

УДК 551.466.7

© Б.А.Каган, А.А.Тимофеев, 2013

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН
timofeev@ioras.nw.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПРИЛИВА M_2 В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГОВ ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА И ШПИЦБЕРГЕН

Существующие модели воспроизводят противоречивую картину приливов в районе архипелагов Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) и Шпицберген. Для ее уточнения мы воспользовались трехмерной конечно-элементной гидростатической моделью QUODDY-4. Интересующий нас район изучался не изолированно, а как элемент приливной динамики Баренцева моря. Показано, что в этом районе нет никаких других амфидромий, кроме вырожденной амфидромии с центром на о.Зап.Шпицберген. Еще две специфические для данного района особенности: наличие локального антициклонального круговорота баротропной приливной энергии вокруг арх.Шпицберген и преобладание (примерно на порядок величины) значений этого приливного круговорота в районе арх.Шпицберген по сравнению с приведенными значениями в районе арх.ЗФИ.

Ключевые слова: поверхностный прилив M_2 , моделирование, архипелаг Земля Франца-Иосифа, архипелаг Шпицберген.

Пожалуй, в Мировом океане найдется не так уж много мест со столь противоречивой, по данным различных литературных источников, картиной приливов, как в районе архипелагов Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) и Шпицберген. Проиллюстрируем сказанное на примере некоторых работ. Согласно данным О.А.Владимирова и В.Б.Титова [1], здесь детектируется сгущение изофаз, а по данным Л.А.Сгибневой [2], к западу от о.Александры (ЗФИ) фиксируются амфидромия правого вращения (с вращением изофаз по часовой стрелке) и сгущение изофаз в районе арх.Шпицберген. Наоборот, по [3], к западу от о.Александры обнаруживается амфидромия левого вращения, тогда как район арх.Шпицберген по-прежнему характеризуется сгущением изофаз. Такая же амфидромия присутствует на приливной карте [4]. Центры еще двух вырожденных амфидромий детектируются на арх.ЗФИ и Шпицберген. Сгущение изофаз в районе арх.Шпицберген обнаруживается также в работах Е.Швидерского [5], Б.Гъевика и др. [6]. Однако Б.Гъевик и др. [6] рисуют к западу от о.Александры амфидромию с неопределенным (из-за отсутствия оцифровки) вращением изофаз, а другие два автора – З.Ковалик и А.Прошутинский [7] – амфидромию левого вращения. Такая же амфидромия наблюдается и в другой работе этих авторов [8]. По их данным, в районе о.Александры образуется амфидромия с неопределенным вращением изофаз. Наконец, в районе архипелагов ЗФИ и Шпицберген отмечается сгущение изофаз [9], а по данным [10], оно преобразуется в вырожденную амфидромию. Картина прилива M_2 в исследуемом районе весьма противоречива и нуждается в уточнении. Именно в этом и состоит цель настоящего сообщения.

Для достижения намеченной цели воспользуемся трехмерной конечно-элементной гидростатической моделью QUODDY-4. Отдельные ее блоки и модель в целом были подробно описаны в [11–16]. Поэтому во избежание повторений ограничимся только перечислением тех особенностей модели, которые специфичны для данного района. Предварительно отметим, что интересующий нас район изучался не изолированно, а как элемент приливной динамики Баренцева моря. Поэтому воспроизведение приливов осуществлялось во всем море, после чего в исследуемой области выделялся интересующий нас

район архипелагов ЗФИ и Шпицберген. Поверхность моря принималась свободной ото льда. На открытой границе области приливные колебания уровня считались заданными. Они определялись по результатам моделирования, полученным с использованием высококоразрешающей арктической приливной модели [9]. На жидкой границе области ставилось условие скольжения для касательной составляющей баротропной (средней по вертикали) скорости. Такое же условие задавалось на твердой границе области. Кроме того, нормальная составляющая баротропной скорости здесь полагалась равной нулю. В начальный момент времени ставились условия покоя для u - и v -составляющих скорости и отсутствия реликтовой турбулентности.

Разрешение конечно-элементной сетки считалось зависящим от локальной глубины: чем меньше глубина, тем тоньше выбиралось сеточное разрешение. В результате оно варьировалось от 1.2 км вблизи побережий до 24 км в глубоководных частях области. В районе архипелагов ЗФИ и Шпицберген сеточное разрешение принималось равным примерно 4 км. Временной шаг задавался равным 11.178 с, приливная частота – соответствующей гармонике M_2 . Поле глубин заимствовалось из базы данных ИВСАО. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости рассчитывался по формуле Смагоринского [17]. Коэффициент сопротивления считался постоянным и равным 0.005.

Уравнения модели интегрировались до установления квазипериодического режима. Последний полагался установившимся, когда относительное изменение во времени средней (за приливный цикл) плотности баротропной приливной энергии становилось меньше 1 %. Это условие выполнялось по истечении 23 приливных циклов после начала расчета. После того как квазипериодический режим устанавливался, интегрирование уравнений продолжалось в течение еще одного приливного цикла; затем оно прекращалось, и посредством гармонического анализа определялись амплитуда и фаза приливных колебаний уровня, параметры эллипсов баротропной скорости приливного течения и составляющие бюджета баротропной приливной энергии.

На рис.1 и 2 приведены карты изоамплитуд и изофаз приливных колебаний уровня в Баренцевом море. В увеличенном масштабе фрагменты этих карт изображены на врезках. Как видно, полученные карты, в общем, подтверждают сложившиеся представления о пространственной структуре изучаемого явления в Баренцевом море. Именно представленные карты указывают на существование двух амфидромий левого вращения с центрами, расположенными на Шпицбергенской банке и вблизи южного побережья овов Новая Земля. Появление первой из них связано с взаимодействием прямой волны Кельвина, генерируемой на свале глубин у западной границы моря, с обратной волной пока неустановленной природы. Последняя распространяется на запад, вдоль участка северной границы Баренцева моря, образуемого архипелагами ЗФИ и Шпицберген. Сведений о составе элементарных мод, образующих обратную волну в Баренцевом море, пока нет. Предположительно она представляет собой либо волну Кельвина, либо ряд захваченных шельфовых волн (только они могут существовать выше критической широты [18, 19], на которой приливная и инерционная частоты совпадают). Появление второй амфидромии обусловлено обеганием прямой волны Кельвина колгуево-вайгачского и новоземельского побережий. На основе поля изоамплитуд приливных колебаний (рис.1, 2) удастся установить два новых факта: во-первых, образование вырожденной амфидромии с центром на о.Зап.Шпицберген, во-вторых, уменьшение амплитуд приливных колебаний уровня с 15 до 10 см с востока на запад в районе ЗФИ и их увеличение с 20 до 50 см, а затем уменьшение с 50 до 40 см в районе арх.Шпицберген.

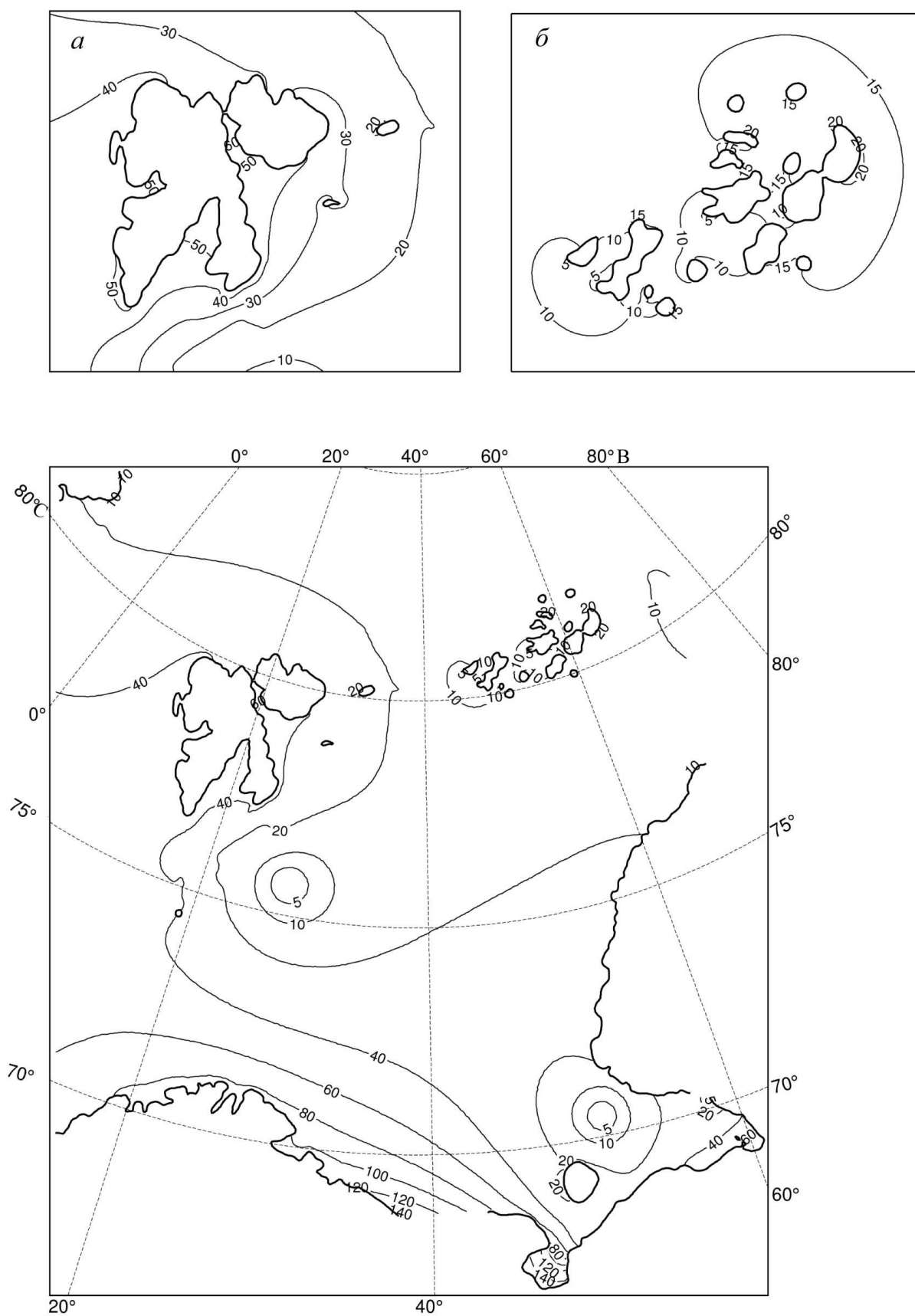


Рис.1. Поле изоамплитуд приливных колебаний уровня (в см) в Баренцевом море.
На врезках – поля в увеличенном масштабе в районе архипелага Шпицберген (а) и ЗФИ (б).

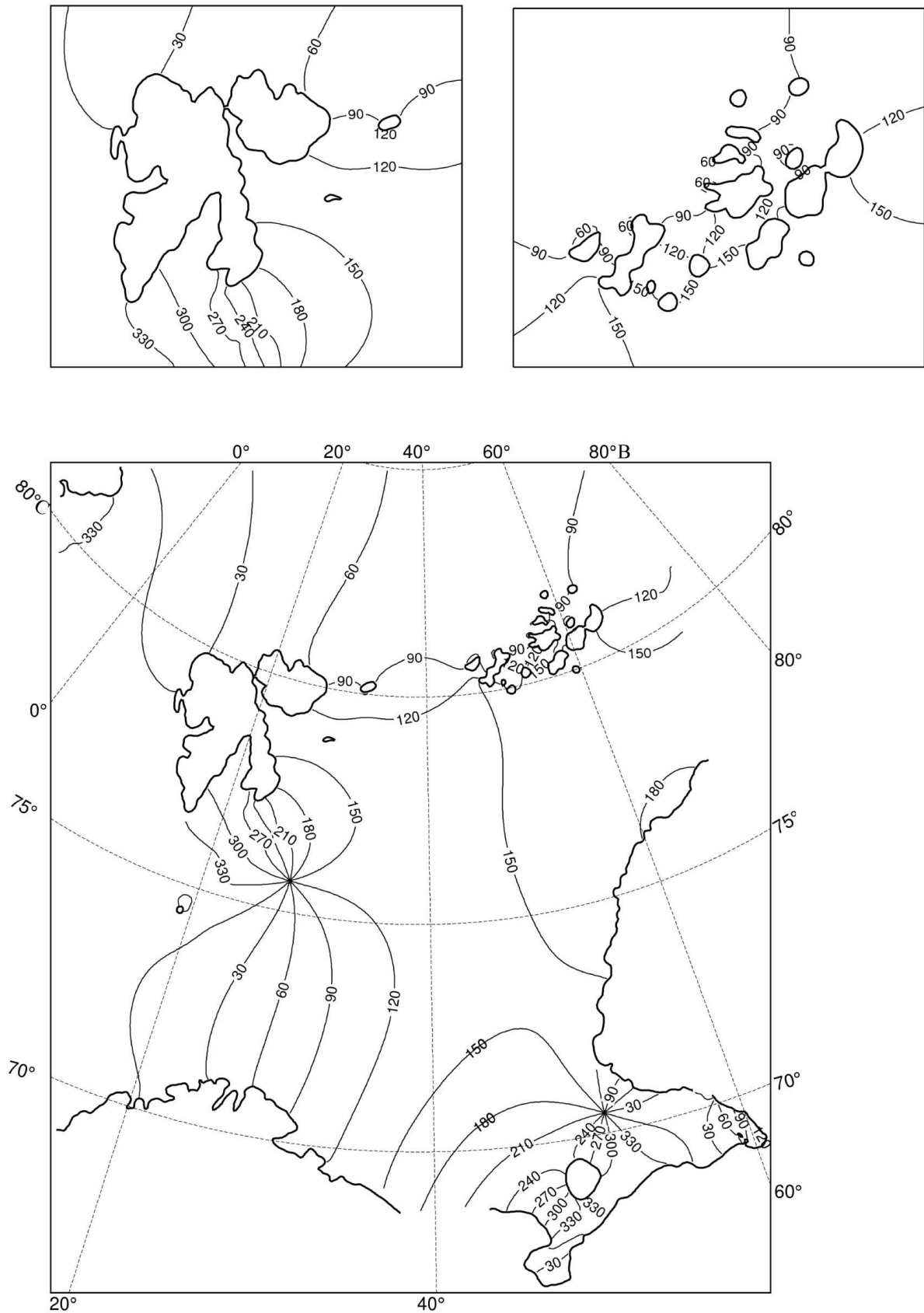


Рис.2. Карта фаз приливных колебаний уровня (в градусах).

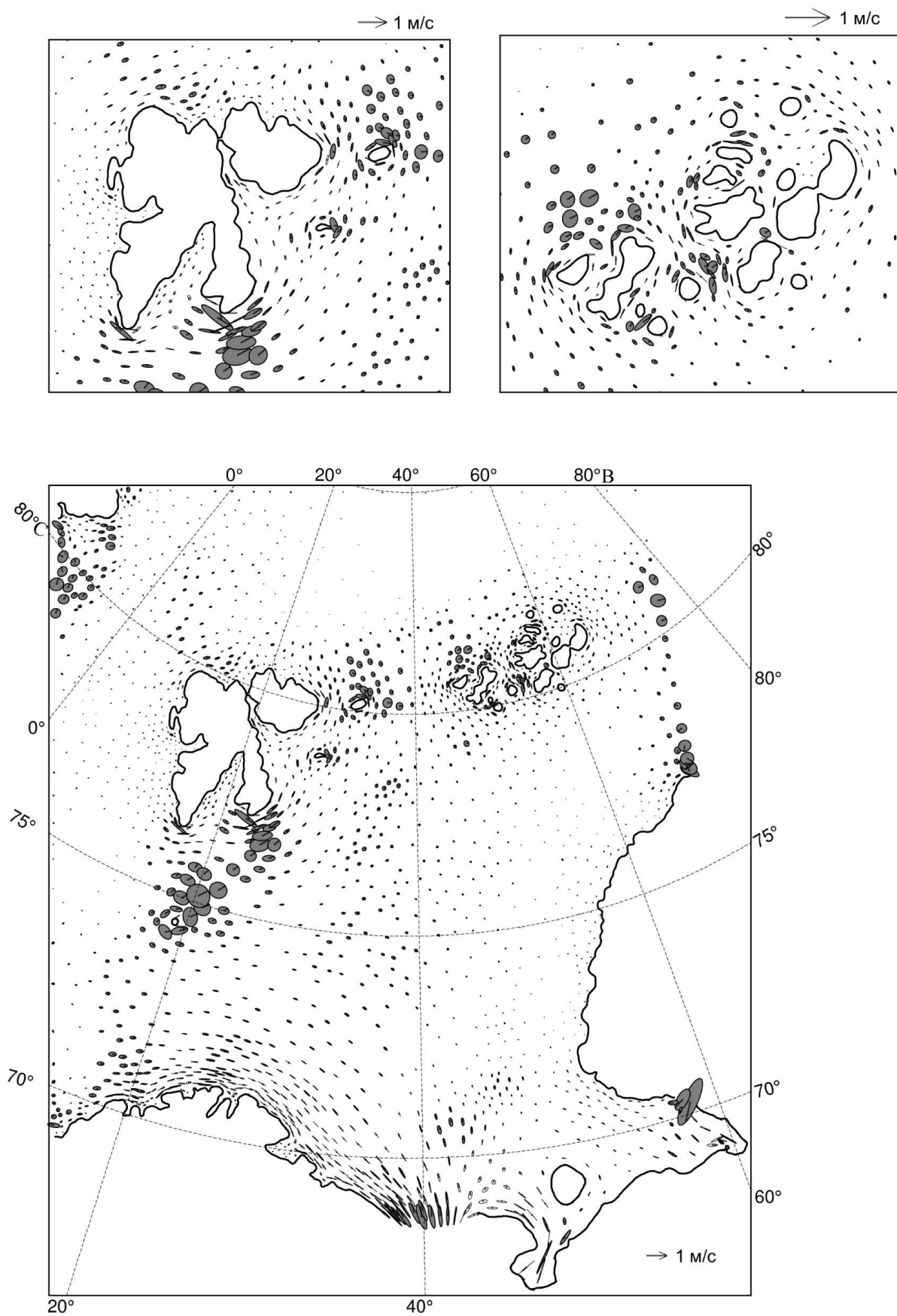


Рис.3. Карта поля эллипсов баротропной скорости (в м/с).

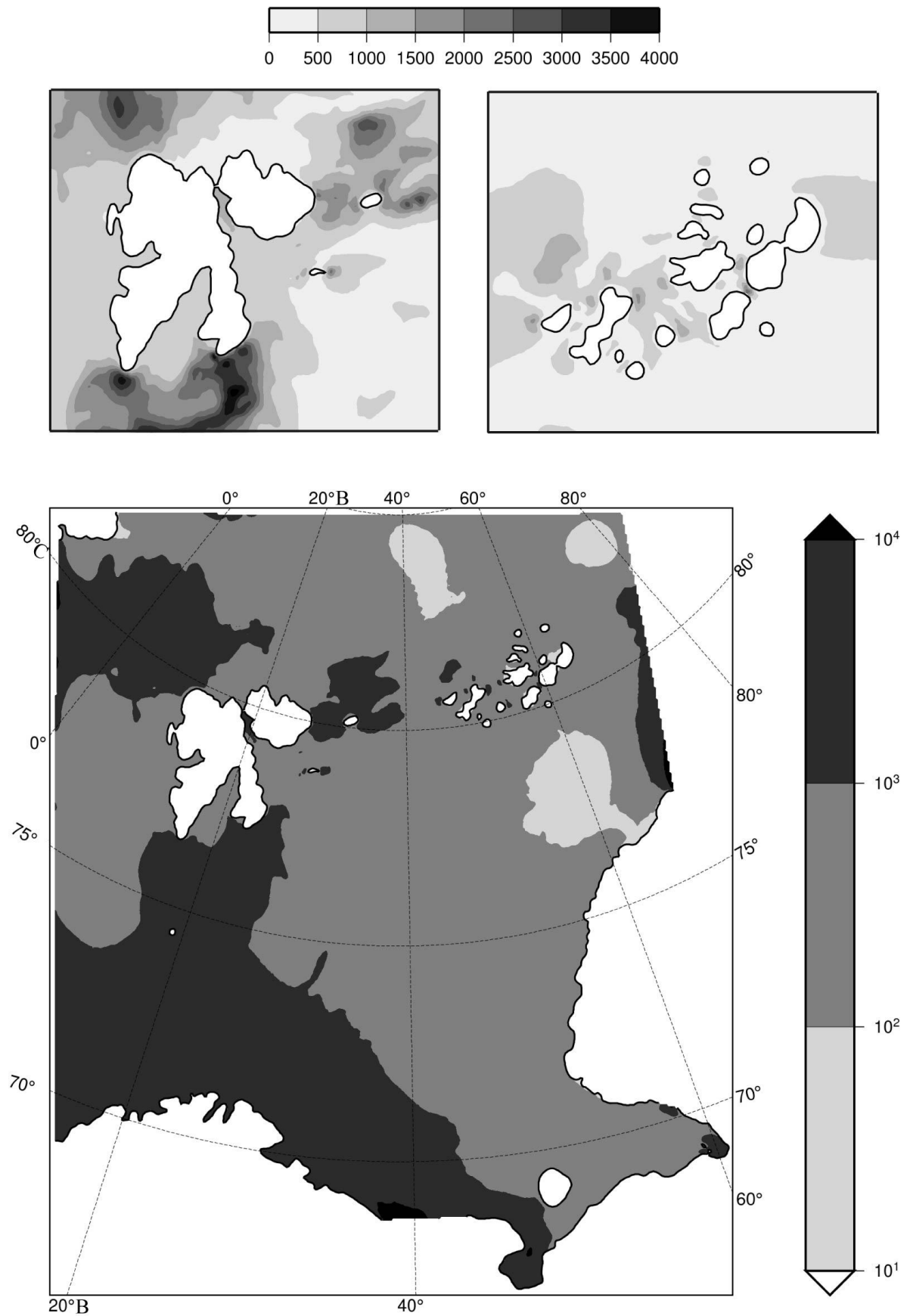


Рис.4. Поле средней (за приливный цикл) плотности баротропной приливной энергии (в Дж/м²) в Баренцевом море. Остальные пояснения см. на рис.1.

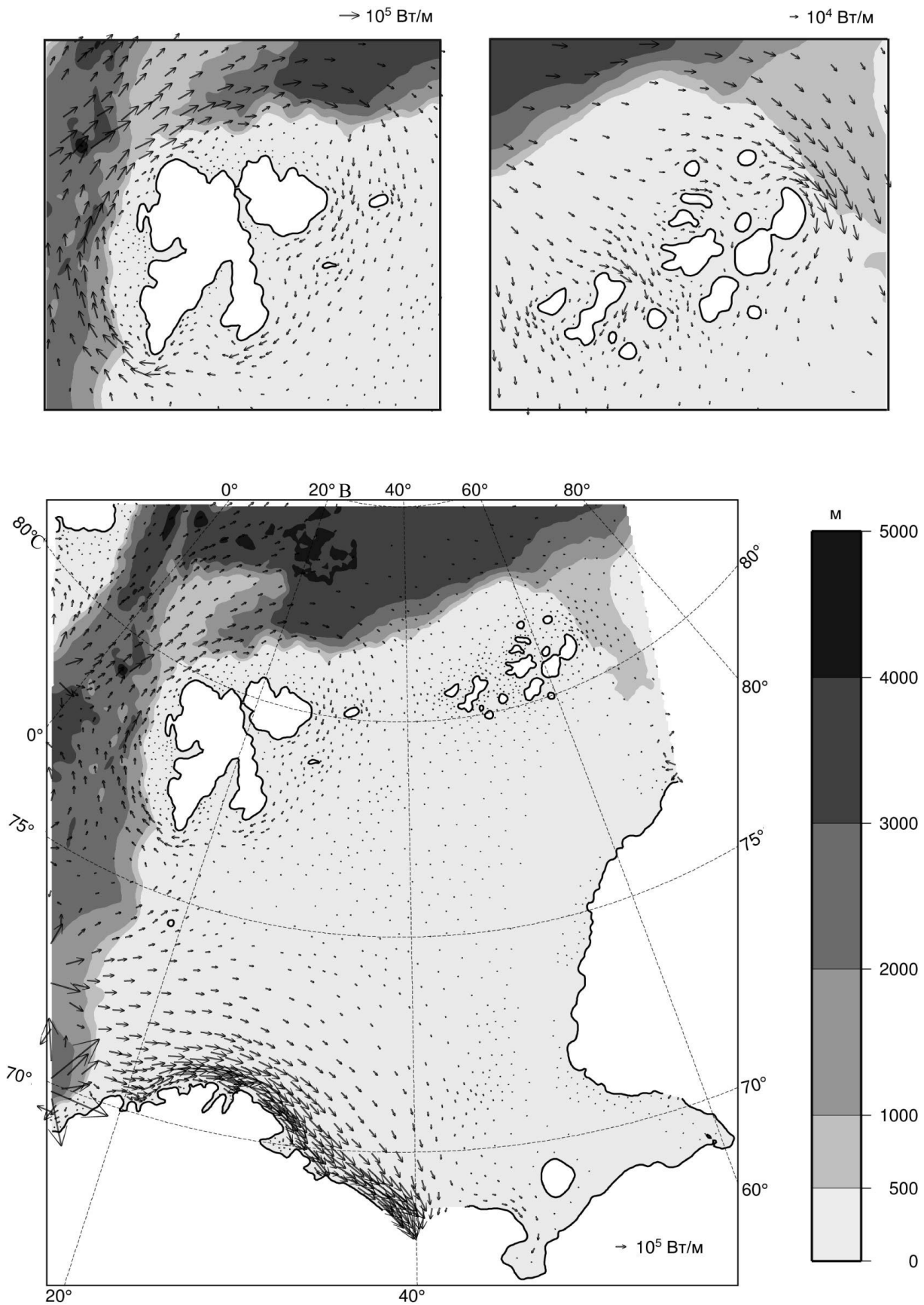


Рис.5. Поле среднего (за приливный цикл) горизонтального волнового переноса (в Вт/м) баротропной приливной энергии.
Топография дна (в м) изображена серым цветом разной тональности.

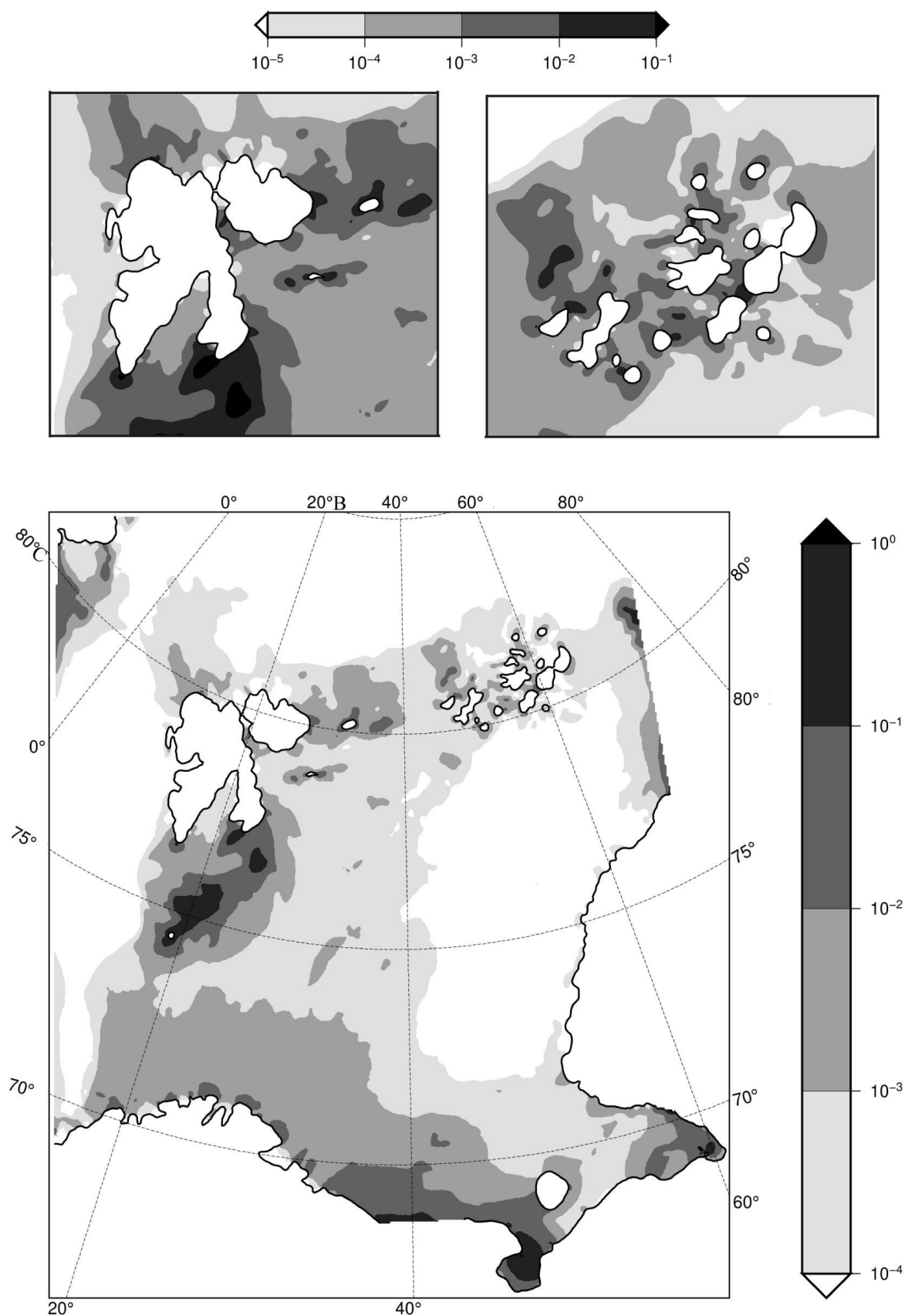


Рис.6. Поле средней (за приливный цикл) диссипации (в Вт/м²) баротропной приливной энергии за счет придонного трения.

На рис.3 приводится карта эллипсов баротропной скорости приливного течения. Она служит наглядным подтверждением справедливости вывода Б.Гъевика и др. [6] о преобладании в Баренцевом море вращения вектора скорости по часовой стрелке. В районах Кольского полуострова, южного побережья о-вов Новая Земля и у входа в Белое море эллипсы вырождаются в прямые линии, указывая на то, что течения здесь становятся реверсивными. Наибольшие приливные течения обнаруживаются: к юго-востоку от арх.Шпицберген, в окрестности северного побережья о.Принца Георга (ЗФИ), вдоль восточной открытой границы Баренцева моря, на локальном участке западного побережья о-вов Новая Земля, у входа в Белое море и в Чёшской губе. Здесь максимальные баротропные скорости могут достигать 1 м/с.

На рис.4 представлена карта средней (за приливный цикл) плотности баротропной приливной энергии. Нетрудно видеть, что она распределена по площади Баренцева моря достаточно неравномерно. Наибольшие ее значения приходятся на северное, восточное и южное побережья арх.Шпицберген, окрестности Кольского полуострова и восточную границу Баренцева моря, наименьшие – на отдельные пятна, встречающиеся в восточной части Баренцева моря. О порядке величины плотности баротропной приливной энергии можно судить по следующим цифрам: к югу и северу от арх.Шпицберген и вблизи Кольского полуострова она близка к 4000 Дж/м^2 , к востоку от арх.Шпицберген – 2000 Дж/м^2 , и только в отдельных пятнах ее величина достигает 2500 Дж/м^2 . В районе ЗФИ она не превышает 1000 Дж/м^2 .

Поле среднего (за приливный цикл) горизонтального волнового переноса баротропной приливной энергии дается на рис.5. Здесь также намывкой изображена топография дна. Видно, что генеральный горизонтальный волновой перенос в западной части Баренцева моря делится на две ветви: одна из них направлена на север в пролив между арх.Шпицберген и о.Гренландия, другая – вдоль Кольского полуострова на восток в Белое море и Чёшскую губу Баренцева моря. В центральной части Баренцева моря горизонтальный волновой перенос мал и не превышает 500 Вт/м . Мал он также в районе архипелагов ЗФИ и Шпицберген. В окрестности арх. ЗФИ он направлен в общем на юг, а в окрестности арх.Шпицберген образует антициклонический круговорот. Отметим также, что горизонтальный волновой перенос вблизи арх. Шпицберген примерно на порядок величины больше, чем вблизи арх. ЗФИ. Приведенное выше заключение о направлении переноса в окрестности арх.Шпицберген согласуется с результатами Чена и др. [10].

Структура средней (за приливный цикл) диссипации баротропной приливной энергии за счет придонного трения (рис.6) весьма своеобразна. Максимальные значения диссипации (свыше 10^{-1} Вт/м^2) отмечаются на Шпицбергенской банке, минимальные — в восточной части Баренцева моря. У Кольского полуострова диссипация баротропной энергии принимает промежуточные значения, составляющие на входе в Белое море и в Чёшской губе 10^{-2} Вт/м^2 . Однако в районе арх.Шпицберген поле диссипации более однородно, чем в районе арх. ЗФИ, где оно приобретает пятнистый характер. Максимальное значение интегральной (по площади) диссипации приходится на южную часть Баренцева моря (7.03 ГВт), в том числе на Чёшскую губу и побережье п-ова Канин – 3.56 ГВт . Затем в порядке очередности следуют Шпицбергенская банка (4.12 ГВт) и вход в Белое море (1.46 ГВт). В районе арх. Шпицберген и ЗФИ диссипирует 0.99 и 0.13 ГВт соответственно. В общем интегральная по площади Баренцева моря диссипация баротропной приливной энергии составляет 13.06 ГВт .

О расхождениях между модельными и наблюдаемыми значениями амплитуд и фаз приливных колебаний уровня можно судить по величине средней квадратической абсолютной векторной ошибки расчета. Она оказалась равной 12.5 см против 7.5 см по данным Л.Падмэна и С.Ерофеевой [9] и 19.6 см – З.Ковалика и А.Прошутинского [7]. Завышение оценки векторной ошибки расчета в нашей модели по сравнению с оценкой в модели Л.Падмэна и С.Ерофеевой [9] неудивительно: модель Л.Падмэна и С.Ерофеевой

[9] ассимилирует всю имеющуюся эмпирическую информацию о приливах, включая данные альтиметрии, полученной со спутников TOPEX/Poseidon и ERS. Наша модель, равно как и модель З.Ковалика и А.Прошутинского [7], не предусматривает использования какой-либо процедуры ассимиляции данных натурных измерений. В целом соответствие между результатами моделирования и данными наблюдений можно признать удовлетворительным. Это позволяет надеяться, что пространственная структура поверхностного прилива M_2 в районе архипелагов ЗФИ и Шпицберген воспроизведена правильно, из чего следует, что никакой другой амфидромии, кроме вырожденной амфидромии с центром на о.Зап.Шпицберген, здесь нет.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 12-05-00110а).

Литература

1. Владимиров О.А., Титов В.Б. Опыт расчета котидажных карт с учетом интерференции приливных волн // Тр. ГОИН, 1959. Вып.37. С.155–177.
2. Сеибнева Л.А. О приливах Баренцева моря // Тр. ГОИН, 1964. Вып.75. С.5–19.
3. Kowalik Z. A study of the M_2 tide in the ice-covered Arctic Ocean // Modeling, Identification and Control. 1987. V.2, N 4. P.201–233.
4. Dmitriev N.E., Proshutinsky A.Yu., Loyning T.B., Vinje T. Tidal ice dynamics in the area of Svalbard and Franz-Josef Land // Polar Res. 1991. V.9, N 2. P.193–205.
5. Schwiderski E.W. Tides / Ed.: Hurdle B.G. The Nordic Seas. New York: Springer-Verlag, 1986. P.191–209.
6. Gjevik B., Nost E., Straume T. Model simulations of the tides in the Barents Sea // Geophys. Res. 1994. Vol.99, N C2. P.3337–3350.
7. Kowalik Z., Proshutinsky A.Yu. The Arctic Ocean tides / Eds: O.Johanessen et al. The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment // Geophys. Monogr. Ser. V.85. Washington: AGU, 1994. P.137–158.
8. Kowalik Z., Proshutinsky A.Yu. Topographic enhancement of tidal motion in the western Barents Sea // J. Geophys. Res. 1995. V.100, N C2. P.2613–2637.
9. Padman L., Erofeeva S. A barotropic reverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2004. V.31, N 2. L02303, doi: 10.1029/2003GL019003.
10. Chen C. et al. A new high-resolution unstructured grid finite volume Arctic Ocean model (AO-FVCOM): An application for tidal studies // Geophys. Res. 2009. V.114, N C8, C08017, doi: 10.1029/2008JC004941.
11. Lynch D.R. Three-dimensional diagnostic model for baroclinic wind-driven and tidal circulation in shallow seas. FUNDY-4 User's Manual. Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, Report Number NML-90-2, 1990.
12. Lynch D.R., Gray W.G. A wave equation model for finite element tidal computations // Computers and Fluids. 1979. V.7. P.207–228.
13. Lynch D.R., Werner F.E. Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part 1: Linearized harmonic model // Int. J. Numer. Meth. in Fluids. 1987. V.7. P.871–909.
14. Lynch D.R., Werner F.E. Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part II: Nonlinear time-stepping model. Int. J. Numer. Meth. in Fluids, 1991. V.12. P.507–533.
15. Lynch D.R., Werner F.E., Greenberg D.A., Loder J.W. Diagnostic model for baroclinic and wind-driven circulation in shallow seas // Cont. Shelf Res. 1992, V.12, N 1. P.37–64.
16. 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.
17. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // Month. Wea. Rev. 1963. V.91. P.99–164.
18. Huthnance J.M. On trapped waves over a continental shelf // Fluid Mech. 1975. V.69, Pt.2. P.689–704.
19. Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.

Статья поступила в редакцию 18.10.2012 г.

