

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ В ПРОЛИВЕ КАТТЕГАТ НА ДИНАМИКУ ВОД БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Тихонова Н.А.^{1,2}, Гусев А.В.^{4,5}, Захарчук Е.А.^{1,2}, Дианский Н.А.^{3,4,6}

- ¹⁾ Санкт-Петербургский государственный университет
- ²⁾ СПО Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова
- ³⁾ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова
- ⁴⁾ Институт вычислительной математики РАН имени Г.И. Марчука РАН
- ⁵⁾ Институт океанологии РАН имени П.П. Ширшова РАН
- ⁶⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В этой статье проверяется гипотеза о влиянии возмущений уровня в проливе Каттегат на колебания уровенной поверхности всего Балтийского моря. Для проверки гипотезы проводится серия численных экспериментов с гидродинамической моделью Балтийского моря по различным сценариям. Оцениваются и сравниваются изменения характеристик возмущений уровня, распространяющихся из пролива Каттегат в Балтийское море в бароклинных и баротропных условиях с учетом и без учета воздействия аномобарических сил. Показано, что при моделировании динамики вод Балтийского моря обязательно нужно учитывать термодинамические условия на жидкой боковой границе, что позволяет заметно, повысить качество расчета колебаний уровня во всех районах моря. Статистический анализ результатов численных экспериментов приводит к выводу о существенном вкладе в дисперсию суммарных возмущений уровня Балтийского моря колебаний, распространяющиеся в Балтику из Северного моря.

Введение

Основными силами, вызывающими возмущения в динамических полях океанографических характеристик, являются силы касательного напряжения трения ветра, горизонтального градиента атмосферного давления, архимедова сила и приливообразующие силы. Под их воздействием генерируются различные физические процессы, которые проявляются в колебаниях уровня, течений, температуре воды и ее солёности.

Прохождение над акваторией морей атмосферных циклонов и антициклонов приводит к формированию систем ветровых и бароградиентных течений; существенная меридиональная протяженность Балтийского и Северного морей не исключает определенного вклада в динамику вод совместного эффекта сферичности и вращения Земли (β -эффект)(Захарчук, 2006). Под воздействием возмущающих сил в частично замкнутых шельфовых морях могут генерироваться различные виды захваченных волн, типа волн Кельвина и топографических (Педлоски, 1984; Белоненко, 2004). Стратификация водных масс влияет на генерацию бароклинных мод у различных волновых процессов.

Бароклинная и баротропная неустойчивость крупномасштабных течений может приводить к образованию синоптических вихрей, релаксация которых к условиям равновесия может происходить в виде различных мод низкочастотных волновых движений (Каменкович и др., 1987). Любое начальное локализованное вихревое возмущение одного знака не может оставаться стационарным и начинает излучать в окружающее пространство низкочастотные волны, типа волн Россби (Коротаев, 1988). Неустойчивость низкочастотных волн также может приводить к генерации синоптических вихрей.

Балтийское море является внутриконтинентальным шельфовым морем Атлантического океана и связано с ним через Северное море. Водообмен между Балтийским и Северным морями происходит через узкие мелководные Датские проливы (глубины на порогах 7–18 м). Ограниченность моря и затрудненный водообмен с океаном существенно влияют на особенности его гидрологического и экологического режимов. В данной работе проводится анализ влияния динамических процессов пролива Каттегат на изменчивость колебаний уровня в Балтийском море. В работах (Куликов Е.А. и др. 2015, Куликов Е.А. и др. 2015) упоминается о том, что Датские проливы выступают в роли фильтра для колебаний уровня с периодами менее 20 суток, не затрагивая колебания на более низких частотах. Наши результаты работы с моделью динамики Балтийского моря показали некоторые противоречия этим выводам, поэтому в настоящей работе особое внимание уделяется оценке влияния динамических условий пролива Каттегат на изменчивость уровня Балтийского моря. Для этого исследования использовалась трехмерная бароклинная модель динамики Балтийского моря, с помощью которой было проведено несколько численных экспериментов.

Численное моделирование динамики Балтийского моря по заданным сценариям.

Для создания модели динамики Балтийского моря была использована модель циркуляции океанов и морей INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), разработанная в ИВМ РАН. В её основе лежит система примитивных уравнений крупномасштабной гидротермодинамики океана в приближениях гидростатики и Буссинеска, записанная в обобщенных ортогональных координатах по горизонтали и в σ -системе координат по вертикали. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура, солёность и отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности [Дианский, 2013; Zalesny et al., 2010]. Для расчёта плотности используется уравнение состояния, учитывающее сжимаемость морской воды и специально предназначенное для моделей циркуляции океана [Brydon et al., 1999].

При численной реализации INMOM используется метод расщепления [Марчук, 2009] по физическим процессам и пространственным координатам, что является ее отличительной особенностью от других известных моделей (например, [Griffies, 2005, Blumberg and Mellor 1987] и других). Для этого уравнения динамики океана записываются в специальной симметризованной форме. Она позволяет представить оператор дифференциальной задачи в виде суммы более простых операторов, каждый из которых является неотрицательным в норме, определяемой законом сохранения полной энергии. Это дает возможность расщепить оператор полной задачи на ряд более простых подзадач и построить их пространственные аппроксимации так, чтобы энергетическим законам сохранения, выполняющимся для исходной дифференциальной задачи, удовлетворяли все расщепленные дискретные задачи. Разностные аппроксимации по пространственным координатам строятся на "C"-сетке [Лебедев, 1964, Messinger and Arakawa, 1976].

В модель циркуляции Балтийского моря включен модуль термодинамики морского льда (Yakovlev, 2009) состоящий из 3-х модулей. Модуль термодинамики описывает намерзание, таяние льда и выпадение снега. Модуль динамики льда рассчитывает скорости его дрейфа (Briegleb et al, 2004). Модуль переноса льда служит для расчёта эволюции ледяного и снежного покровов вследствие дрейфа (Hunke and Dukowicz, 1997).

В качестве батиметрии использовались данные системы DAS шведского института «Baltic Nest Institute» <http://nest.su.se/das> (<http://nest.su.se>) с разрешением 1 мили, которые были записаны в формате модели на сетке с шагом 2 мили и ограничены снизу минимальным значением 2 м, что необходимо для невырожденности преобразования координат по вертикали.

Граничные условия на поверхности моря были взяты с сайта NOAA из реанализа <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php?name=access#cfsr> с разрешением 0.5 градуса и временной дискретностью 6 часов. Они включали в себя следующий список метеорологических характеристик: атмосферное давление на уровне моря, коротковолновую радиацию, длинноволновую радиацию, осадки, влажность на высоте 2 м, температуру воздуха на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м.

Жидкая граница была проведена в проливе Каттегат вдоль широты 57.74 N. В качестве начальных и граничных условий по температуре воды и солёности использовались среднемесячные данные из базы <https://marine.copernicus.eu/> за 2009–2010 гг. Эти данные были получены из расчетов модели HIROMB с усвоением в процессе счета натуральных данных – судовых измерений, а также береговых станций. На жидкой боковой границе в проливе Каттегат задавались условия по температуре и солёности воды, сформированные за каждый месяц расчетного года.

Период расчета и отладки модели составлял 2009–2010 гг., результаты выво-
дились для уровня моря 4 раза в сутки.

Для верификации модели Балтийского моря использовались данные изме-
рений уровня в береговых пунктах. Сравнение рассчитанных по модели значе-
ний уровня и измеренных в береговых пунктах, показало, что модель хорошо
описывает изменчивость уровня в северных районах Балтийского моря и недо-
статочно хорошо в южных (см. Таб.1, кол. 2).

С целью повышения точности модельных оценок на жидкой боковой гра-
нице в проливе Каттегат задавались измеренные мареографные значения
уровня, полученные на двух станциях: Aarhus (56°09' с.ш., 10°13' в.д.) и
Sjaellands Odde (55°58'30 с.ш., 11°22'20 в.д.) (<http://www.boos.org>). В процессе
счета рассчитанный уровень на каждом шаге интегрирования заменялся на
жидкой границе ежечасным уровнем с береговых станций.

Результаты нового расчета условий Балтийского моря с учетом усвоения ре-
ального уровня на жидкой границе в проливе Каттегат показали существенные
улучшения как на визуальном уровне, так в значениях коэффициентов корреля-
ции, которые выросли до 0.81–0.90 (Таб.1, кол. 3).

Таблица 1.

**Коэффициенты корреляции между мареографными измерениями уровня
на береговых станциях и их рассчитанными значениями по модели,
полученными при задании различных условий на боковой границе**

Станция	Без задания колебаний уровня на жидкой гра- нице	Заданы колебания уровня на жидкой границе
(1)	(2)	(3)
Ботнический залив		
Каликс	0.70	0.90
Кеми	0.73	0.89
Спикарна	0.46	0.87
Каскинен	0.52	0.88
Финский залив		
Кронштадт	0.57	0.81
Хельсинки	0.57	0.87
Силламае	0.61	0.89
Рижский залив		
Даугава	0.61	0.90
Колка	0.54	0.90
Северная открытая часть моря		
Дегербю	0.34	0.85

Южная открытая часть моря		
Варнемюнде	0.46	0.82
Кангзхолмсфорт	0.21	0.81
Клайпеда	0.36	0.87
Тайн	0.30	0.83

Эти результаты свидетельствуют о том, что динамические условия в проливе Каттегат заметно влияют на колебания уровня во всем Балтийском море. Для более детальной проверки этой гипотезы были проведены следующие эксперименты:

Эксперимент №1 – Трехмерная баротропная модель, в которой плотность воды была фиксирована постоянной величиной в пространстве и во времени на всём интервале интегрирования, а анемобарические силы не учитывались.

Эксперимент №2 – Трехмерная бароклиническая модель, в которой были отключены влияние касательного трения ветра и горизонтального градиента атмосферного давления.

Для обоих экспериментов (1,2) на жидкой боковой границе в проливе Каттегат вместо ежедневных значений уровня, взятых с береговых станций, были заданы 6 тестовых гармоник с параметрами, представленными в таб. 2.

Эксперимент №3 – Полная трехмерная бароклиническая модель с ледовым блоком, потоками тепла и соли, а также атмосферным воздействием и стоком рек.

Эксперимент №4 – Полная трехмерная бароклиническая модель с ледовым блоком, потоками тепла и соли, в которой были отключены влияние касательного трения ветра и горизонтального градиента атмосферного давления.

Для других двух экспериментов (3, 4) на жидкой боковой границе задаются ежедневные значения колебаний уровня, полученные с помощью мареографных измерений на двух береговых станциях в проливе Каттегат.

Таблица 2.

**Параметры гармоник, задаваемых на жидкой границе
в модели Балтийского моря**

Номера гармоник	Период в сут.	Начальная фаза, град.	Амплитуда в см.
1	1.5	0	50
2	3.0	45	50
3	6.0	90	50
4	13.5	135	50
5	40.5	180	50
6	121.5	235	50

Расчеты проводились за период 2009–2010 гг. В результате были получены поля уровня в каждой точке сеточной области для четырех экспериментов.

Результаты моделирования

Результаты проведенного спектрального анализа колебаний уровня в разных районах моря по первым двум экспериментам представлены на Рис. 1. Черной линией показан спектр тестового ряда уровня, который задавался на жидкой границе. В точке 3 хорошо видно, что вблизи жидкой границы заданные колебания уровня практически не трансформируются, а затем при их распространении восточнее Датских проливов обе модели показывают уменьшение амплитуды колебаний, более выраженное в высокочастотной области спектров. Значения спектральной плотности колебаний уровня моря, рассчитанных по баротропной модели (№1), немного ниже, чем по бароклинной (№2). Также можно отметить, что стратификация вод не оказывает влияние на трансформацию исходных сигналов уровня, заданных на жидкой границе, и не приводит к смещению частот в пиках спектральной плотности.

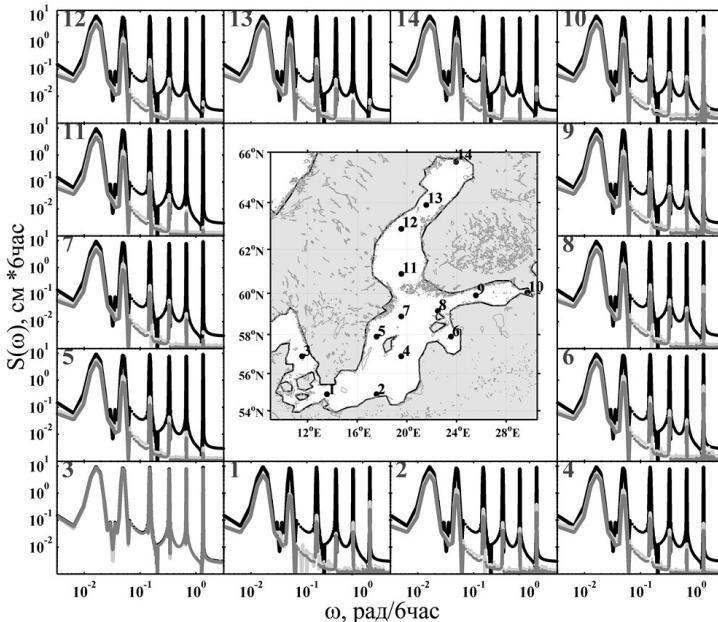


Рис. 1. Спектральный анализ тестового ряда (черная линия) и рядов уровня, рассчитанных по бароклинной модели (эксперимент №2, темно-серая линия) и баротропной модели (эксперимент №1, светло-серая линия).

Данный спектральный анализ подтверждает то, что заданные гармонические колебания на жидкой границе распространяются во все районы моря, не меняя своей частоты, но уменьшаясь по амплитуде. При этом уменьшение амплитуд отдельных гармоник не связано с удаленностью наблюдаемого района от жидкой границы, а связано, по-видимому, с характеристиками бассейна, такими как изрезанность береговой линии, пространственные масштабы бассейна и донная топография. Так, в Финском и Рижском заливах в точках 6, 9, 10 гармоника с периодом 36 часов имеет амплитуду существенно выше, чем в открытой части моря (точки 8, 4, 2, 1), а в районе 5 и 7 эта гармоника вообще имеет минимальные значения амплитуды. Гармоники с периодами 40 и 121 суток имеют амплитуды несколько ниже изначально задаваемого сигнала, но при этом практически не трансформируются при распространении вглубь моря и во всех исследуемых точках имеют практически идентичные пики спектральной плотности. Колебания с периодами 3 и 6 суток во всех районах моря при своем распространении значительно уменьшаются по амплитуде.

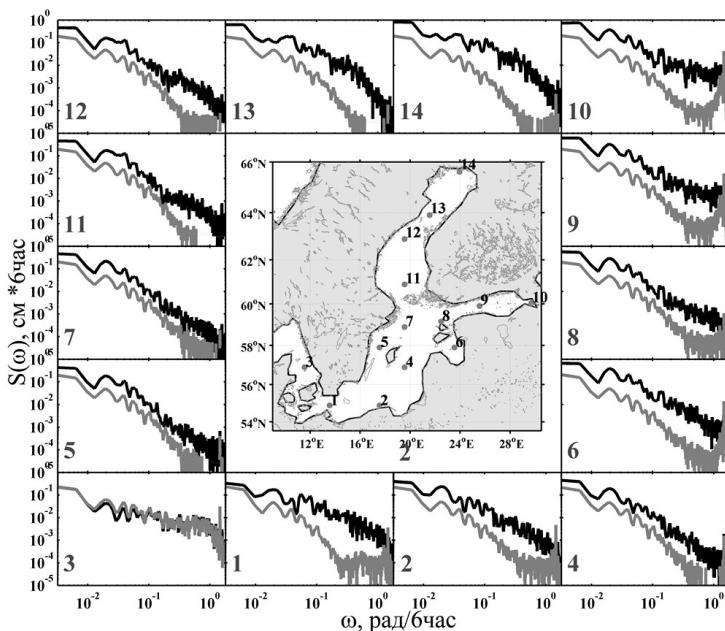


Рис. 2. Спектральный анализ рядов уровня, рассчитанных по полной бароклинной модели №3 (черная линия), бароклинной модели №4 (темно-серая линия).

Сравнение спектров уровня, рассчитанных по полной бароклинной задаче (эксперимент №3), с бароклинной задачей без воздействия ветра и атмосферного давления (эксперимент №4), представлено на Рис. 2.

Результаты сравнения двух численных экспериментов (№3, №4) свидетельствуют, что в диапазоне периодов синоптических и сезонных колебаний во всех районах моря за счет воздействия аномобарических сил дисперсия колебаний уровня увеличивается. Исключение составляет мезомасштабный диапазон изменчивости, в котором влияние сил тангенциального напряжения ветра и горизонтального градиента атмосферного давления не приводит к увеличению дисперсии колебаний уровня моря.

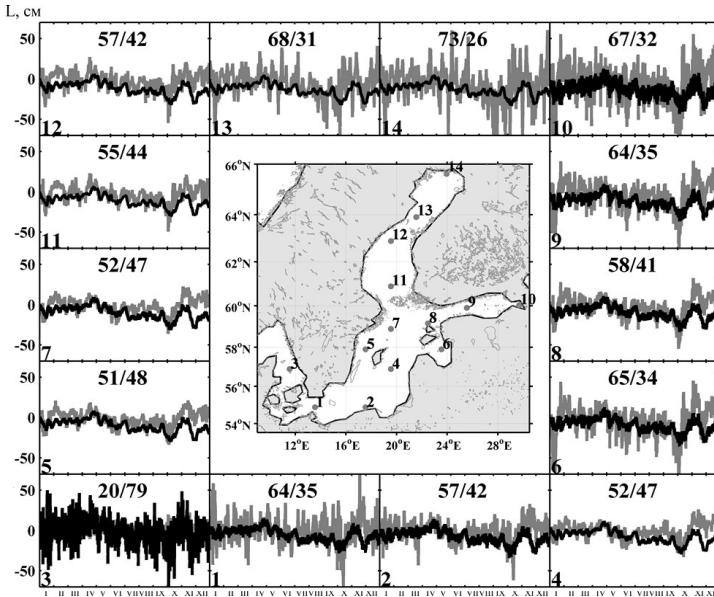


Рис. 3. Ход уровня в течение 2009 г. в различных районах Балтийского моря. Черная линия – бароклинные колебания без учета влияния атмосферы (эксперимент №2), серая линия – разность между колебаниями уровня, рассчитанными в эксперименте №3 и эксперименте №4, дробью обозначено соотношение вклада стандартных отклонений в процентах (%) для черной и серой линий.

Далее была проведена оценка вклада атмосферного воздействия в изменчивость величин колебаний уровня. Для этого из рядов уровня моря, полученных по полной задаче (эксперимент №3), вычитались значения уровня, рассчитанные по бароклинной задаче без атмосферного воздействия (эксперимент №4).

Результаты такого сравнения представлены на Рис. 3. Стандартное отклонение уровня генерируемых колебаний на жидкой боковой границе, сравнимо с колебаниями, возбуждаемыми анемобарическими силами во всех точках моря. Однако соотношение вкладов свободных и вынужденных колебаний в суммарную дисперсию отличается в зависимости от района моря: в открытой части эти соотношения близки, в то время как в основных заливах Балтики наибольший вклад в суммарную дисперсию уровня оказывают вынужденные колебания, которые генерируются, следуя результатам, представленным на Рис. 2, главным образом, в диапазонах синоптической и сезонной изменчивости. Также результаты, показанные на Рис. 3. свидетельствуют о том, что после прохождения Датских проливов свободные колебания распространяются по всей Балтике без заметного изменения их дисперсии.

Выводы

Задание ежечасных измеренных значений уровня моря на жидкой боковой границе модели существенно повышает качество расчетов колебаний уровня во всех районах моря, что подтверждается результатами их сравнения с данных мареографных измерений в береговых пунктах.

Численные эксперименты показали, что Датские проливы не оказывают фильтрующее влияние на распространение тестовых гармоник. Результаты, полученные на основе спектрального анализа, свидетельствуют, что колебания на частоте тестовых гармоник наблюдаются и в открытой части Балтийского моря, а также в его основных заливах с различной степенью изменения их амплитуды: в диапазоне периодов более 40 и менее 2 суток их амплитуда почти не меняется, а в диапазоне периодов от 3 до 15 суток амплитуды колебаний на частоте тестовых гармоник значительно уменьшаются.

Сравнительный статистический анализ результатов численных экспериментов приводит к гипотезе, что существенный вклад в дисперсию суммарных возмущений уровня Балтийского моря оказывают колебания, распространяющиеся в Балтику из Северного моря, а не только возмущения уровня, которые генерируются под действием анемобарических сил в самом Балтийском море. Подтверждением такой гипотезы служат сравнимые оценки дисперсии рядов уровня, рассчитанных по модели без воздействия анемобарических сил, по сравнению с рядами уровня, полученными только за счет внешнего атмосферного воздействия (Рис. 3)

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (грант № 18.37.140.2014) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-05-00534 , 15-05-07539 и 15-35-50867).

INFLUENCE OF LEVEL CHANGES IN THE CATTEGATE STRAIGHT ON DYNAMICS BALTIC SEA WATERS

Tikhonova N.A., Gusev A.V., Zakharchuk E.A., Diansky N.A.

This article tests the hypothesis about the influence of sea level disturbances in the Kattegat Strait on the fluctuations of the sea level surface of the entire Baltic Sea. To test the hypothesis, a series of numerical experiments is carried out with a hydrodynamic model of the Baltic Sea according to various scenarios. Changes in the characteristics of sea level disturbances propagating from the Kattegat Strait to the Baltic Sea under baroclinic and barotropic conditions with and without taking into account the effect of anemobaric forces are estimated and compared. It is shown that when modeling the dynamics of the Baltic Sea waters, it is imperative to take into account the thermodynamic conditions at the liquid lateral boundary, which makes it possible to significantly improve the quality of the calculation of sea level fluctuations in all areas of the Baltic Sea. A statistical analysis of the results of numerical experiments leads to the conclusion about a significant contribution to the variance of the total Baltic sea level oscillations of the fluctuations propagating into the Baltic Sea from the North Sea.

Литература

1. Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в океане. Монография. Издательство Санкт-Петербургского Государственного университета. 2004, 214 с.
2. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М. Физматлит, 2013. 272 с.
3. Захарчук Е. А., Тихонова Н.А. Вклад β -эффекта в формирование полей уровня и течений Балтийского моря. Метеорология и гидрология. №11. 2006, С. 31-41.
4. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Ленинград. Гидрометеоиздат. 1987, 516 с.
5. Коротаев Г.К. Теоретическое моделирование синоптической изменчивости океана. Киев. Наукова Думка. 1988. 160 с.
6. Куликов Е.А., Файн И.В., Медведев И.П. Численное моделирование анемобарических колебаний уровня Балтийского моря. «Метеорология и гидрология». №2, 2015, С. 41-52.

7. Куликов Е.А., Медведев И.П., Колтерманн К.П. Роль баротропного водообмена в формировании спектра колебаний уровня Балтийского моря. – *Океанология*, 2015, Т.55, №1, С. 5-15.
8. Лебедев В.И. Разностные аналоги ортогональных разложений, основных дифференциальных операторов и некоторых краевых задач математической физики. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, Т.4, №3, 1964, С. 449–465
9. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики.// Санкт-Петербург. Лань. 2009. 608с.
10. Педдоски. Дж. Геофизическая гидродинамика. Пер. с англ.- М. Мир, 811 с.,1984.
11. Briegleb В.Р., Bitz С.М., Hunke Е.С., Lipscomb W.H., Holland M.M., Schramm J.L., and Moritz R.E. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, version three. Technical Note NCAR/TN–463+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 2004
12. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models// *J. Geoph. Res.*- 1999.- V. 104.- No. C1.- P. 1537–1540.
13. Griffies, S.M. 2005: Some ocean model fundamentals. In: *Ocean Weather Forecasting: an integrated view of Oceanography*. E.P. Chassignet & J. Verron, eds., Berlin, Germany: Springer, P. 19-74.
14. Hunke E.C and J.K. Dukowicz. An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27. P. 1849–1867.
15. Mesinger, F. and A. Arakawa, 1976: Numerical methods used in atmospheric models. WMO/ISCU Joint Organising Committee, GARP Publications Series N. 17, V. I, 64 pp.
16. Zalesny V.B., Marchuk G.I., Agoshkov V.I., Bagno A.V., Gusev A.V., Diansky N.A., Moshonkin S.N., Tamsalu R., Volodin E.M. Numerical simulation of large-scale ocean circulation based on the multicomponent splitting method. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2010. V. 25. N. 6. P. 581–609.
17. Yakovlev N.G. Reproduction of the Large-Scale State of Water and Sea Ice in the Arctic Ocean in 1948–2002: Part I. Numerical Model /*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, V. 45, N. 3, P. 357–371.