

Б-ка.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 551.46 : 556.5.072

На правах рукописи

Май Руслан Игоревич

НЕЛИНЕЙНЫЕ БАРОТРОПНЫЕ И БАРОКЛИННЫЕ ПРИЛИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В  
МОРЯХ ЕВРОПЕЙСКОЙ АРКТИКИ

Специальность 25.00.28 - «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург-2006

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете и Санкт-Петербургском отделении Государственного океанографического института

научный руководитель: доктор географических наук, профессор Фукс Виктор Робертович

официальные оппоненты:

доктор географических наук, профессор Некрасов Алексей Всеволодович  
кандидат географических наук, Романенков Дмитрий Анатольевич

Ведущая организация: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Защита состоится 11 мая 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.21 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199178 Санкт-Петербург, Васильевский Остров, 10 линия, д. 33, вул. 74.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета по адресу Университетская наб., д. 7/9

Автореферат разослан 6 апреля 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Г. И. Мосолова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Приливные явления в морях Европейской Арктики (Гренландское, Норвежское, Баренцево и Белое море) вносят существенный вклад в формирование гидрологического режима этих морей. В результате нелинейности приливных явлений и нелинейного взаимодействия основных волн прилива возникают множество дополнительных гармоник с высокими и низкими частотами, и остаточные течения и уровен. Остаточная приливная циркуляция, хотя и имеет меньшие скорости по сравнению с приливными и неперидическими течениями, но из-за непрерывности воздействия во многом формирует обшую циркуляцию бассейна, и влияет на перенос тепла, соли, планктонных организмов, биогенных элементов, загрязнителей, льда и прочих консервативных и неконсервативных примесей. Если нелинейные гармоники коротких периодов исследованы с помощью натурных наблюдений и результатов моделирования, то долгопериодные нелинейные гармоники и их вклад в изменчивость гидрологического режима до сих пор не изучен. И следовательно, неяснен вклад нелинейных долгопериодных волн в формирование синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости. Остается не ясным механизм генерации нелинейных приливных явлений. Существуют три основных типа нелинейности: мелководная, конвективная, фрикционная. Неизвестно насколько полно эти типы объясняют существование нелинейных приливных явлений, также неизвестен вклад того или иного вида нелинейности в формирование различных нелинейных приливных явлений. Даже линейные бароклинные приливные явления, не говоря уже об их нелинейных проявлениях, изучены совершенно недостаточно в морях Европейской Арктики. Невьясен вклад приливных явлений в формирование термогазливной структуры.

**Цель работы** – определить вклад нелинейных баротропных и бароклинных приливных явлений в формирование гидрологического режима морей Европейской Арктики.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. на основе имеющихся программных алгоритмов Ripseon Ocean Model (РОМ) создать приливные модели морей Европейской Арктики и Белого моря, с высоким пространственным разрешением (принимая во внимание эллиптичность Земли), с граничными условиями для основных волн прилива, учитывающими нелинейность процесса, и с учетом приливной осушки.
2. по данным инструментальных наблюдений и численной реализации гидродинамической модели определить характеристики основных волн баротропного прилива.
3. оценить характеристики нелинейных короткопериодных, долгопериодных гармоник и остаточных приливных явлений
4. с помощью численных экспериментов на гидродинамической модели определить сравнительный вклад различных типов нелинейности в формирование тех или иных приливных явлений, установить достаточность существующих типов нелинейностей в описании нелинейных явлений.
5. оценить характеристики внутренних приливных волн, определить вклад приливных явлений в формирование термогазливной структуры Белого моря, установить роль бароклинных условий

ВНИРО  
№ 49-ХР  
Библиография

в формирование трехмерной остаточной приливной циркуляции, определить зоны апвеллинга и дувеллинга, обусловленные остаточными приливными явлениями.

#### **Научная новизна:**

- С помощью численной реализации новой приливной гидродинамической модели морей Европейской Арктики определены параметры линейных и нелинейных баротропных и бароклинных явлений.
  - Объяснена возможность передачи энергии полусуточных и суточных приливных волн в низкочастотную область спектра. Оценены характеристики нелинейных долгопериодных гармоник, возникающих в результате нелинейности основных волн прилива и их взаимодействия между собой.
  - Обнаружен новый тип нелинейности – нелинейность нестационарности береговой линии: генерация нелинейных приливных явлений осушкой.
  - Экспериментальным путем выявлен вклад различных видов нелинейностей (келководной, конвективной, фрикционной и нового типа нелинейности) в формирование нелинейных приливных явлений.
  - Установлено, что основные особенности термогазливной структуры вод Белого моря определяются приливным перемешиванием, приливной аэвацией, баротропной и бароклинной остаточной приливной циркуляцией.
- На защиту выносятся следующие положения работы:**
1. Новые котидальные карты и карты изомпиглуд приливных волн в морях Европейской Арктики.
  2. Существенный вклад нелинейных приливных явлений в формирование режима морей Европейской Арктики в климатическом, синоптическом и мезомасштабной диапазоне изменчивости.
  3. Оценка сравнительных вкладов различных типов нелинейности, включая новый тип нелинейности, в формирования приливных явлений морей Европейской Арктики.
  4. Характеристики нелинейных бароклинных приливных явлений Белого моря.

#### **Практическая значимость работы.** Нелинейные баротропные и бароклинные приливные

явления крайне важны для безопасной наводной и подводной навигации; решения экологических и биологических задач (из-за существенного влияния остаточных приливных течений на перенос загрязнений, биогенных элементов, планктонных организмов) в целях обеспечения морского промысла и функционирования маркультурных хозяйств.

**Личный вклад автора.** Автором созданы модели морей Европейской Арктики и Белого моря, на основе программных алгоритмов модели Принстонского университета (Princeton Ocean Model ROM). Встрена в модель процедура, имитирующая приливную осушку. На основе численных экспериментов на нелинейной гидродинамической модели и обработки натурных данных выяснены характеристики нелинейных короткопериодных и долгопериодных гармоник. Оценены вклады различных типов нелинейности в формирование нелинейных приливных

явлений, обнаружен новый тип нелинейности – периодическое изменение границ бассейна (приливная осушка). Автором создан ряд ГИС-программ, для корректного построения сеточной области модели с учетом эллиптичности Земли, визуализации результатов моделирования и анализа ассимилируемых в сеточные области пространственных данных. Создана серия программных продуктов для анализа полей приливных явлений.

**Апробация работы.** Основные положения и отдельные результаты работы обсуждались: на конференции «EERE OCEANS'05 EUROPE» в г. Бресте, Франция, 2005; на XII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2005», в Москве в 2005 г. На IX международной конференции «Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря» в 2004 г., в г. Петрозаводске. Результаты работы были представлены на конференции «Challenge Competence for Marine Science MS 2004» в Ливерпуле, Великобритания, в 2004 г.; на 16 и 20 международных симпозиумах «Diplomatic symposium on Okhotsk Sea & sea ice, Mombetsu» в г. Момбэцу, Япония в 2001 и 2005 гг.; на конференции «Fall Meeting of American Geophysical Union» в г. Сан-Франциско, США в 2004 г.; на семинаре "Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана" в г. Владивостоке, в 2004 г.; на пятой Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» («НО-2004») в 2004, в Санкт-Петербурге; на V международном экологическом форуме «День Балтийского моря», посвященный 30-летию подписания Хельсинкской конвенции в Санкт-Петербурге в 2004; на VII международной конференции «АКВАТЕРРА-2004» в Санкт-Петербурге в 2004г.

Кроме того, результаты работы обсуждались на итоговых сессиях Санкт-Петербургского отделения Государственного океанографического института, 2005 и 2006 гг., Санкт-Петербург, на ученом совете Государственного океанографического института, 2006, Москва; на заседаниях совместной российско-норвежской лаборатории «Eram Arctic Climate Research Laboratory» в городах Санкт-Петербург и Тромсø, Норвегия, в 2004, 2005 и 2006 гг.; и во время летней школы «IARC-NAVOS 2005 Arctic Expeditions & Summer School» по изучению изменений климата Арктики, проведенной на борту ледокола «Капитан Дранниш» в 2005, море Лаптевых. Работа над диссертацией была поддержана стипендиями им. Ф. Нансена для аспирантов СПбГУ (The NANSEN Grant) в 2003, 2004 и 2005 гг. Исследования представлены в диссертации, проведенной в рамках проектов РФФИ (Грант РФФИ 04-05-64765) и министерства образования (Грант Санкт-Петербурга для молодых ученых и спендиалистов: Грант МО 4-2-7К-288)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, 5 из которых в соавторстве.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 150 страниц, включая 71 рисунок, 7 таблиц и 1 приложение. Список литературы составляет 70 наименований, в том числе 12 на иностранных языках.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы задачи исследования и показана его научная новизна, кратко изложены структура и основные результаты работы.

В **первой главе** дается описание изученности вопроса: приводятся основные результаты исследований приливных явлений в морях Европейской Арктики, выполненных отечественными и зарубежными авторами. В первом параграфе даны сведения о степени исследованности различных приливных явлений: характеристики линейных и нелинейных приливных волн, приливных фронтов, внутренних приливных волн, остаточных явлений. В конце первого параграфа первой главы отмечается недостаточная изученность баротропных и бароклинных приливных явлений. Во втором параграфе на простых тригонометрических примерах доказывается возможность генерации нелинейными остаточных приливных явлений и оборотов при распространении одной волны, и остаточных приливных явлений, оборотов основных волн, короткопериодных и долгопериодных волн при нелинейном взаимодействии двух и более волн. В третьем параграфе первой главы дано физико-географическое описание исследуемой акватории: Норвежское, Гренландское, Баренцево, Белое, Печорское моря. Объясняется предпочтительность принятого международного термина «моря Европейской Арктики» для данной акватории. И в заключительном четвертом параграфе приводится описание инструментальных данных измерений за уровнем на береговых станциях, и течениями на различных горизонтах автономных буйковых станций: приводятся географическое положение станций, их продолжительность, дискретность измерений. Всего анализировалось 57 автономных буйковых станций наблюдений за течениями, выполненных на нескольких горизонтах. Также в этом параграфе приведено описание массива данных измерений уровня на побережье российской Арктики. Всего в нашем распоряжении были измерения 26 береговых станций, выполненных сетью гидрометслужбы СССР.

**Вторая глава** содержит информацию о параметрах моделей морей Европейской Арктики и Белого моря. Описываются основные уравнения движения и неразрывности модели Принстонского Университета (Princeton Ocean Model ROM), на численных алгоритмах которой нами были созданы модели морей Европейской Арктики и Белого моря. Второй параграф главы содержит описание метода построения сеточной области модели: использовалась эллипсоид вращения Красовского для пространственной конечно-разностной аппроксимации уравнений модели. Во второй главе приводятся результаты оценки влияния аппроксимации сеточной области на результаты моделирования: выполнены тестовые численные эксперименты с сеточными областями, построенными на эллипсоиде вращения, сфере и плоскости. В ходе исследования установлено, что для точного моделирования целесообразнее использовать эллипсоид для пространственной конечно-разностной аппроксимаций уравнений движения и неразрывности. Третий параграф второй главы содержит информацию о начальных и граничных условиях модели. На открытой границе задавались приливные явления, предварительно дату по гармоническим постоянным главных приливных волн ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ), взятым из работы (Radman, Brofseva, 2004). На открытой границе модели использовались импульсные

граничные условия (Некрасов, 1990, стр. 246, формулы (5.45)). Сравнение результатов моделирования с различными граничными условиями показало, что энергия волны  $M_4$  выходит через открытую границу при моделировании с импульсными граничными условиями, в то время как при часто используемых условиями колебания уровня на открытой границе волна  $M_4$  отражается от границы и волновой поток энергии распространяется внутрь расчетной области модели, кардинальным образом искажая характеристики волны  $M_4$ .

Для наилучшего описания приливных явлений мы использовали комплекс процедур, имитирующий приливную осушку мелководных районов. Без использования этой процедуры пришлось бы ограничивать область моделирования изобатой 5 м, что существенно изменило бы форму мелководных заливов, а следовательно, и характеристики линейных и нелинейных приливных волн. Во второй главе приведены результаты моделирования Белого моря: всего за один год модельного времени приливной осушке подверглась область, общей площадью 265 км<sup>2</sup>. Приливная осушка отмечается по данным моделирования в районах Мезенского залива и побережья полуострова Канин, где амплитуды приливной волны максималны, кроме того, в вершине Онежского залива также отмечается приливная осушка. Сравнение результатов моделирования приливной осушки с данными навигационной карты показало совпадение площади и положения приливной осушки.

В заключительном параграфе второй главы приведена верификация модели в терминах гармонических постоянных. Сравнение проводилось с данными инструментальных измерений уровня и течений, так и с результатами моделирования других авторов. Сравнения результатов моделирования и инструментальных данных показали очень хорошее совпадение, как для течений, так и для уровня.

В **третьей главе** приводятся методы анализа модельных и натурных рядов: использовались гармонический и спектральный анализ. В основе исследования лежит гармонический анализ методом наименьших квадратов, способный выделять основные волны прилива, нелинейные гармоника и остаточные эффекты. В третьей главе диссертационной работы отражены результаты исследования о влиянии параметра осреднения на оценки остаточных приливных явлений: определено, что простое арифметическое осреднение рядов может дать приемлемый результат (расхождение меньше 1 см) только при осреднении ежечасных рядов длительностью более трех месяцев. Отмечается преимущество оценки остаточного приливного явления с помощью гармонического анализа: результаты не затуманены влиянием долгопериодных гармоник. На примере спектрального анализа модельного ряда показано возможность формирования нелинейными явлениями короткопериодных и долгопериодных нелинейных волн: на открытой границе модели задавались восемь суточных и полусуточных основных волн (пики на периодах  $\approx 12$  и  $\approx 24$  часа), нелинейные эффекты формируют высокочастотные (пики на периодах 2-9 ч) и низкочастотные (пики на периодах 7 суток - полгода) гармоники.

**Четвертая глава** описывает результаты исследования баротропных приливных явлений. Первый параграф главы содержит информацию о линейных баротропных приливных явлениях. Построены новые котидальные карты, карты характеристик эллипсов приливных течений и карты

энергетических характеристик прилива основных волн (Рис. 1). Второй параграф четвертой главы содержит информацию о нелинейных приливных явлениях. В результате нелинейного взаимодействия восьми основных волн прилива появляются обертоны, остаточные эффекты, долгопериодные и короткопериодные гармоника.

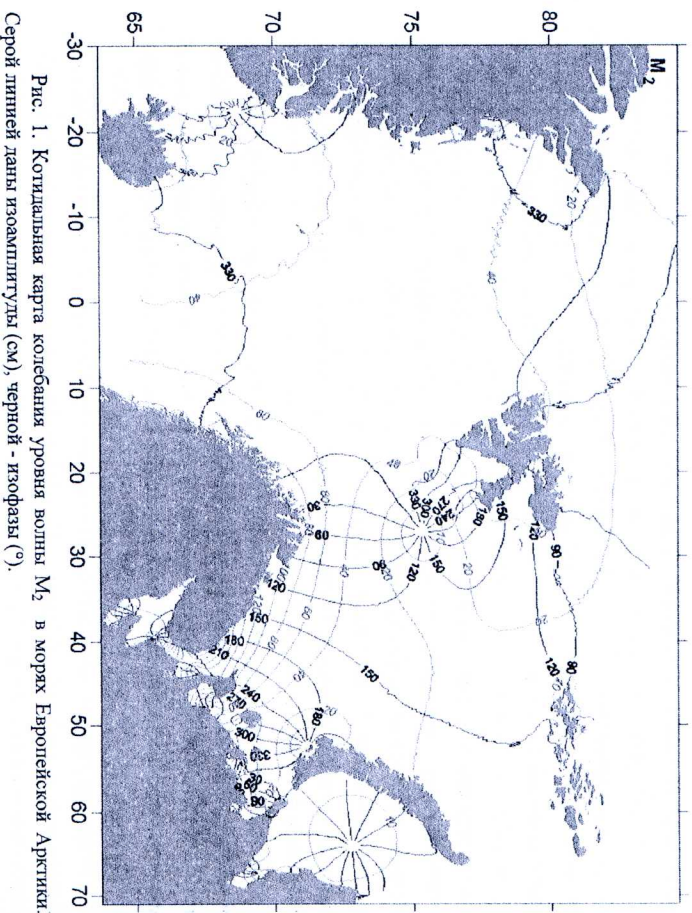


Рис. 1. Котилдальная карта колебания уровня волны  $M_2$  в морях Европейской Арктики. Серой линией даны изоамплитуды (см), черной - изофазы ( $^{\circ}$ ).

В таблицах 1 и 2 представлены нелинейные приливные волны, возникающие при нелинейном взаимодействии восьми основных волн, заложенных на открытой границе модели. В верхней треугольной матрице таблицы указана частота гармоник ( $^{\circ}/ч$ ), в нижней - обозначение гармоника. Таблица 1 содержит нелинейные гармоника, имеющие частоту, равную разности частот основных волн, а таблица 2 - нелинейные гармоника, имеющие частоту, равную сумме частот основных волн. В таблицах присутствуют долгопериодные, суточные, полусуточные, третьясуточные, четвертьсуточные гармоника. Разность частот гармоник  $M_2$  и  $S_2$  и гармоник  $O_1$  и  $P_1$  соответствует частоте полумесячной гармоника  $MS_F$  (период 14,76529 сут.), разность частот гармоник  $M_2$  и  $K_2$  и гармоник  $K_1$  и  $O_1$  соответствует частоте полумесячной гармоника  $M_F$  (период 13,66079 сут.), разность частот гармоник  $M_2$  и  $N_2$  и гармоник  $O_1$  и  $Q_1$  соответствует частоте месячной гармоника  $M_m$  (период 27,55455 сут.), разность частот гармоник  $S_2$  и  $K_2$  и гармоник  $K_1$  и  $P_1$  соответствует частоте полугодовой гармоника  $S_m$  (период 182,6211 сут.). Кроме того, разность

частот гармоник  $N_2$  и  $K_2$  и гармоник  $K_1$  и  $Q_1$  и гармоник  $S_2$  и  $N_2$  и гармоник  $P_1$  и  $Q_1$  соответствует частотам треть-месячных гармоник (периоды 9,132936 и 9,613718 сут.).

Таблица 1. Разность частот основных приливных волн и названия нелинейных гармоник с частотой, соответствующей разности частот основных приливных волн. Названия нелинейных гармоник приведены в нижней треугольной матрице, частота ( $^{\circ}/ч$ ) нелинейной гармоника дана в верхней (закрашенной) треугольной матрице.

		Треугольной матрице									
	$M_2$	$S_2$	$N_2$	$K_2$	$K_1$	$O_1$	$P_1$	$Q_1$			
$M_2$	0	1.0158958	0.5443747	1.0980331	13.9430356	15.0410686	14.0251728	15.5854433			
$S_2$	$MS_F$	0	1.5602705	0.0821373	14.9589314	16.0569644	15.0410686	16.6013391			
$N_2$	$M_m$	$MS_m$	0	1.6424078	13.3986609	14.4966939	13.4807981	15.0410686			
$K_2$	$M_F$	$S_m$	$M_F$	0	15.0410687	16.1391017	15.1232059	16.6834764			
$K_1$	$O_1$	$P_1$	$Q_1$	$K_1$	0	1.0980330	0.0821372	1.6424077			
$O_1$	$K_1$	$SO_1$	$NO_1$	$OO_1$	$M_F$	0	$MS_F$	1.0158958	0.5443747		
$P_1$	$MP_1$	$K_1$	$NP_1$	$KP_1$	$S_m$	$MS_F$	0	1.5602705			
$Q_1$	$JO_1$	$SO_1$	$K_1$	$KQ_1$	$M_m$	$MS_F$	$M_m$	0			

Следовательно, долгопериодные приливные волны  $S_m$ ,  $M_m$ ,  $M_F$ ,  $MS_F$ , существующие в разложении потенциала приливообразующих сил, искажаются результатами нелинейного взаимодействия основных волн. Этим, на наш взгляд, и может объясняться несоответствие величин измеренных амплитуд долгопериодных приливов и статической теории приливов, отмеченное во множестве работ (Максимов, Воробьев, Смирнов, 1967; Максимов, 1966, 1970; Фукс 1982). Помимо долгопериодных приливов, нелинейные эффекты могут искажать или воспроизводить суточные и полусуточные волны: в таблицах 1, 2 присутствуют как нелинейные суточные и полусуточные гармоника ( $MP$ ,  $NP$ ,  $KP$ ,  $SQ$ ,  $KQ$ ,  $NO$ ,  $SO$ ,  $OO$ ,  $OP$ ,  $OQ$ ), так и гармоника с частотами основных волн  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $J_1$ ,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_2$ ,  $K_2$ . Следовательно, не исключено и резонансное трехволновое взаимодействие между основными суточными и полусуточными волнами с нелинейными гармониками на частотах этих волн.

Таблица 2. Сумма частот приливных волн и названия нелинейных гармоник с частотой, соответствующей сумме частот приливных волн. Названия нелинейных гармоник приведены в нижней треугольной матрице, частота ( $^{\circ}/ч$ ) нелинейной гармоника дана в верхней (закрашенной) треугольной матрице. Диагональ матрицы содержит угловые скорости обертонов основных волн:  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $O_2$ ,  $P_2$ ,  $Q_2$ .

		Треугольной матрице									
	$M_2$	$S_2$	$N_2$	$K_2$	$K_1$	$O_1$	$P_1$	$Q_1$			
$M_2$	57.9682084	58.9841042	57.4238337	59.0662415	44.0251728	42.9271398	43.9430356	42.3827651			
$S_2$	$MS_2$	60.0000000	58.4397295	60.0821373	45.0410686	43.9430356	44.9589314	43.3986609			
$N_2$	$MN_2$	$SN_2$	56.8794590	58.5218668	43.4807981	42.3827651	43.3986609	41.8383904			
$K_2$	$MK_2$	$SK_2$	$NK_2$	60.1642746	45.1232059	44.0251729	45.0410687	43.4807982			
$K_1$	$OK_1$	$PK_1$	$QK_1$	$K_3$	30.0821372	28.9841042	30.0000000	28.4397295			
$O_1$	$MO_1$	$SO_1$	$NO_1$	$OO_1$	$M_2$	27.8860712	28.9019670	27.3416965			
$P_1$	$SO_3$	$SP_3$	$NP_3$	$PK_3$	$S_2$	29.9178628	28.3575923	26.7973218			
$Q_1$	$MO_3$	$SO_3$	$NO_3$	$KO_3$	$N_2$	$O_2$	$PO_2$	$Q_2$			

По результатам моделирования суммарная амплитуда нелинейных гармоник составляет более 10% от амплитуд основных волн в Белом море, юго-восточной части Баренцева моря, южнее архипелага Шпицберген, в центральной части Баренцева и Карского морей (Рис. 2). По

результатам гидродинамического моделирования с помощью гармонического анализа методом наименьших квадратов построены котидальные карты нелинейных гармоник.

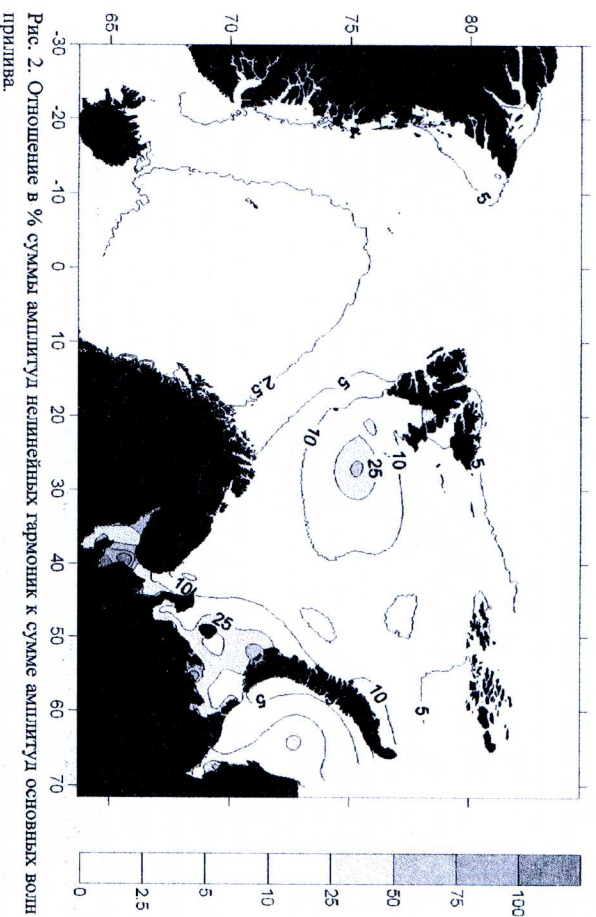


Рис. 2. Отношение в % суммы амплитуд нелинейных гармоник к сумме амплитуд основных волн прилива.

В четвертой главе диссертации приведены котидальные карты и описание характеристик нелинейных гармоник, рассчитанных по модели Белого моря. Максимальная амплитуда гармоника  $M_4$  достигает в вершине Мезенского залива 40 см. Возрастающие фазы от м. Конушии в сторону открытой границы говорит о стоке энергии волны  $M_4$  через открытую границу, что справедливо, и обусловлено применением импульсных граничных условий. Еще одна амфидромическая точка должна находиться в районе Терско-Орловского мыса. Возможно эта точка будет существенно ярче выдвигаться при учете входящей из Баренцева моря нелинейной волны  $M_4$ . Схожесть структуры котидальных карт основных полусуточных волн прилива объясняет подобие котидальных карт их обертонов и нелинейных гармоник. В результате нелинейного взаимодействия гармоник  $S_2$ ,  $N_2$  с волной  $M_2$  возникают нелинейные четвертьсуточные гармоника  $MS_4$ ,  $MN_4$ . Максимальные амплитуды этих нелинейных волн отмечаются в вершине Мезенского (более 25 см) и Кандалакшского (более 5 см) заливов. Кроме того, амплитуда гармоника  $MN_4$  превышает 5 см в Горье Белого моря. Схема изофаз волн  $MS_4$  и  $MN_4$  совпадает со структурой котидальных линий обортона волны  $M_4$ . Описанные выше волны являются результатом нелинейного взаимодействия основных нелинейных гармоник, однако, возможны также взаимодействия нелинейных гармоник между собой, так и нелинейных волн с основными волнами. В четвертой главе представлены котидальные карты нелинейных волн  $2MS_2$  ( $\mu_2$ ) и  $2NS_2$

( $L_2$ ) - эти гармоника есть в разложении потенциала правообразующей силы. Котидальные карты волн  $2MS_2$  и  $2NS_2$  имеют три амфидромических точки, две из них располагаются в районе нахождения амфидромий волны  $M_2$ , а третья точка, свойственная всем нелинейным гармоникам расположена возле мыса Терско-Орловский.

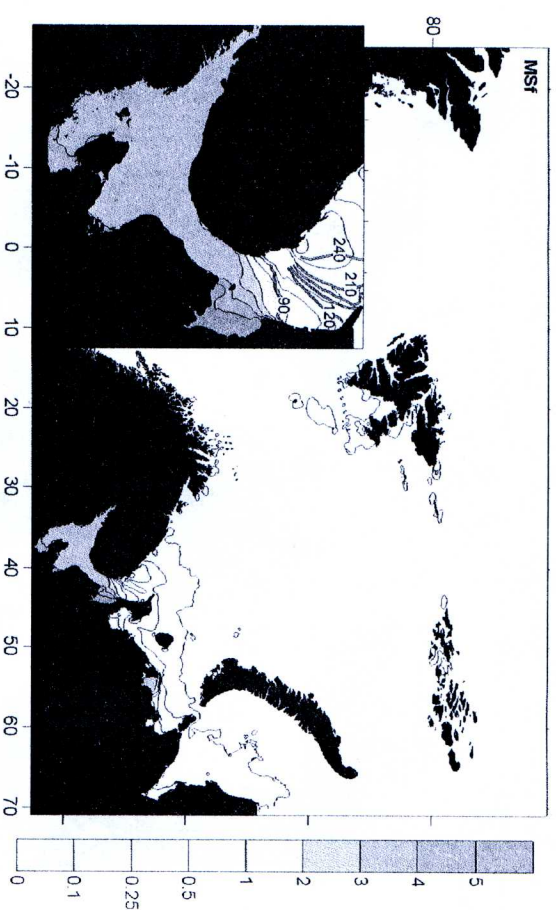


Рис. 3. Амплитуда нелинейной гармоника на частоте полумесячной волны  $MS_4$  (см). На карте врезке дана котидальная карта Белого моря.

До настоящего момента долгопериодные нелинейные волны прилива были совершенно не изучены в морях Европейской Арктики. По результатам моделирования наибольшие амплитуды для всех нелинейных низкочастотных волн отмечаются в Белом море и районе архипелага Шпицберген, где вклад нелинейных эффектов максимален. Определенным свойством, характерным для всех долгопериодных нелинейных гармоник является то, что фаза увеличивается из Белого моря в сторону Баренцева моря. Анализ пространственного распределения амплитуд и фаз долгопериодных гармоник показал, что возле Терско-Орловского мыса отмечается амфидромическая точка, образованная относительно большой по амплитуде волной, исходящей из Белого моря, и малой по амплитуде, распространяющейся вдоль Мурманского берега в Белое море (Рис. 3). Нелинейные долгопериодные приливные волны дополняют или искажают амплитуду «истинных» долгопериодных приливов, существующих в разложении потенциала приливообразующей силы. Проведено сравнение характеристик эллипсов приливных течений долгопериодных волн по данным инструментальных наблюдений с модельными оценками параметров нелинейных низкочастотных приливных волн. По этим данным установлено, что сравнительный вклад нелинейных долгопериодных волн достигает 14% для месячной волны  $M_m$ , 16% и 34% для полумесячных волн  $M_c$  и  $MS_2$  соответственно, для некоторых районов.

В четвертой главе приводятся оценки остаточных приливных явлений. В картине пространственной структуры остаточного приливного уровня отслеживаются две обширные зоны положительного остаточного уровня, совпадающие с районами со значимыми амплитудами нелинейных гармоник. Максимальное значение остаточного уровня, обусловленного приливными явлениями, наблюдаются в вершине Онежского залива и в вершине Мезенского залива, где остаточный уровень превышает 15 см. Устойчивые отрицательные значения среднего уровня (до 5 см) наблюдаются в северной части Воронки Белого моря, между мысами Канин Нос и Святой Нос (Рис. 4).

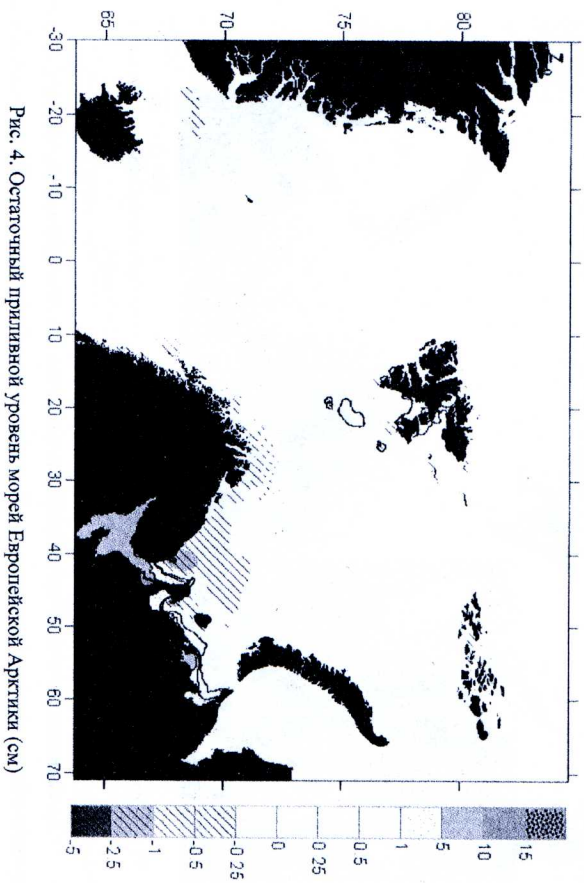


Рис. 4. Остаточный приливный уровень морей Европейской Арктики (см)

Остаточное приливное течение со скоростью более 1 см/с отмечается в Соловецких сагмах, Орле и Воронке Белого моря, в некоторых районах российской Арктики (северная часть Чёпской губы, эстуарий р. Печера, южная часть пролива Карские Ворота), и в районах архипелага Шпицберген, шпицбергенской банки, островов Медвежий и Надежды, в прибрежной зоне норвежского побережья и Земли Франца Иосифа. Свыше 5 см/с отмечаются остаточные скорости в вершине Мезенского залива, в поперек Воронки Белого моря на траверзе м. Конгшип, в проливах архипелага Шпицберген, вокруг островов Медвежий и Надежды. Структура остаточных течений совпадает с постоянными течениями в некоторых районах. Следовательно, подтверждается тезис о том, что остаточные течения способствуют формированию общей циркуляции акватории, где приливные явления существенны. В некоторых местах морей Европейской Арктики, например, в Воронке Белого моря и Шпицбергенской банки, постоянные течения полностью определяются остаточными течениями.

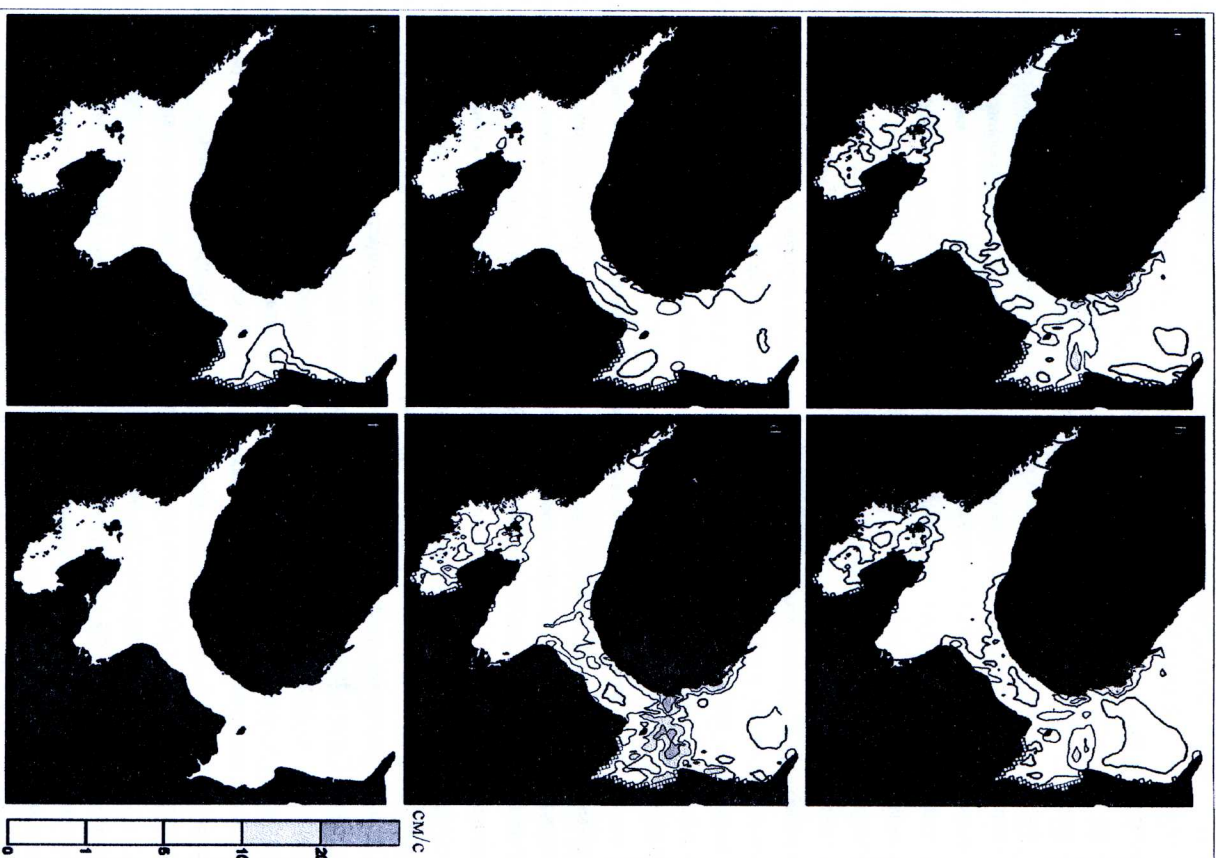


Рис. 5. Модуль скорости остаточной приливной циркуляции по данным разноточных экспериментов: а – модель с полными условиями; б – модель без мелкомасштабной нелинейности ( $D=H$ ); в – модель без конвективной нелинейности; д – модель с линейным законом донного трения; е – линейная модель с учетом приливной осушки; ф – линейная модель без учета приливной осушки.

Третий параграф четвертой главы посвящен численным экспериментам по выявлению механизмов генерации нелинейных приливных явлений на примере Белого моря. В ходе экспериментов было установлено, что при удалении мелководной нелинейности суммарная амплитуда нелинейных гармоник падает примерно на 10% на всей акватории Белого моря (за исключением северной части Воронки). Результаты численной реализации гидродинамической модели без конвективных ускорений показали также замеченное по сравнению с результатами моделирования с полными условиями отношение амплитуд нелинейных гармоник к амплитудам главных волн. Однако вклад конвективной нелинейности в формирование нелинейных волн несколько уступает вкладу мелководной нелинейности. Существенно меньшие амплитуды нелинейных гармоник получаются при линейном законе донного трения. Следовательно, фрикционная нелинейность вносит больший вклад, чем мелководная и, тем более, конвективная нелинейности в формировании нелинейных приливных гармоник. При удалении мелководной, конвективной и фрикционной нелинейности, но при учете осущки, генерируются нелинейные приливные волны: в вершине Мезенского залива амплитуды нелинейных гармоник, вызванных приливной осущкой составляют около 10% от амплитуд основных волн. При моделировании в линейном приближении и без приливной осущки нелинейные приливные волны отсутствуют в результатах гармонического анализа.

На рис. 5. представлены карты модуля скорости остаточной приливной циркуляции по данным различных экспериментов. При удалении мелководной нелинейности меняется структура циркуляции в Воронке Белого моря: так течения возле мыса Конушин приобретает завихренность. В целом порядок скоростей остаточной приливной циркуляции остается таким же, как и в эксперименте с полными нелинейными условиями. При удалении конвективных ускорений структура остаточной приливной циркуляции меняется кардинально: в схеме течений отсутствуют характерные для других экспериментов крутовороты в Воронке, Горле и Онежском заливе. Скорость остаточных приливных течений существенно уменьшается: наблюдается стоковое течения в Горле и Воронке. В результатах моделирования в линейном приближении и с учетом приливной осущки отчетливо проследживается остаточное течение в Мезенском заливе, направленное от района приливной осущки в сторону открытой границы. При моделировании в линейном приближении и без учета приливной осущки скорости остаточных течений равны нулю на всей акватории. Таким образом, приливная осущка формирует нелинейные гармоники и остаточные явления, т.е. обнаружен новый тип нелинейности – изменчивость границ бассейна.

В заключительном параграфе четвертой глава проводится оценка влияния нелинейных гармоник на изменчивость характеристик основных волн прилива. Для описания изменчивости констант прилива были обработаны многолетние измерения уровня в морях Баренцевой Арктики на семи станциях. Определены оценки математического ожидания и дисперсии гармонических постоянных для каждого месяца. На всех станциях отчетливо проследживается изменение фазы и амплитуды полустуточной волны  $M_2$  в различные месяцы. Причем на различных станциях отмечается индивидуальное распределение по сезонам величин амплитуд и фаз. Разброс значений амплитуд, рассчитанной по ряду инструментальных наблюдений длиной один месяц, может

превышать 10% от амплитуды, вычисленной по годовым рядам; разброс значений угла положения превышает 5°. Возможно, что причиной «изменчивости» констант прилива может служить модуляция основных волн прилива нелинейными гармониками. В результатах моделирования без учета атмосферных сил и льда отмечаются два максимума, как в годовом ходе амплитуд, так и фазы. Данная «полугодовая» периодичность обусловлена, скорее всего, модуляцией основной волны нелинейной волной  $OP_2$ , которая может быть результатом нелинейного взаимодействия двух волн  $O_1$  и  $P_1$ , или даже результатом взаимодействия трех волн  $K_2$ ,  $M_2$  и  $S_2$ .

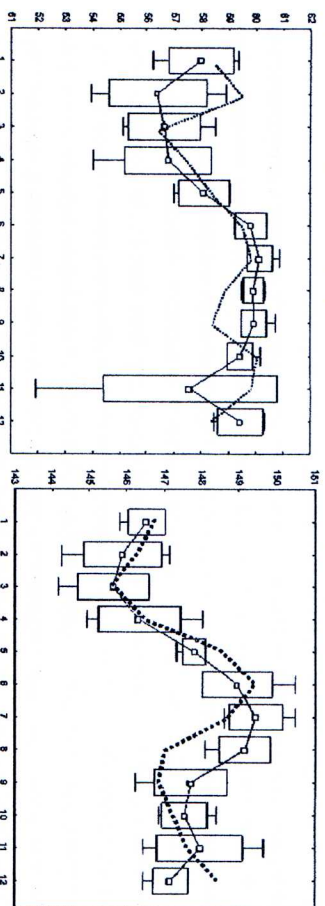


Рис. 6. Изменчивость амплитуды (слева) и фазы (справа) волны  $M_2$  на станции Кемь. Точками дается математическое ожидание; верхняя и нижняя границы «шишки» - сумма и разность математического ожидания и среднеквадратического отклонения, соответственно; «усы» соответствуют максимальному и минимальному значению. Пунктирной линией показаны результаты моделирования; масштаб модельных данных утрирован: величина изменчивости модельной оценки для амплитуды – 1,2 см, для фазы – 2°.

На рис. 6. представлен годовой ход амплитуды и фазы волны  $M_2$  по данным анализа инструментальных рядов измерений на станции Кемь и данные годового хода по модельным данным. Как видно из рисунка проследживается общие черты в изменчивости годового хода амплитуды и фазы по модельным и инструментальным данным. Сопоставляя размеры вертикальных колебаний можно определить, что вклад чисто нелинейно-волновой модуляции составляет на станции Кемь 37% от общей изменчивости амплитуды и около 50% от изменчивости фазы.

**Пятая глава** диссертации содержит результаты исследования нелинейных бароклинных явлений приливных зон. В первом параграфе оценивается вклад приливных явлений в формирование фронтальных зон и термогазичной структуры вод Белого моря. Для интерпретации приливных фронтов, возникающих в Белом море, был проведен численный эксперимент: расматривается трансформация приливными явлениями устойчивой пространственно однородной вертикальной стратификации. Квазистационарные приливные фронты отмечаются уже на 7 суток модельного времени. Пространственное положение фронтальных зон и вертикально однородных вод совпадает с представлениями о волных массах Белого моря. Тот факт, что результаты моделирования приливных фронтов совпадает с наблюдаемыми явлениями, говорит о том, что приливы очень сильно влияют, а зачастую и формируют термогазичную структуру вод Белого



моря. Примечательно, что установившиеся фронты совершают перемещения на 15-20 км вдоль векторов приливных течений с полусуточным периодом. В конце параграфа отмечается, что периодичность произвольства турбулентной энергии, вызванное неравенствами прилива, формирует периодическое колебание характеристик термодинамической структуры. Чем и следует объяснять колебания температуры и солёности с частотами долгопериодных приливов, обнаруженные во многих районах Мирового океана (Фукс, 1982).

Второй параграф содержит оценки характеристик внутренних приливных волн при легкой стратификации вод. Анализ временных рядов плотности на различных горизонтах показал, что перманентно происходит трансформация приливами термодинамической структуры, и, следовательно, без притока тепла через поверхность бароклинные динамические явления будут соответствовать нестационарным процессам. Поэтому для анализа бароклинных приливных явлений выбрали ряды, длиной 720 часов, которые считались квазистационарными. Максимальная амплитуда смещения бароклинной волны  $M_2$  составляет 9 метров в районе Воронки Белого моря между мысами Святой Нос и Канин Нос. В самом же бассейне Белого моря максимальная амплитуда составляет около 7 метров на южном склоне глубоководной части Белого моря северо-восточнее Соловецких островов. Пространственное распределение параметров нелинейных гармоник  $M_4$  и  $M_{S4}$  внутренних волн схоже: максимальная амплитуда этих волн приурочена к склонам глубоководного бассейна центральной части и Воронки Белого моря. Спектральный анализ вертикальных скоростей показал наличие пиков на полусуточных и четвертьсуточных частотах.

Во втором параграфе пятой главы приведены результаты моделирования бароклинной остаточной приливной циркуляции. В целом, бароклинная циркуляция Белого моря в приповерхностных слоях совпадает с баротропной циркуляцией, но модуль остаточного течения поверхностного слоя несколько больше течений баротропной циркуляции. С глубиной схема циркуляции сохрывается, что объясняется интенсивным перемешиванием в мелководных частях моря, где наблюдаются существенные остаточные течения, а модуль скорости остаточных течений уменьшается с глубиной. По данным результатов моделирования была проведена оценка зон апвеллинга и дувнеллинга, вызванных приливными явлениями. Установлено, что зоны апвеллинга чередуются в пространстве с зонами дувнеллинга. Устойчивые области подпитки и опускания вод практически на всех горизонтах отмечаются в районе Соловецкой салмы, и на границе Горла Белого моря и центрального бассейна.

В заключении излагаются основные результаты диссертационного исследования:

1. Дано феноменологическое описание исследуемых явлений и на простях тригонометрических примерах доказана возможность формирования нелинейными эффектами, заложенными в уравнениях движения и неразрывности, остаточного приливного уровня, остаточного приливного течения, короткопериодных и долгопериодных нелинейных гармоник.
2. На основе программных алгоритмов Ripseon Ocean Model (ROM) были созданы новые приливные модели Европейской Арктики и Белого моря с высоким пространственным разрешением.

Особенности этих моделей:

- Построение сеточной области модели проводилось на поверхности эллипсоида вращения Красовского.
- Приливные уровни и течения для открытой границы рассчитывались по восьми главным суточным и полусуточным волнам прилива. Предвычисление проводилось для календарной даты по основной формуле предвычисления приливов.
- На открытой границе Белого моря задавались импедансные граничные условия. Сравнительный анализ результатов моделирования с применением импедансных граничных условий и условия осцилляции уровня показал, что отражение нелинейных гармоник от открытой границы при осциллиционном условии существенно искажает параметры нелинейных эффектов.
- Учет приливной осушки. Большие амплитуды прилива в некоторых районах морей Европейской Арктики вызывают периодическое затопление-высыхание больших площадей литоральных зон. Встроенная нами в модель процедура осушки берега в зависимости от высоты прилива показала надежную работу: приливная осушка Белого моря по результатам нашего моделирования совпадает с данными навигационных карт. Применение подобного механизма изменения береговой линии позволило нам не ограничивать пространственные границы модели изобатами 5 метров, что существенно бы искажило морфометрические характеристики таких мелководных районов как, например, Онежский залив, а, следовательно, и изменило бы характеристики линейных и нелинейных приливных явлений. Таким образом, учет приливной осушки важен для точного моделирования линейных и нелинейных волн прилива в Белом море.
- 3. Результаты верификации моделей показывают, что модели очень качественно воспроизводят приливные явления в морях Европейской Арктики. Верификация модели производилась с использованием результатов гармонического анализа длительных рядов наблюдений за течениями на буйковых станциях, и данных прибрежных уровненых постов. Кроме того, верификация модели проводилась с использованием котидальных карт других авторов и базой гармонических постоянных прилива, опубликованных в различных источниках.
- 4. Построены новые котидальные карты основных волн прилива и нелинейных гармоник по данным инструментальных измерений и результатов моделирования.
- 5. Доказано, что долгопериодные приливные волны  $S_{as}$ ,  $M_{as}$ ,  $M_s$ ,  $M_{S4}$ , существующие в разложении потенциала приливообразующей силы, значительно трансформируются в результате нелинейного взаимодействия основных волн. Анализ амплитуд изофаз и долгопериодных гармоник показал, что возле Терско-Орловского мажка расположена амфиромическая точка долгопериодных нелинейных приливных волн, образованная относительно большой по амплитуде волной, исходящей из Белого моря, и малой по амплитуде, распространяющейся вдоль Мурманского берега в Белое море.

6. **Исследованы остаточные приливные явления**, которые определялись гармоническим анализом. В картине пространственной структуры остаточного приливного уровня отслеживаются две обширные зоны положительного стационарного уровня, совпадающие с районами со значимыми амплитудами нелинейных гармоник. Остаточный уровень положительен в районе Белого моря, прибрежной зоны Печерского моря, и вокруг архипелага Шпицберген и шпицбергенской банки. Максимальное значение остаточного уровня, обусловленного приливными явлениями, наблюдается в вершине Онежского залива и в вершине Мезенского залива (более 16 см). Устойчивые отрицательные значения остаточного уровня наблюдаются в северной части Воронки Белого моря, между мысами Каннин Нос и Святой Нос.

Интересное остаточное приливное течение отмечается в Соловецких салмах, Горле и Воронке Белого моря, в некоторых районах российской Арктики (северная часть Чэшской губы, эстуарий р. Печера, южная часть пролива Карские Ворота), и в районах архипелага Шпицберген, шпицбергенской банки, островов Мелвезкий и Надежды, в прибрежной зоне норвежского побережья и Земли Франца Иосифа. Максимальные скорости остаточной приливной циркуляции отмечаются в вершине Мезенского залива, и понерек Воронки Белого моря на траверзе м. Конушин, в проливах архипелага Шпицберген, вокруг островов Мелвезкий и Надежды. Также выделяются более слабые, но устойчивые остаточные течения вдоль больших градиентов глубин склона шельфа: от норвежского побережья к Шпицбергену, и восточнее мощного циклонического остаточного круговорота шпицбергенской банки и островов Мелвезкий и Надежды. Структура остаточных приливных течений совпадает с постоянными течениями: Восточно-Шпицбергенское течение, Мелвезкинское течение, Южно-Шпицбергенское течение, течение Варенца, Беломорское течение, Печорское течение.

7. С помощью численных экспериментов на гидродинамической модели были **оценены вклады различных типов нелинейности** в формирование тех или иных нелинейных явлений. Установлено, что в формировании остаточных приливных явлений определяющий вклад вносит конвективная нелинейность. Для генерации нелинейных гармоник наиболее важным является вклад фрикционной нелинейности, несколько меньший вклад вносит мелководная нелинейность и существенно меньшее влияние, по сравнению с фрикционной и мелководной нелинейностью, оказывают конвективные ускорения.

8. На основе модельных экспериментов **обнаружен новый тип нелинейности** – «**всплошная нелинейность береговой линии**»: **приливная осушка генерирует остаточные течения и нелинейные волны**. При моделировании приливов Белого моря в линейном приближении (отключены конвективная, мелководная и фрикционная нелинейности) но с учетом приливной осушки отчетливо прослеживается остаточное течение в Мезенском заливе, направленное от района приливной осушки в сторону открытой границы. При моделировании в линейном приближении и без учета приливной осушки скорости остаточных течений равны нулю на всей акватории, нелинейные гармоника не выделяются.

9. Результаты численной реализации бароклинной модели Белого моря доказали, что **фронты и вертикально-однородные волны имеют исключительно приливное происхождение. Определены параметры внутренних приливных волн Белого моря в терминах гармонического анализа**. Максимальная амплитуда смещения бароклинной волны  $M_2$  составляет 9 метров в районе Воронки Белого моря между мысами Святой Нос и Каннин Нос; в самом же бассейне Белого моря максимальная амплитуда составляет около 7 метров на южном склоне мелководной части Белого моря северо-восточнее Соловецких островов. Высоты внутренних приливных волн в Белом море могут достигать 20 метров. Амплитуды внутренней гармоника  $M_4$  - обертона основной лунной полусуточной волны, локализируются точно над максимальными градиентами глубин.

10. По данным моделирования **расчетная бароклинная остаточная приливная циркуляция**. Бароклинная циркуляция в приповерхностных слоях совпадает с баротропной циркуляцией, но модули остаточного течения поверхностного слоя несколько больше баротропных течений остаточной циркуляции. С глубиной схема циркуляции сохраняется, что объясняется интенсивным перемешиванием в мелководных частях моря, где наблюдаются существенные остаточные течения, а модуль скорости остаточных течений уменьшается с глубиной. Направление вертикальной компоненты остаточной скорости интерпретируется нами как зоны апвеллинга и даунвеллинга. Установлены локальные зоны апвеллинга в районе Соловецких салм, на границе бассейна и Горла Белого моря. Характерно, что зоны апвеллинга, приуроченные к границам фронтальных зон, чередуются с зонами даунвеллинга.

#### **Основные итоги диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Захарчук Е.А., Гусев А.К., Май Р.И., Тихонова Н.А. О возможности оперативной оценки синоптической изменчивости океанологических полей Варенцева моря на основе спутниковых альтиметрических измерений. // VII Международная специализированная выставка и конференция «АКВАТЕРРА-2004». Сборник материалов по конференции. 2004. Санкт-Петербург. 164-171 с.
2. Май Р.И. Влияние выбора геологической основы восточной области на результаты математического моделирования // Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов мирового океана. Владивосток. ТИНРО-Центр. 2004. с. 24-28.
3. Май Р.И. Климатически значимые нелинейные приливные явления морей Европейской Арктики // Материалы XII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов - 2005». Секция Географии. М. 2005. с. 81.

4. Май Р.И. Моделирование нелинейных приливных явлений в Белом море. // Пятая Российская научно-техническая конференция «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» («НО-2004»). 2004. СПб. с 81-82.
5. Май Р.И. Нелинейные баротропные и бароклинные приливные явления в морях Европейской Арктики по данным модельных расчетов, контактных и дистанционных измерений. // Десятая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации работ по грантам Санкт-Петербургского конкурса 2004 года для молодых ученых и специалистов. СПб., 2004. 44-45 с.
6. Май Р.И., Фукс В.Р. Нелинейные баротропные приливные явления и остаточная приливная циркуляция в Белом море. // VII Международная специализированная выставка и конференция «АКВАТЕРРА-2004». Сборник материалов по конференции. 2004. Санкт-Петербург. 197-201 с.
7. Май Р.И., Фукс В.Р. Остаточные приливные явления в Белом море // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря. Материалы IX международной конференции 11-14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия, Петрозаводск. 2005. С. 202-207.
8. Vashnashnikov I. I., May R. I. Ki internal tidal wave energy distribution in the Okhotsk Sea. The 16-th international symposium on Okhotsk Sea & sea ice, Proceedings of the Mombetsu-2001 conference, 4-8 February 2001, Mombetsu, Hokkaido, Japan, 8p.
9. Foxh V.R., May R. I. The tidal front on example of the Okhotsk and White seas // The 20-th international symposium on Okhotsk Sea & sea ice, Proceedings of the Mombetsu-2005 conference, Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2005, pp. 267-271
10. May R. I. The simulation of residual tidal phenomena in the White Sea, Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meet. Suppl., 2004. Abstract OS41D-0498, F1074.
11. May R. I. Simulation of climate significant nonlinear tidal phenomena in the Euro Arctic seas // IEEE OCEANS'05 EUROPE Conference proceedings. Oceanography: Modeling & Data Processing Best, France, 2005. 041127-01.
12. May R. I. The simulation of barotropic and baroclinic non-linear tidal phenomena in the White Sea. // Abstracts of Challenger conference for marine science. Liverpool. 2004. 183 p.

Подписано в печать 03.04.2006  
 Формат 60x84 1/16. Бумата офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1.2. Тираж 50 экз.  
 Заказ № 300

Отпечатано в ООО «Издательство "ПЕМА"»  
 199004, Россия, Санкт-Петербург,  
 В.О., Средний пр., д.24, тел/факс: 323-67-74  
 e-mail: izd\_lemma@mail.ru