прямо или косвенно относящиеся к проблеме моделирования циркуляции (в том числе приливной) в этих водоемах с учетом и без учета сезонного цикла морского льда. Все вместе эти водоемы называются системой водоемов Гудзонова залива и рассматриваются либо раздельно, либо совместно как система водоемов, находящихся за пределами КАА. К числу упомянутых работ относятся [5—7]. В отличие от них мы попытаемся воспроизвести поверхностный полусуточный прилив и его энергетику в КАА, включая систему водоемов Гудзонова залива. Другими словами, мы будем рассматривать КАА и систему водоемов Гудзонова залива как единую область, состоящую из многочисленных островов и разделяющих их проливов и ограниченную с запада и востока соответственно меридианами 120 и 54° з.д. и с севера и юга параллелями 83 и 55° с.ш. Такова была цель настоящей работы.

За основу была принята трехмерная, с координатами λ, φ и z (λ — долгота, φ — широта, z — высота, ориентированная вверх) конечно-элементная гидростатическая модель QUODDY-4 в версии однородного океана. Использование трехмерной модели обеспечивает более точное, нежели в двухмерной модели, описание эффектов придонного трения в придонном пограничном слое приливного потока. Подробная документация и описание избранного метода интегрирования уравнений модели приводятся в работах

[8—12]. Ее специфические детали обсуждаются в [4]. Поэтому во избежание повторений здесь напомним только, что дискретизация базисных и пробных функций проводится в ней с помощью простых призматических конечных элементов. Горизонтальное разрешение конечно-элементной сетки (рис. 1) принимается меняющимся от 2 км у береговой линии континента и островов до 42 км вдали от нее. По вертикали толща воды делится на 40 слоев переменной толщины со сгущением слоев в придонном слое. Шаг по времени задается равным 11.178 с. Необходимость выбора такого малого шага по времени диктуется перенесением в правую часть адвективных и горизонтальных диффузионных членов, фигурирующих в эволюционном уравнении для бароклинной составляющей скорости, обязанной отклонению от баротропной, т. е. средней по вертикали, или, иначе, сведением его к системе нестационарных одномерных (по вертикали) неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений. Приливная частота полагается соответствующей частоте приливной гармоники M_2 приливо-образующего потенциала, безразмерный коэффициент сопротивления в придонном слое — равным 5×10^{-3}. Задание этого несколько завышенного значения коэффициента сопротивления в трехмерной приливной модели по сравнению с каноническим его значением в двумерных приливных моделях обосновывается в [13]. Глубины заимствуются из одноминутного банка данных IBCAO (International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean, см [14]). Минимальные глубины фиксируются на отметке 5 м. Приливные колебания уровня на открытой границе определяются по результатам моделирования, найденным в [4, 15], с использованием высокоразрешающих приливных моделей, ассимилирующих всю имеющуюся (на то время) информацию о данных наземных и спутниковых измерений уровня. Влиянием льда на поверхностный прилив пренебрегается.

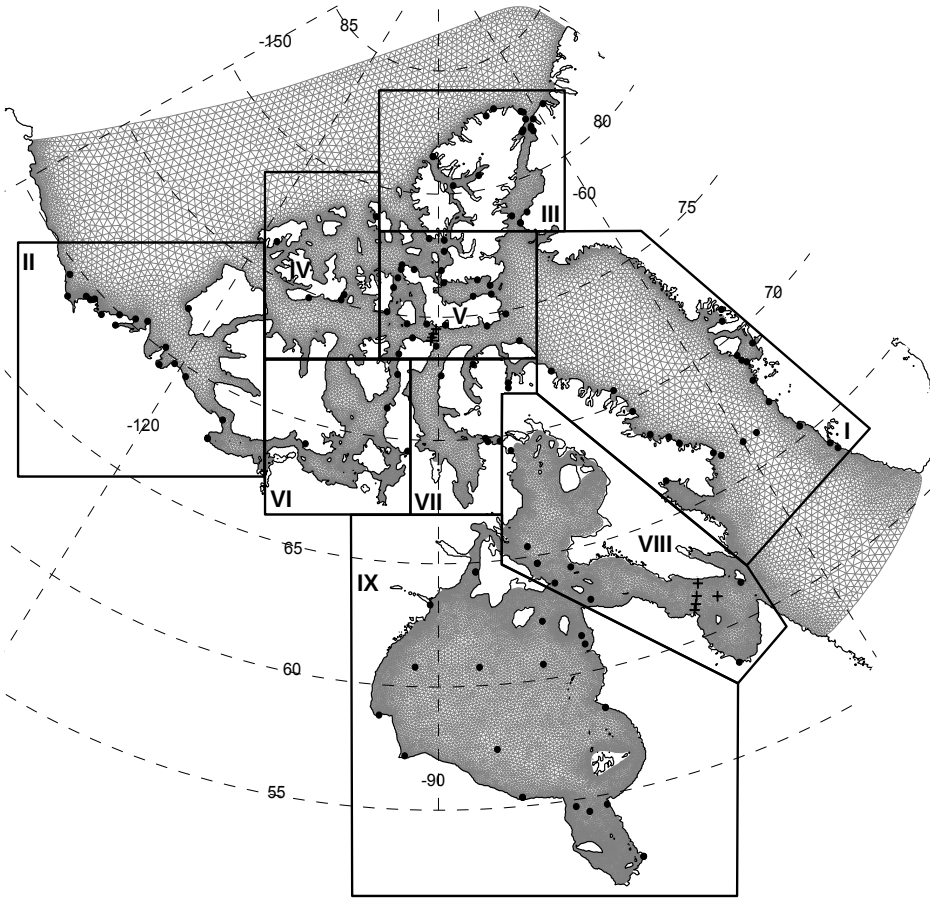

Рис. 1. Конечно-элементная сетка исследуемой области.
Точки — пункты наземных измерений уровня, крестики — станции измерений скорости.

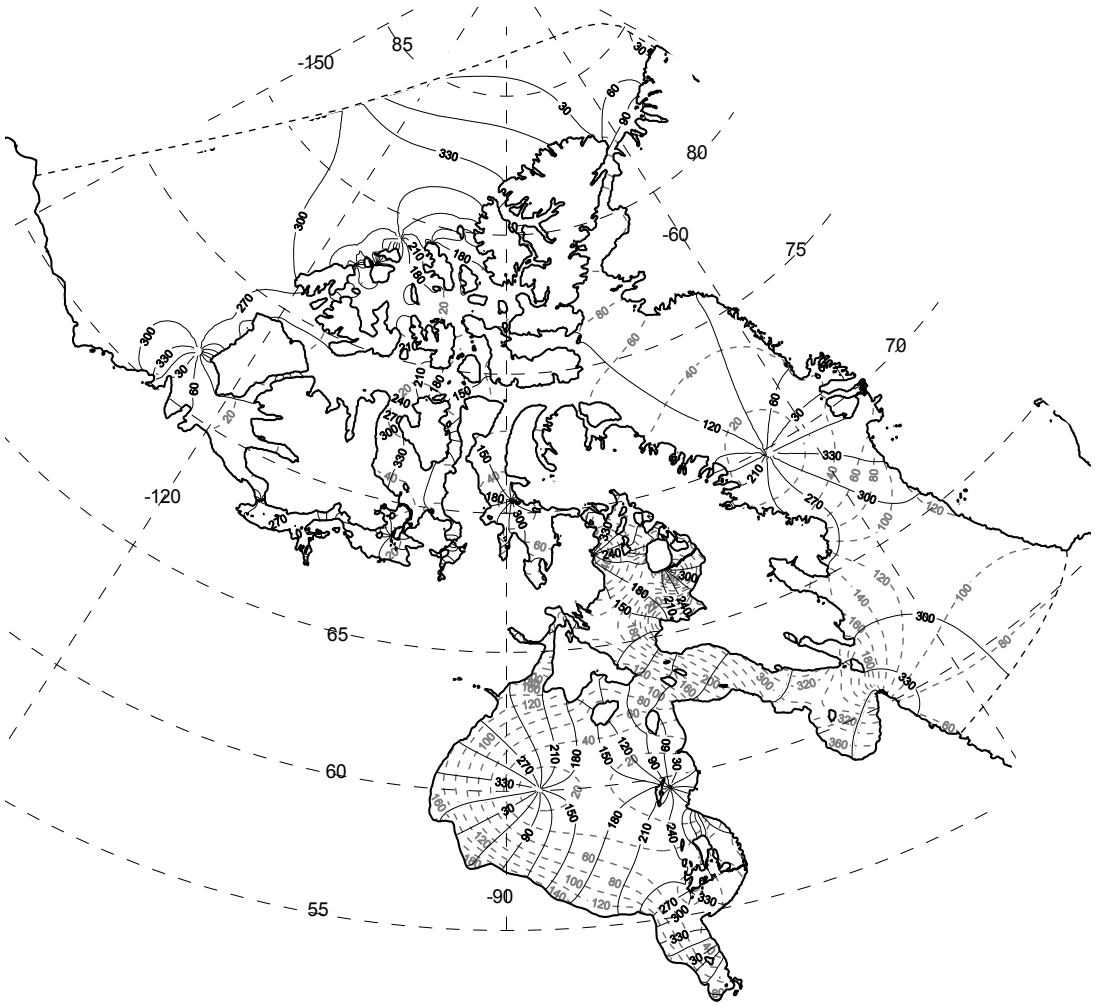

Рис. 2. Приливная карта исследуемой области.
Сплошные линии — изофазы (в градусах), штриховка — изоамплитуды (в см).

Полученные в рамках используемой модели результаты представлены в виде приливной карты волны M_2 в КАА, включая систему водоемов Гудзонова залива (рис. 2.). Перечислим, прежде всего, общие черты этой карты и карт, приведенных в [1—4]. Таковыми являются амфидромия левого вращения (с вращением изофаз против часовой стрелки) в прол. Девиса, амфидромия левого вращения между о-вами Виктория и Кинг-Уильям, вырожденная амфидромия с центром на о. Принца Уэльского и амфидромия левого вращения к западу от о. Банкс. К числу робастных (в смысле присутствующих на всех сравниваемых приливных картах) особенностей полей изоамплитуд и изофаз относятся также две амфидромии левого вращения в центральной и восточно-центральной частях Гудзонова залива, вторичная амфидромия левого вращения в районе о-вов Белчер (Гудзонов залива) и три вырожденные амфидромии в бассейне Фокс с центрами на п-вах Мелвилл и Фокс и на о. Принца Чарльза.

Наиболее заметные отличия этих приливных карт обнаруживаются к северу от о-ва Элсмир, где приливная карта в [1] и наши карты не выявляют каких-либо амфидромий, кроме вырожденной с центром на северном берегу острова, а приливные карты в [2, 3] свидетельствуют о существовании здесь двух амфидромий с неустановленным (из-за отсутствия оцифровки изофаз) направлением вращения. Напротив, на приливных картах, помещенных в [2. 3], не представлена амфидромия в окрестности о-вов Принца Патрика и Королевы Елизаветы, тогда как, судя по [1], здесь фигурируют две амфидромии левого вращения, а судя по [4], — цепочка трех амфидромий левого вращения, обу-

словленная, как и на Сибирском континентальном шельфе [16, 17], интерференцией падающей и отраженной волн Пуанкаре. Отличаются между собой и очертания изоамплитуд, а также изофаз в прол. Принс-Риджент, где амфидромия левого вращения (такой она изображена в [4] и на рис. 2 настоящей статьи) представлена в [1—3] как вырожденная. Итак, робастными можно признать 3 амфидромии левого вращения, находящиеся в прол. Дэвиса, к западу от о. Банкс и между о-вами Виктория и Кинг-Уильям, 3 амфидромии левого вращения в Гудзоновом заливе и 3 вырожденные амфидромии в бассейне Фокс. Остальные упоминавшиеся выше амфидромии (в т. ч. вырожденные) нуждаются в подтверждении. Такое подтверждение тем более необходимо, что в пяти рассматриваемых случаях (при использовании двухмерной конечно-разностной приливной модели в [1], двухмерной конечно-элементной приливной модели в [2, 3] и трехмерной конечно-элементной приливной модели в [4] и в настоящей статье) одни и те же предсказываемые значения приливных характеристик отличаются между собой и от данных наблюдений, по крайней мере в КАА, не так уже сильно.

То, что в КАА они не очень сильно отличаются от данных наблюдений, подтверждается сравнением предсказываемых и наблюдаемых амплитуд и фаз приливных колебаний уровня в отдельных пунктах (их общее число — 123) измерений уровня, которое показано на рис. 3. О степени близости амплитуд и фаз приливных колебаний уровня, полученных в разных приливных моделях, можно судить по результатам сравнения средних квадратических абсолютной и относительной комбинированных ошибок моделирования. Так, средняя квадратическая абсолютная комбинированная ошибка моделирования амплитуд и фаз приливных колебаний уровня составляет 15.8 см — Падмэна и Ерофеевой [1], 13.7 см — Данфи и др. [2], 13.4 см — Хана и др. [3], 14.2 см — авторов [4] и 14.5 см — наст. ст. без учета системы водоемов Гудзонова залива. В относительных единицах средняя квадратическая комбинированная ошибка моделирования равна 0.795, 1.368, 1.194, 1.042 и 0.908 соответственно. С учетом системы водоемов Гудзонова залива средние квадратические абсолютная и относительная комбинированные ошибки составляют 36.8 см и 0.892 соответственно. Ясно, что величина ошибки определяется в основном системой водоемов Гудзонова залива (см. ниже). О причинах этого будет сказано позже.

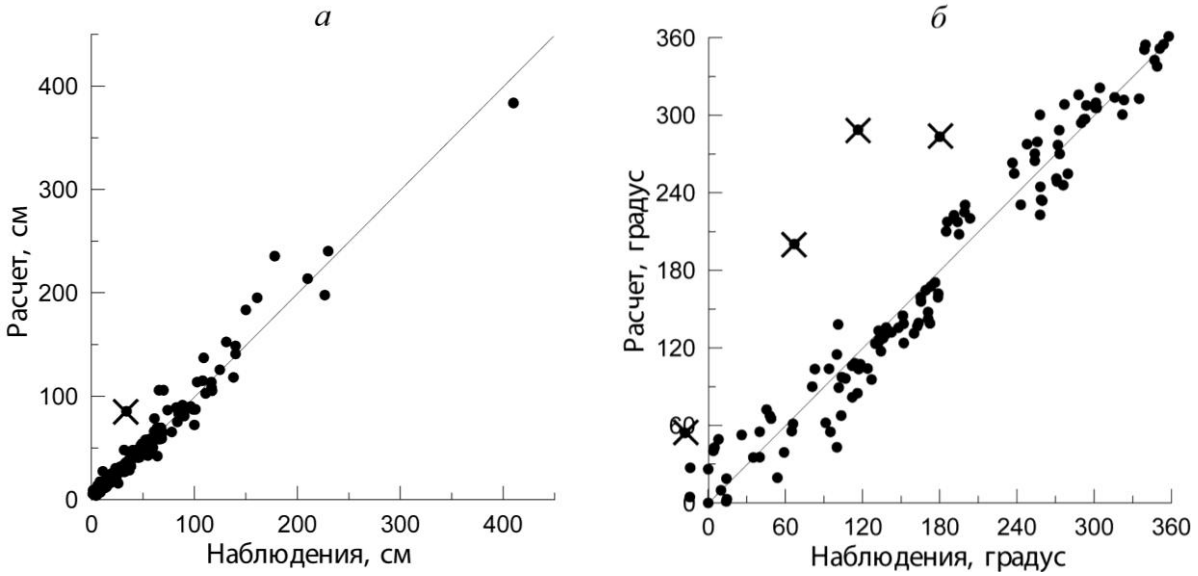

Рис. 3. Сравнение наблюдаемых и предсказываемых значений амплитуд (*а*) и фаз (*б*) приливных колебаний уровня в исследуемой области.
Крестики — амплитуды и фазы, исключенные из числа имеющихся для сравнения с результатами моделирования.

Как было справедливо замечено в [2, 3], применение одинаковых ошибок моделирования в районах с большими и малыми амплитудами прилива спорно. Поэтому чтобы исключить возможные дискуссии, в [2, 3] было признано целесообразным разделить исследуемую область на 7 подобластей (рис. 1) примерно с одинаковыми амплитудами приливных колебаний уровня. К их числу относятся подобласть I (море Баффина), западная подобласть II (зал. Амундсена и о-ва Виктория), северная подобласть III (о-ва Элсмир и прол. Нансена), северо-западная подобласть IV (о-ва Принца Патрика, Мелвина и Эллеф-Рингнес, разделяющие их проливы), центральная подобласть V (прол. Барроу, Ланкастер и Джонс), юго-центральная подобласть VI (прол. Мак-Клинток и о-ва Сомерсет) и юго-восточная подобласть VII (северная часть о-ва Баффинова Земля и примыкающая к ней акватория). Добавим к этому перечню следующие две подобласти: бассейн Фокс вместе с Гудзоновым проливом (подобласть VIII) и отдельно рассматриваемый Гудзонов залив (подобласть IX). Соответствующие этим подобластям средние квадратические абсолютные и относительные комбинированные ошибки предсказания приливных колебаний уровня сведены в табл. 1. Средние квадратические ошибки в подобластях II, III и IX даются здесь в двух вариантах: 1) пункты регистрации уровня с наибольшими ошибками учитываются, 2) не учитываются. Исключение ряда пунктов из имеющихся для сравнения с результатами моделирования обусловлено, помимо прочего, большими погрешностями определения их координат по мелкомасштабной карте, приведенной в [5]. Поскольку в системе водоемов Гудзонова залива эти пункты регистрации уровня располагаются там, где амплитуды и фазы прилива претерпевают большие изменения, даже сравнительно малые погрешности в определении координат этих пунктов способны вызвать заметные вариации искомых приливных характеристик. Такова, по-видимому, возможная причина того, почему присоединение к КАА системы водоемов Гудзонова залива приводит к более чем двухкратному увеличению (по сравнению с КАА) средней квадратической абсолютной комбинированной ошибки расчета приливных колебаний уровня. Исключение из их числа всего лишь нескольких пунктов с наибольшими расхождениями между наблюдаемыми и предсказываемыми значениями амплитуд и фаз приливных колебаний уровня способствует уменьшению ошибки примерно в 1.5 раза. Однако и в этом случае она все еще остается больше таковых в отдельных подобластях КАА, свидетельствуя в пользу ужесточения требований к точности определения координат пунктов регистрации уровня в районах с резкими изменениями приливных характеристик. В относительных единицах средняя квадратическая комбинированная ошибка расчета составляет 0.892 и уменьшается до 0.472 при отбрасывании пунктов регистрации, в которых расхождения между наблюдениями и предсказываемыми значениями амплитуд и фаз приливных колебаний уровня оказываются наибольшими. Другой причиной может быть неадекватное задание амплитуд и фаз приливных колебаний уровня на южной границе исследуемой области, оценка которых производилась без учета их наблюдаемых значений в Гудзоновом заливе и бассейне Фокс. Какая из этих причин более правдоподобна, не ясно. Ясно только, что обе они имеют право на существование.

Как и в [4], наши абсолютные комбинированные ошибки в одних подобластях больше, в других меньше приведенных в [1—3]. Они больше там, где количество эмпирических данных невелико или наблюдаемые значения амплитуд малы, или погрешности определения координат пунктов наземных измерений уровня велики; меньше же их там, где эти условия не выполняются. Примечательно, что расхождения между различными ошибками остаются примерно одинаковыми вне зависимости от того, ассимилируются ли данные измерений, как это было сделано в работе [1—3], или использование такой процедуры вообще не предусматривалось, как это было принято в [4] и в настоящей статье. Тем самым выясняется, что в ограниченном бассейне, каковым является КАА, включая систему водоемов Гудзонова залива, удовлетворительное согласие между

наблюдаемыми и предсказываемыми значениями амплитуд и фаз приливных колебаний уровня может быть достигнуто без ассимиляции данных измерений уровня и/или даже без корректировки глубин, а только за счет надлежащей дискретизации исследуемой области и использования достоверной информации о приливных колебаний уровня на ее открытой границе. К такому же заключению пришли авторы работы [18].

Из всех проливов КАА данные измерений скорости приливного течения имеются в проливах Барроу и Гудзоновом. Сведения о местоположении пунктов измерений содержатся в [2, 3, 19]. Воспользуемся ими для проверки наших результатов моделирования и аналогичных результатов, приведенных в [2—4]. Видно (табл. 2), что при использовании обеих конечно-элементных приливных моделей соответствие между наблюдаемыми и предсказанными значениями большой полуоси (максимальной скорости) приливного течения и эксцентриситета приливных эллипсов можно оценить как удовлетворительное, хотя наши оценки согласуются с данными наблюдений несколько хуже, чем в [3]. Можно предположить, что причиной этого являются корректировка глубин с учетом последних измерений, не имеющихся в нашем распоряжении.

Таблица 1

Средние квадратические абсолютная и относительная комбинированные ошибки предсказания амплитуд и фаз приливных колебаний уровня в различных подобластях исследуемой области

Подобласть	Абсолютная ошибка, см					Относительная ошибка				
	[1]	[2]	[3]	[4]	Настоящая работа	[1]	[2]	[3]	[4]	Настоящая работа
I	26.2	16.4	16.3	12.5	17.4	0.379	0.454	0.473	0.388	0.370
II	10.0	12.8	13.7	11.9	8.5/8.4	0.706	1.365	1.533	1.696	1.447/0.598
III	14.3	14.9	14.7	14.5	14.2/14.5	0.401	2.801	2.185	1.559	1.345/0.428
IV	3.5	7.4	7.4	13.4	12.5	0.181	0.350	0.291	0.568	0.522
V	6.4	12.1	11.8	17.6	15.9	0.107	0.229	0.229	0.425	0.360
VI	6.1	6.9	7.6	10.1	10.8	0.918	0.631	0.687	0.593	0.831
VII	7.2	14.0	11.4	15.8	14.9	0.129	0.257	0.211	0.297	0.278
VIII	—	—	—	—	68.4	—	—	—	—	0.458
IX	—	—	—	—	78.0/58.6	—	—	—	—	0.937/0.591

Примечание. Прочерки — отсутствие необходимых сведений.

Таблица 2

Сравнение наблюдаемых и предсказываемых значений большой полуоси и эксцентриситета эллипсов баротропной составляющей скорости приливного течения

Станция	Большая полуось, см/с					Эксцентриситет				
	Наблюдения	[2]	[3]	[4]	Настоящая работа	Наблюдения	[2]	[3]	[4]	Настоящая работа
A143839	8.9	7.9	8.6	8.0	7.1	−0.079	−0.022	−0.022	−0.088	+0.050
A1441	8.9	7.8	8.5	6.6	6.5	−0.168	−0.019	−0.075	+0.104	−0.045
A1443	9.8	7.9	9.1	7.8	7.7	−0.137	−0.072	−0.080	−0.060	−0.064
A1445	9.3	8.5	8.4	7.6	7.8	+0.013	−0.074	−0.343	+0.036	−0.001

Примечание. Знак минус перед величиной эксцентриситета указывает на направление вращения вектора скорости по часовой стрелке, знак плюс − против.

Далее, по данным наблюдений, наибольшая амплитуда продольной (вдольбереговой) составляющей скорости на самой мелководной ст. HS4 в Гудзоновом проливе превышает 40 см/с. На остальных станциях амплитуды продольной составляющей изменяются от 20 (ст. HS2) до 38 см/с (HS5). Эксцентриситет эллипсов на всех станциях варьирует в интервале от 0.14 до 0.25; вектор скорости вращается по часовой стрелке. По результатам моделирования, максимальная скорость приливного течения равна 42.9 (ст. HS4), 26.7 (ст. HS2) и 32.8 см/с (ст. HS5); эксцентриситет эллипсов +0.152, −0.198 и −0.153 соответственно (здесь знак «+» или «−» перед эксцентриситетом характеризует то или иное направление вращения вектора скорости, см. табл. 2). Направление вращения вектора скорости такое же на ст. HS2 и HS5 и противоположное на ст. HS4. Как видно, согласие между наблюдаемыми и предсказываемыми параметрами эллипсов приливного течения получается более или менее удовлетворительным. Это позволяет надеяться, что и в других районах КАА модельные оценки согласуются с данными наблюдений надлежащим образом.

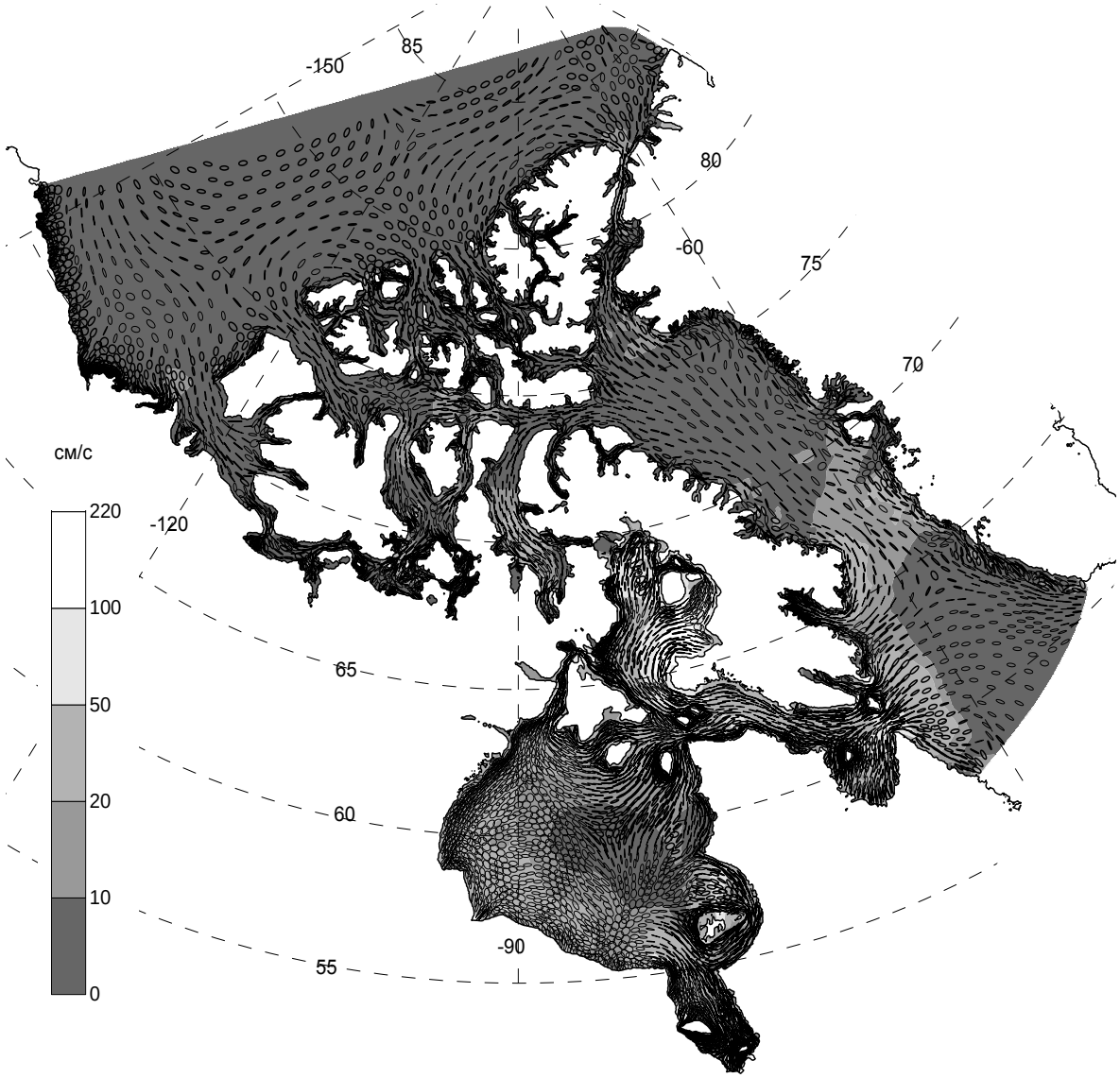

Рис. 4. Максимальная баротропная скорость (в см/с)
и эллипсы баротропной скорости приливного течения.
Черные эллипсы соответствуют антициклоническому вращению вектора скорости,
серые — циклоническому вращению.

Пространственное распределение максимальной скорости и эллипсов приливного течения представлено на рис. 4. Видно, что наибольшие максимальные скорости отмечаются на периферии Гудзонова залива, в восточной части бассейна Фокс, в Гудзоновом пролива, в отдельных частях прол. Дэвиса, в бассейне Кейн и в районе п-ва Тактояктук. Здесь максимальные скорости могут достигать, например в восточной части бассейна Фокс, 100 см/с и более. Пространственное распределение эллипсов указывает на тенденцию к вырождению их в прямые линии (приливные течения становятся реверсивными) в узких проливах. Исключениями являются только прол. Дэвиса, море Баффина, Гудзонов залива, западная и центральная части бассейна Фокс, прол. Мак-Клюри и Арктический шельф. Здесь годограф скорости имеет четко выраженную эллиптическую форму. Направление вращения вектора, в общем, меняется от района к району. Преобладает циклоническое вращение, хотя в некоторых районах КАА, скажем, в прол. Дэвиса и море Баффина, в Гудзоновом заливе, на периферии бассейна Фокс и в отдельных частях Арктического шельфа, имеет место антициклоническое вращение вектора скорости.

Пространственное распределение средней (за приливный цикл) плотности баротропной приливной энергии изображено на рис. 5. Нетрудно видеть, что максимальные значения плотности, достигающие, а иногда, как это имеет место, например, в западной части Гудзонова пролива, превосходящие 10^4 Дж/м^2, выявляются в Гудзоновом пролива и юго-восточной части бассейна Фокс, минимальные (до 10^2 Дж/м^2) — на Арктическом шельфе. На остальной части КАА рассматриваемая характеристика принимает промежуточные значения — от 10^2 до 5×10^3 Дж/м^2. Средняя (за приливный цикл) интегральная (по площади проливов) плотность баротропной приливной энергии составляет 0.16×10^{17} Дж.

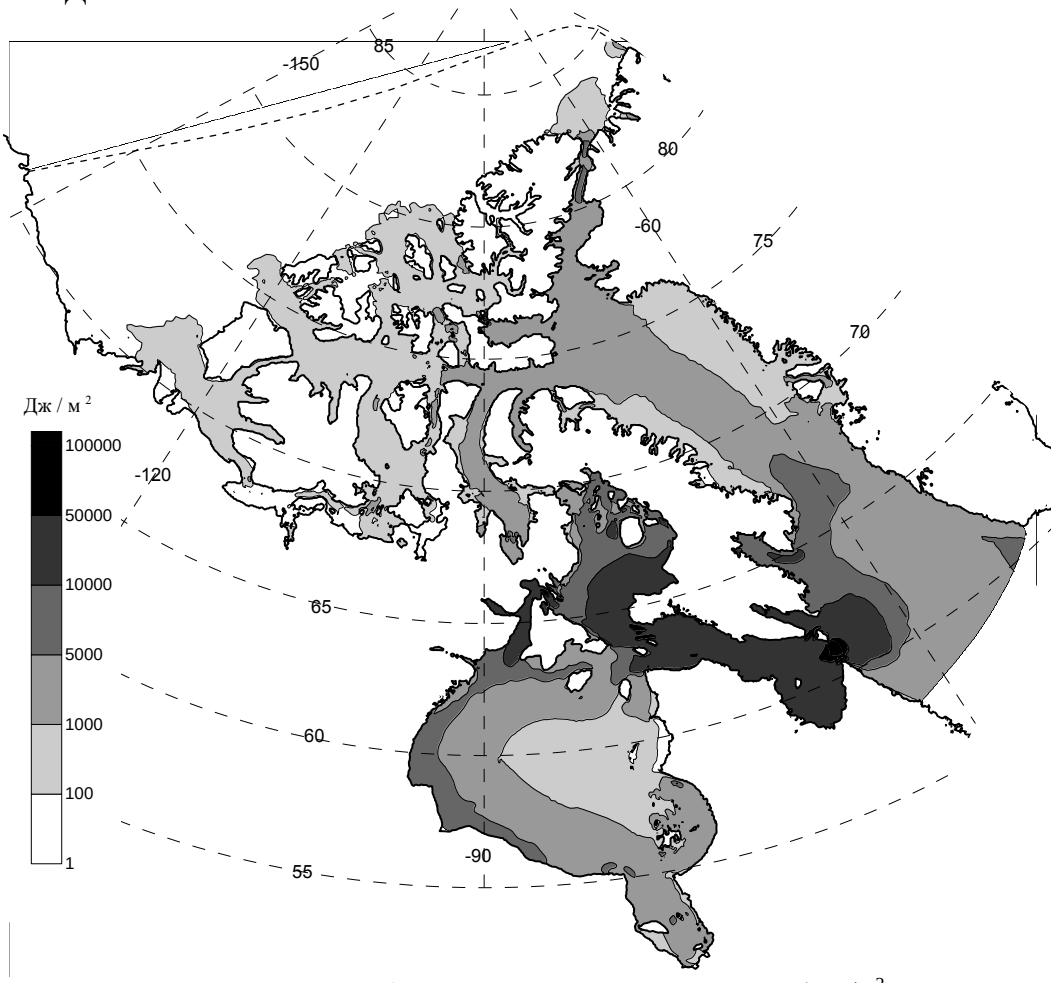

Рис. 5. Плотность баротропной приливной энергии (Дж/м^2).
Значения плотности баротропной приливной энергии показаны разными оттенками.

Средний (за приливный цикл) горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии (рис. 6) максимален в глубоководных частях прол. Дэвиса и моря Баффина, где он образует 3 круговорота (один мезомасштабный — в северной части моря Баффина и 2 крупномасштабных — в южной части моря Баффина и прол. Дэвиса), в Гудзоновом заливе, где вокруг центров амфидромий формируются 3 круговорота, в Гудзоновом проливе, где он имеет в основном зональное направление, и в бассейне Фокс, где его направление меняется на северное. Минимальные значения горизонтального волнового переноса обнаруживаются на Арктическом шельфе, в восточной и западной частях которого образуются 2 крупномасштабных круговорота: и в проливе между материком и о-вами Банкс и Виктория. Мы уже отмечали [4] (и представленные здесь результаты моделирования это подтверждают), что горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии в КАА не имеет предпочтительной ориентации. В одних проливах он направлен в сторону Северной Атлантики, в других — в сторону Северного Ледовитого океана.

Пространственное распределение средней (за приливный цикл) скорости диссипации баротропной приливной энергии в исследуемой области (рис. 7) имеет пятнистую структуру с явной интенсификацией диссипации в мелководных районах. Максимальные значения диссипации детектируются в бассейне Фокс, Гудзоновом заливе, Гудзоновом проливе, прол. Принс-Риджент и у п-ва Тактояктук, минимальные — на Арктическом шельфе и к югу от о-ва Банкс. Интегральная (по площади проливов) скорость диссипации баротропной приливной энергии равна 0.11×10^{12} Вт.

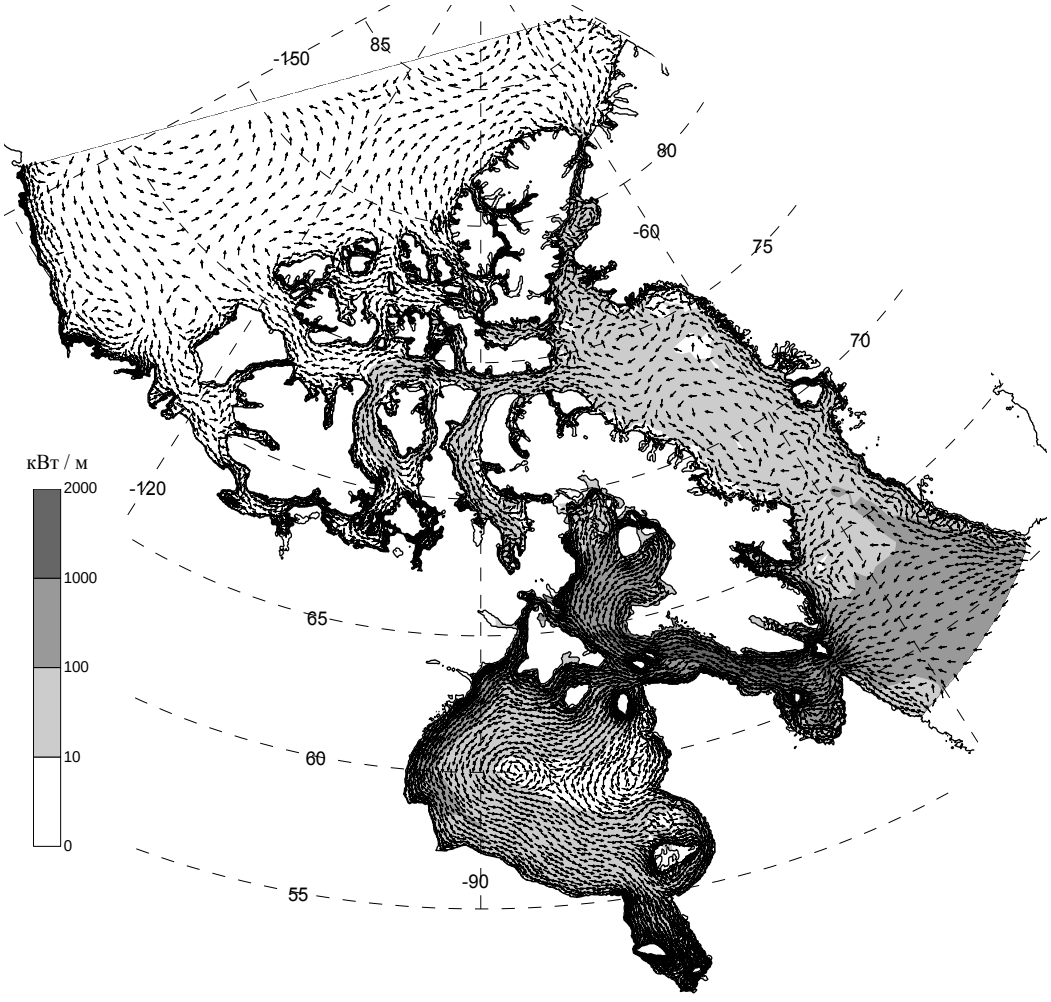

Рис. 6. Горизонтальный волновой перенос баротропной приливной энергии (Вт/м).
Значения горизонтального волнового переноса показаны разными оттенками.

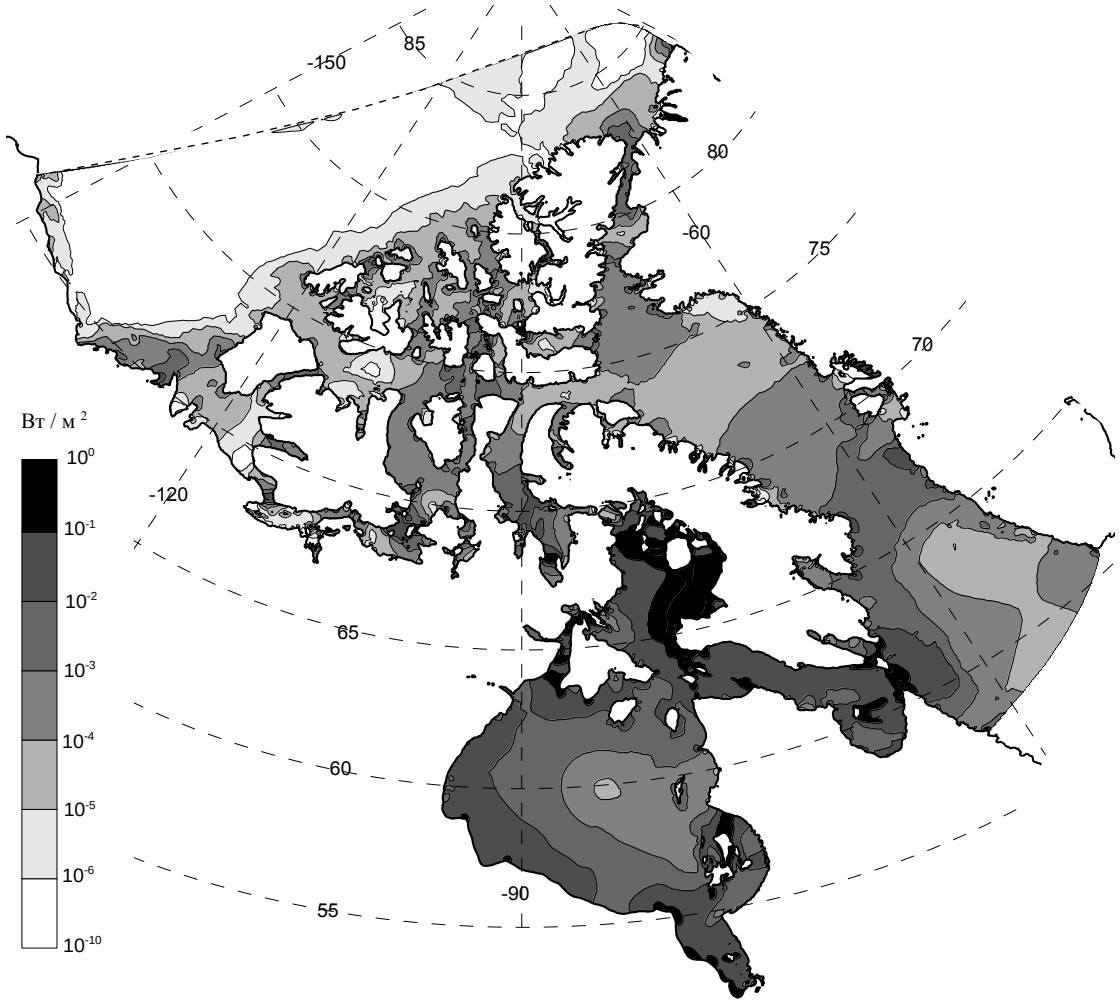

Рис. 7. Диссипации баротропной приливной энергии (Вт/м^2).
Значения диссипации баротропной приливной энергии показаны разными оттенками.

Теперь, располагая средними (за приливный цикл) интегральными (по площади проливов) плотностью и скоростью диссипации баротропной приливной энергии, можно найти оценку времени диссипации, определяемую как отношение указанных величин. Она, как оказалось, составляет около 40 ч, т. е. примерно в 4 раза больше, чем в Мировом океане в целом [20], и в два с лишним раза меньше, чем в КАА без системы водоемов Гудзонова залива [4]. Увеличение времени диссипации в КАА, включая систему водоемов Гудзонова залива, связано с преобладанием плотности баротропной приливной энергии по сравнению с ее значением в Мировом океане, а ее уменьшение там же по сравнению с КАА без системы водоемов Гудзонова залива — с преобладанием диссипации. Можно допустить, что в Мировом океане присутствуют и другие, кроме КАА, более эффективные стоки баротропной приливной энергии и что в рассматриваемой области именно эта система водоемов является основным стоком баротропной приливной энергии.

Авторы признательны д-ру П. Св. Лауренту, сообщившему координаты станций измерений уровня в системе водоемов Гудзонова залива и в заливах Джеймс и Унгава.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00110а).

Литература

1. *Padman L., Erofeeva S.* A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophys. Res. Let. 2004. V. 31, N. 2. doi: 1029/ 2003. GL019003.

2. *Dunphy M., Dupont F., Hannah C. G., Greenberg D.* Validation of modeling system for tides in the Canadian Arctic Archipelago. 2005. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. XXX: vii + 68 p. (http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/SCI/osap/projects/webtide/docs/ Dunphyetal2005.pdf).
3. *Hannah C. G., Dupont F., Dunphy M., Greenberg D.* Revisions to a modelling system for tides in the Canadian Arctic Archipelago. 2008. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 259: vi + 62 p. (http://www.dfo-mpo.gc.ca/Library/332543.pdf.).
4. *Каган Б. А., Софьина Е. В.* Пространственная структура приливной волны M_2 в районе Канадского Арктического архипелага // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 2. С. 267—280.
5. *Freeman N. G., Murty T. S.* Numerical modeling of tides in Hudson Bay // J. Fish Res. Board Can., 1976. V. 33. P. 2345—2361.
6. *Saucier F. J., Senneville S., Prinsenberg S. F.* et al. Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada // Climate Dynamics. 2004. V. 23. P. 303—326.
7. *St-Laurent P., Saucier F. J., Dumais J.-F.* On the modification of tides in a seasonally ice-covered sea // J. Geophys. Res., 2008. V. 113. C11014, doi:10.1029/2007JC004614.
8. *Lynch D. R.* Three-dimensional diagnostic model for baroclinic, wind driven and tidal circulation in shallow seas; FUNDY 4 user's manual. Dartmouth College. Numerical Methods Laboratory Report N NML-92-2. Hanover, New Hampshire, USA, 1990. 23 p.
9. *Lynch D. R., Gray W. G.* A wave equation model for finite element tidal computations // Comput. Fluids, 1979. V. 7. P. 207—228.
10. *Lynch D. R., Werner F. E.* Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part I: Linearized harmonic model // Int. J. Num. Methods in Fluids. 1987. V. 7(9). P. 871—909.
11. *Lynch D. R., Werner F. E.* Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part II: Nonlinear time-stepping model // Int. J. Num. Methods in Fluids. 1991. V. 12. P. 507—533.
12. *Ip J.T.C., Lynch D. R.* QUODDY-3 User's Manual: Comprehensive coastal circulation simulation using finite elements: Nonlinear prognostic time-stepping model. Thayler School of Engineering. Dartmouth College. Hanover, New Hampshire. Report Number NML 95-1. 1995.
13. *Каган Б. А., Тимофеев А. А., Рашиди Э. Х. А.* Влияние пространственной неоднородности коэффициента сопротивления на динамику приливной волны M_2 в Белом море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 487—500.
14. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean / National Geophys. Data Center.–Boulder, Co. USA: NGDC, 2008: (http://www.ibcao.org/) .
15. *Egbert G. D., Erofeeva S. Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Atmos. Oceanic Technol. 2002. V. 19. P. 183—204.
16. *Androsov A. A., Liberman Yu. M., Nekrasov A. V., Romanenkov D. A., Voltzinger N. E.* Numerical study of the M_2 tide on the North Siberian shelf // Cont. Shelf Res. 1998. V. 18, N 7. P. 715—738.
17. *Kagan B. A., Romanenkov D. A., Sofina E. V.* Tidal ice drift and ice-generated changes in tidal dynamics/energetics of the Siberian continental shelf // Cont. Shelf Res. 2008. V. 28, N 3. P. 351—368.
18. *Chen C., Gao G., Qi J.* et al. A new high-resolution unstructured grid finite volume Arctic Ocean model (AO-FVCOM): An application for tidal studies // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, C08017, doi:10.1029/2008JC004941.
19. *Drinkwater K. F.* On the mean and tidal currents in Hudson Strait // Atmosphere-Ocean, 1988. V. 26. P. 252—266.
20. *Манк У., Макдональд Г.* Вращение Земли. 1964. М.: Мир. 381 с. (пер. с англ.).

Статья поступила в редакцию 12.03.2013 г.