

УДК 551.466.82

© А.В.Зимин^{1,2}, А.А.Родионов¹, Г.В.Жегулин^{1,2}, 2013¹Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
zimin@rshu.ru

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ НА ШЕЛЬФЕ БЕЛОГО МОРЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ

Представлены методика и результаты натуральных экспериментальных исследований короткопериодных внутренних волн в летние сезоны 2008–2011 гг. в типовых по гидрологическим и морфометрическим условиям районах Белого моря. Показано, что характеристики полей внутренних волн в них существенно отличаются. Выделены области, в которых регулярно отмечаются интенсивные внутренние волны, обладающие значительной нелинейностью и привязанные к определенным фазам прилива. Их высота может достигать половины глубины моря. Периоды лежат в диапазоне 10–20 мин.

Ключевые слова: внутренние волны, контактные измерения, структура вод, шельф Белого моря.

Небольшое по площади Белое море обладает сложной конфигурацией рельефа дна и берегов. Заливы, глубоко вдающиеся в сушу, различаются по средним глубинам и объемам речного стока. Это приводит к неизбежному формированию фронтальных областей на границах акваторий моря с различными морфометрией и речным стоком. Динамические процессы в Белом море, связанные в основном с действием приливных сил и влиянием атмосферных процессов, имеют специфические особенности проявления в различных районах. Относительная мелководность моря и его расположение на пути движения циклонов способствуют развитию нестационарных движений вод синоптического масштаба. Важнейшим динамическим фактором в Белом море является прилив. Мощные приливные процессы энергетически превосходят все остальные движения и создают доминирующие на большей акватории квазипериодические приливные течения.

В Белом море преобладают приливы полусуточного периода M_2 [1]. Приливный поток трансформируется под влиянием изменений рельефа дна и конфигурации береговой линии, что приводит к образованию на шельфе внутренних приливных волн [2] и периодическим смещениям фронтальных зон в районах проливов [3]. Основными районами возбуждений внутренних волн приливного периода являются участок к северу от Соловецких островов у входа в Онежский залив (наклоны дна критические или сверхкритические) и участок на выходе из Горла (наклоны дна докритические, но баротропные скорости намного больше, чем около пролива, связывающего Бассейн и Онежский залив). На основании расчетов по трехмерной гидротермодинамической модели в работе [2] было показано, что внутренние волны приливного периода имеют амплитуды до 8 м и диссипируют локально, не успевая распространиться далеко за пределы очагов генерации. Учет нелинейных эффектов дает оценки амплитуд внутренних волн в 10 м [4, 5].

До настоящего времени сведения о характеристиках короткопериодных внутренних волн (ВВ) в Белом море основывались на результатах отдельных разрозненных наблюдений [6, 8, 11]. В исследованиях отмечаются различия внутренних волн, регистрируемых в открытом районе моря и на шельфе. В глубоководной части Белого моря [7, 8] регистрировались плавные короткопериодные колебания небольших амплитуд (1–2 м).

В мелководных районах шельфа волны характеризовались значительной высотой (до 17 м) [6, 8] и соответствовали критериям интенсивных внутренних волн [9, 10]. Такие волны приводят к сильной пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей в районах их генерации и распространения [6, 9, 11], с чем связана важность их изучения в интересах решения научных и прикладных задач освоения океана и обеспечения жизнедеятельности морских экосистем.

За последние несколько лет был выполнен комплекс работ по исследованию характеристик короткопериодных ВВ в Белом море. Исследования проводились по единой методике в районах с различной гидрологической структурой вод и морфометрией дна. Основой методики работ являлось проведение измерений на микрополигонах с пространственно-разнесенных носителей – буйковых станций, донных профилографов скорости течений и заякоренного судна, включая учащенное сканирование водной толщи от поверхности до дна. В настоящей статье представлены обобщенные данные по характеристикам короткопериодных внутренних волн в различных районах Белого моря, полученные на основе натурных измерений 2008–2011 гг.

Методика проведения экспериментов и фоновые условия в районах исследований. Исследования ВВ проводились в летний сезон на протяжении четырех лет (июль 2008, июнь–июль 2009, август 2010, июль 2011 гг.) на четырех полигонах около Соловецких островов. Работы выполнялись в погодных условиях, обусловленных преимущественно влиянием малоградиентного барического поля. Волнение моря не превышало 3 баллов, скорость ветра – менее 7 м/с. Карта районов работ, с указанием года выполнения исследований и номера полигона (№ 1–4), представлена на рис.1. Полигоны располагались как в практически однородных по вертикали водах Онежского залива, так и в резко стратифицированных водах Бассейна [12]. Наблюдения в 2008–2009 гг. выполнялись с заякоренного судна и располагавшейся рядом буйковой станции, а в 2010–2011 гг. были поставлены системы из трех буйковых станций, расположенных в виде треугольника со сторонами около 1.5 км. Продолжительность наблюдений в каждом случае составляла более суток (охватывались 2–3 цикла волны M_2).

При наблюдениях в одной точке (2008–2009 гг.) на дне на немагнитной платформе устанавливался акустический профилограф течения ADP Sontek–500 кГц, а с заякоренного судна НИС «Эколог» сканировалась водная толща зондом Т-90. На горизонт слоя скачка вывешивался зонд SD-202 с дискретностью измерений 30 с.

При постановке полигона из трех буйковых станций (2010–2011 гг.) проводились следующие работы:

- северная граница полигона – на дно на немагнитной платформе устанавливался акустический профилограф течения ADP Sontek–500 кГц. Кроме измерений течений он регистрировал колебания уровня и придонной температуры, дискретность измерений составляла 2 мин;

- центральная часть полигона – устанавливалась буйковая станция с измерителем течений «Вектор-2», который в придонном слое производил измерения с дискретностью 30 с, и зондом (SBE-19 plus или Т-90) на горизонте слоя скачка, производившим измерения с дискретностью 2 мин;

- южная граница полигона – с заякоренного судна НИС «Эколог» проводились работы позиционными измерителями течений и температуры JFE Alec на горизонтах 8, 11 и 14 м (2010 г.) и 10, 13, 16, 19 м (2011 г.) с дискретностью 2 мин, а также сканирование водной толщи зондом Т-90М.

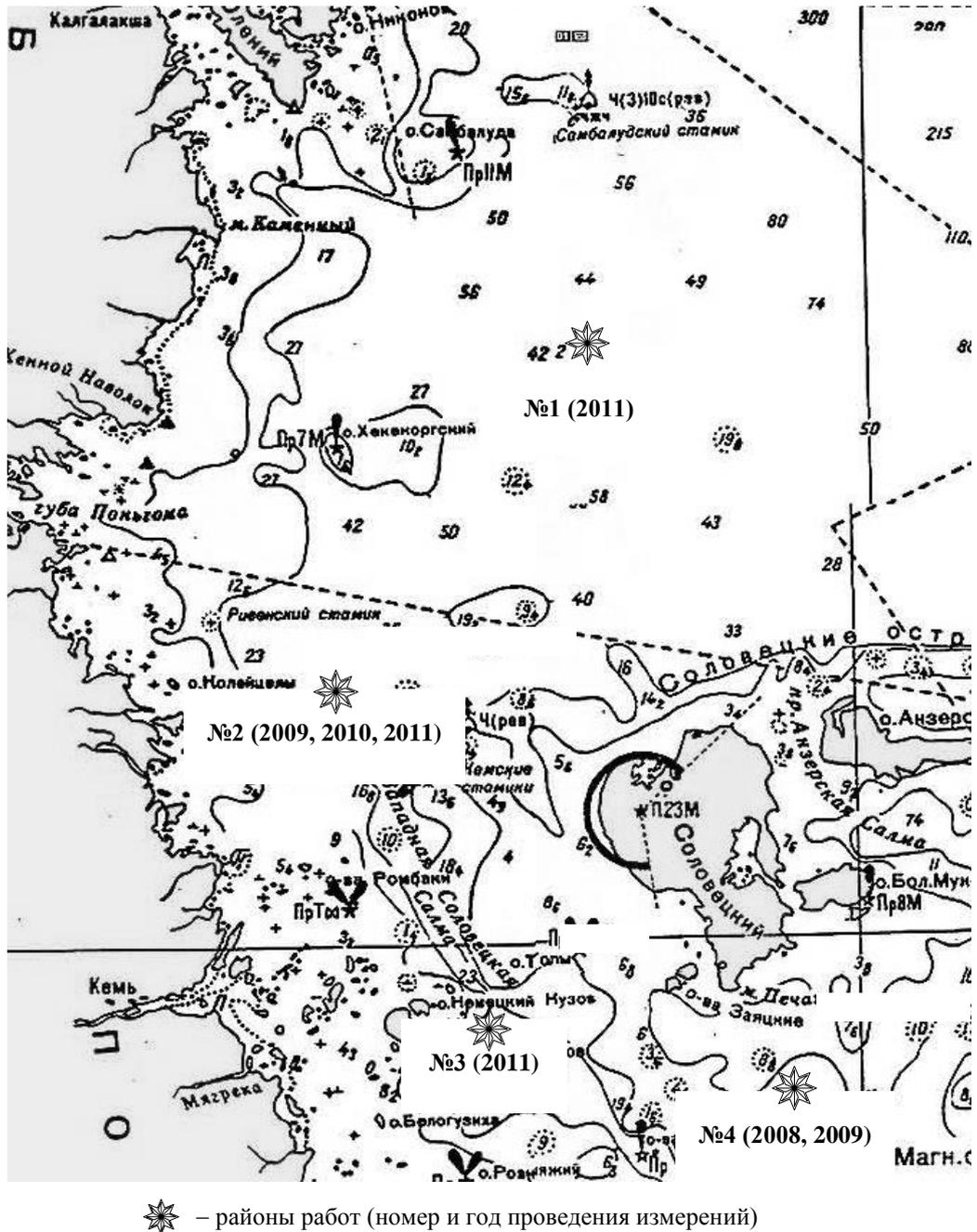


Рис.1. Карта районов работ по исследованию характеристик внутренних волн.

Сканирование выполнялось от поверхности до дна. Один спуск и подъем зонда занимали 1–2 мин. Зондирование велось в режиме 2 ч непрерывного сканирования, 1 ч – перерыв. Всего на полигоне выполнялось 8–10 серий сканирования. Океанографические станции с полным комплексом попутных метеорологических наблюдений выполнялись каждые полчаса.

В соответствии с целевой установкой данной статьи характеристики короткопериодных ВВ оценивались по результатам сканирований, а остальные измерения использовались для учета гидролого-динамических условий в районе проведения работ и определения направлений распространения ВВ. Комплексный анализ результатов измерений будет представлен в следующих работах. Частично результаты исследований взаимосвязи колебаний температуры и течений для конкретных экспериментов изложены в работах [6, 13].

По данным сканирования определялась глубина залегания термоклина. Полученные вариации положения термоклина во времени позволили оценить высоту и период каждой из проходящей через полигон внутренней волны по стандартной методике, используемой для описания характеристик поверхностных волн, которое подробно изложено в [14]. По этой методике каждая волна выделяется на основании изменения положения характерной поверхности во времени. При этом оценивается высота волны как средняя величина между глубиной залегания переднего и заднего ее склонов, и период каждой волны – как временной интервал между соседними минимумами залегания изотермы. В качестве характерной поверхности выбиралась изотерма, соответствующая среднему положению термоклина. При выделении ВВ рассматривались колебания термоклина с периодами более 3 мин и высотой более 1 м. Статистическое обобщение их характеристик позволило вычислить повторяемость, обеспеченность волн разной высоты и периода в различных по гидрологическим условиям районах Белого моря.

Полигон № 1 находился в Бассейне Белого моря, юго-восточнее области с критическим наклоном дна для полусуточной приливной волны. Глубина на полигоне около 55 м. Здесь в июле 2011 г. наблюдалась трехслойная стратификация вод, характерная для глубоководных участков шельфовых районов бассейна Белого моря. Поверхностные и придонные воды имели меньшую толщину, чем промежуточные. Температура поверхностных вод составляла 14–18°C, соленость – 26.8–27.0 ‰. Промежуточный слой занимал основную толщу вод от 15 до 45 м. Температура в нем понижалась с глубиной от 12 до 3°C, соленость повышалась от 27.0 до 27.9 ‰. На придонных горизонтах полигона прослеживались холодные (0.5–3°C) и соленые (28.0–28.3 ‰) воды. На рис.2, а показано распределение частоты плавучести N по вертикали на данном полигоне, осредненное за приливной период. Локальные максимумы N отмечались у поверхности в слое до 5 м, в середине водной толщи – в слое 15–30 м и слое около 40 м.

Полигон № 2 находился на границе Бассейна и пролива Западная Соловецкая Салма. Он характеризуется меньшими (около 35 м) глубинами, чем полигон № 1. Наблюдения, проводившиеся в этом районе в течение трех лет, показали, что структура вод является двухслойной. Поверхностные воды занимали слой 10–15 м и характеризовались значительной изменчивостью своих характеристик, а придонные воды, охватывающие всю остальную толщу, обладали стабильными характеристиками. По своим индексам воды двух верхних слоев на полигонах № 1, 2 совпадают. В данном районе отмечается значительная межгодовая изменчивость интенсивности слоя скачка гидрофизических характеристик. Резкий пикноклин (до 0.16 у.е./м) отмечен по данным наблюдений, выполненных в августе аномально жаркого 2010 г., а наименее интенсивный скачок (до 0.08 у.е./м) был зарегистрирован в конце июня 2009 г. Интенсивность слоя скачка плотности в июле 2011 г. имела промежуточное значение. Толщина слоя скачка во все годы составляла 5–7 м. Максимум градиента плотности наблюдался на глубине около 10 м. Распределение частоты плавучести на данном полигоне за 2009–2011 гг. приведено на рис.2, б.

Полигон № 3 находился на границе пролива Западная Соловецкая Салма и Онежского залива, разделяющей воды залива и Бассейна. Глубина составляла около 25 м. Изменчивость термохалинных характеристик по вертикали была минимальна. По данным наблюдений, в июле 2011 г. температура изменялась от 10.5 до 12.5°C, соленость – от 26.9 до 27.4 ‰. В отдельные моменты времени (первая половина отлива) воды были практически однородны от поверхности до дна – температура составляла около 11.5°C, соленость – около 27.1 ‰. Этот полигон можно отнести к типичным районам с «горловским» [3] (однородным) типом распределения вод по вертикали. Максимум $N(z)$ находился в слое 7–8 м и не превышал значения 0.02 1/с (рис.2, в). Наличие локального максимума частоты плавучести в придонной области связано с затокном вод из Бассейна во время прилива.

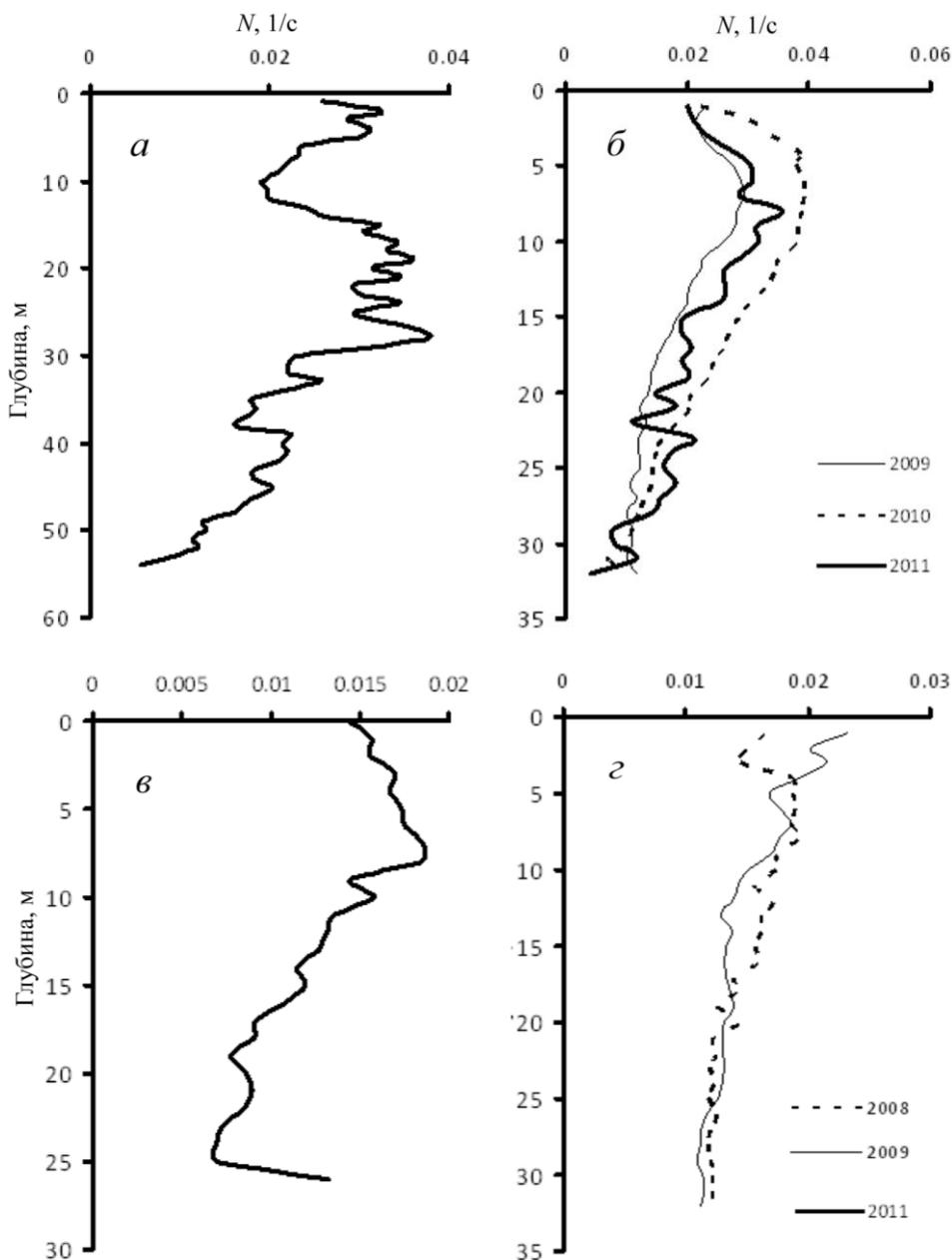


Рис.2. Профили частоты плавучести, осредненные за приливный цикл по данным наблюдения на полигонах № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в), № 4 (г).

Полигон № 4 находился южнее Соловецких островов в Онежском заливе Белого моря, в районе с резкими изменениями глубины дна. Наблюдения за характеристиками ВВ выполнялись в июле 2008 г., июне 2009 г. в близко расположенных точках со средней глубиной около 45 м. Данный район был выбран как типичный глубоководный участок Онежского залива. Вертикальная структура вод характеризовалась слабовыраженной стратификацией. Верхний слой прогретых ($10.5\text{--}8.5^\circ\text{C}$ в 2008 г., $7.5\text{--}5.5^\circ\text{C}$ в 2009 г.) и распресненных ($25.8\text{--}26.2\text{‰}$ в 2008 и 2009 г.) вод простирался до глубины 5–15 м. Ниже до дна наблюдались холодные (около 7°C в 2008 г., $4.0\text{--}4.5^\circ\text{C}$ в 2009 г.), чуть более соленоватые (около 26.4‰ в 2008 г., $26.6\text{--}26.7\text{‰}$ в 2009 г.) практически однородные по вертикали воды. Распределение частоты плавучести для данного полигона в 2008 и 2009 гг. приведено на рис.2, г. Как и на полигоне № 3, за исключением поверхностного слоя, частота Вайсля–Брента не превышала $0.01\text{--}0.015\text{ c}^{-1}$.

Из приведенного описания видно, что на всех рассматриваемых полигонах температура воды вносит основной вклад в изменение плотности. Следовательно, характеристики приповерхностного пикноклина в основном определяются параметрами сезонного термоклина, а изопиклинические поверхности практически совпадают с изотермическими. Поэтому характеристики ВВ в работе оценивались по результатам наблюдений за изменчивостью положения термоклина.

Результаты измерений и обработки информации. На рис.3 приведена панорамная временная развертка положения изотерм с привязкой к колебаниям уровня по данным сканирования на полигоне № 1. Поверхностная приливная волна имеет почти симметричный вид. Величина прилива составляет 1.1 м. Изменение глубины залегания изотерм складывается из короткопериодных флуктуаций, наложенных на относительно медленные и слабые низкочастотные колебания изотерм. Наиболее ярко выражены полусуточные вариации на придонном горизонте, где прослеживаются изменения температуры за приливной период на 2°C. Наступление полной воды в придонной области характеризуется понижением температуры, а наступление малой воды – повышением, причем время падения температуры меньше, чем время роста. Размах колебаний изотерм составляет около 10–12 м. Вертикальная термическая структура вод под действием прилива сильно изменяется только в придонной области. Поверхностный квазиоднородный слой теплой воды толщиной 15 м и нижележащий слой термоклина, простирающийся до глубины 35 м, испытывают незначительные колебания, визуально не связанные с процессами у дна.

Характеристики короткопериодного внутреннего волнения в области термоклина по данным сканирования на суточной станции представлены в табл.1. В ходе каждого приливного цикла в районе полигона регистрировалось всего 1–2 волны с высотой больше 2 м. Средняя высота ВВ составляла 1.7 м, а длительность колебаний (в дальнейшем – период ВВ) 23 мин. Так как при анализе положения термоклина определялись характеристики каждой волны отдельно, то была оценена временная перемежаемость внутреннего волнения как отношение времени существования короткопериодных колебаний с высотой более 1 м к общему времени наблюдения (усреднено по нескольким полусуточным периодам). Оценка составила 14 %. Хорошо выраженных повторяющихся цуговых систем не наблюдалось.

Таблица 1

Повторяемость высоты и периода короткопериодных внутренних волн по данным сканирования на полигоне № 1

Интервал высот ВВ		Средняя высота в интервале, м	Повторяемость	
от	до		случаев	%
1.0	2.0	1.3	12	80.0
2.0	3.0	2.5	1	6.7
3.0	4.0	3.3	2	13.3
			15	100.0
Интервал периодов ВВ		Среднее значение периода в интервале, мин		
от	до			
6.0	18.3	12.4	7	46.7
18.3	30.6	22.7	4	26.7
30.6	42.9	0.0	0	0.0
42.9	55.1	45.0	2	13.3
55.1	67.4	58.0	1	6.7
67.4	79.7	68.0	1	6.7
			15	100

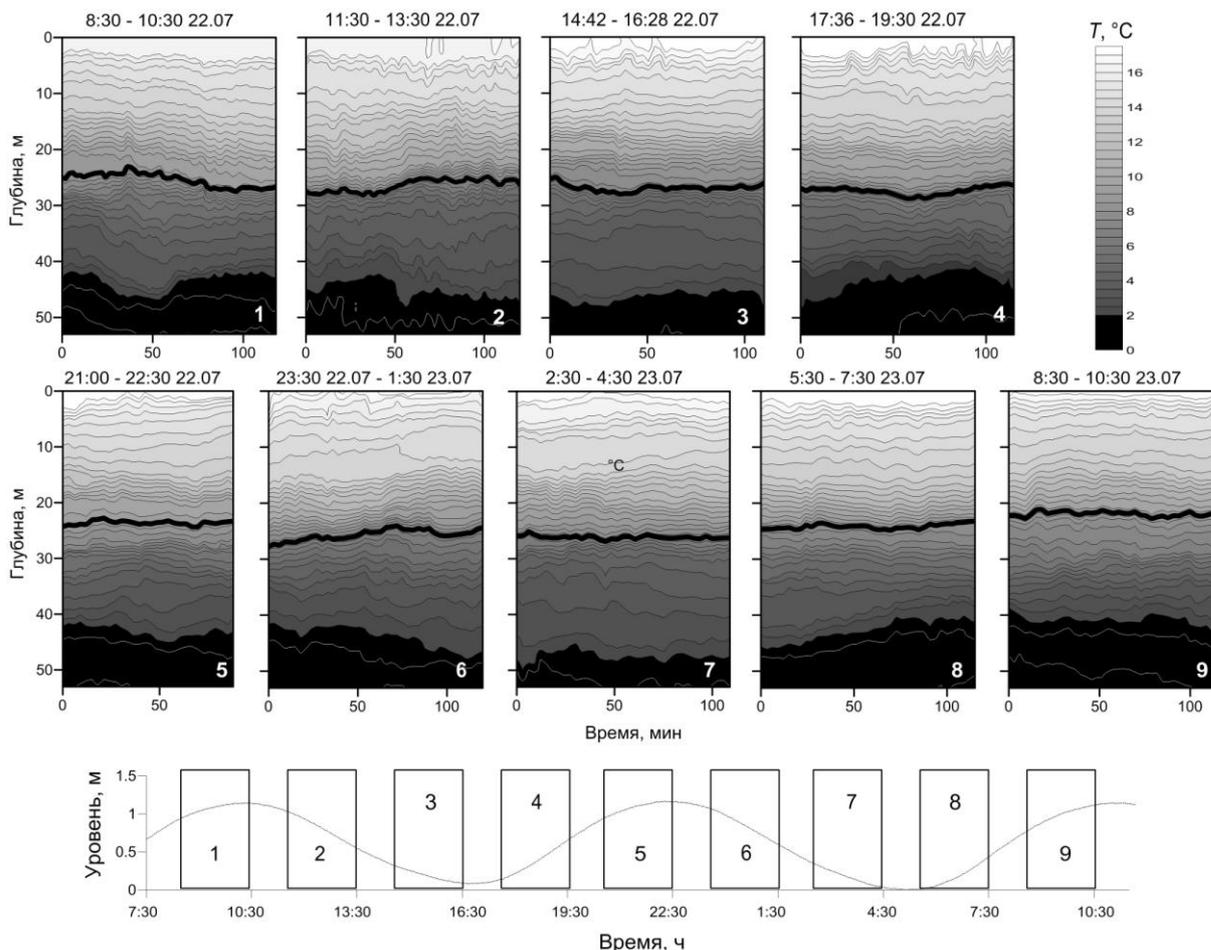


Рис.3. Временная изменчивость вертикального распределения температуры по данным измерений СТД-зондом и колебания уровня по показаниям датчика давления ADP на полигоне № 1 (Бассейн Белого моря) с 8.30 22.07 до 10.30 23.07.2011 г.

Жирная линия – положение термоклина, нижний ряд прямоугольников с номерами на графике хода – показывает периоды сканирования.

Результаты наблюдений на полигоне № 2 на границе Бассейна и пролива Западная Соловецкая Салма охватывали более 7 приливных цикла (за 3 года наблюдений) при общем времени сканирования 56 ч 35 мин. Баротропная приливная волна в данном районе имеет несимметричный вид. Рост уровня идет более интенсивно, чем падение. Общий размах колебаний 1.2–1.4 м. Во время отлива наблюдаются течения, направленные на север, прилива – на юго-восток. Максимальные скорости течений отмечаются в период прилива и отлива и оставляют более 60 см/с.

Для описания процессов, протекающих внутри приливного цикла, остановимся подробно на результатах, полученных в августе 2010 г. [6], которые представлены на рис.4. В отличие от глубоководного района здесь термоклин совершал интенсивные смещения по вертикали. На рис.4 результаты сканирования приведены не по порядку, а по совпадению наблюдений с фазой приливного цикла. Так, например, сканирования 1, 5, 9 выполнены в начале отлива, а 4 и 8 – в последнюю фазу прилива. При такой компоновке рисунка видно, что характер смещений был связан с фазой волны M_2 . Поднятие термоклина происходило обычно быстрее, чем его заглубление. При этом отмечалась перестройка вертикальной структуры вод. На полигоне прослеживались две основные системы волн. Во время прилива наблюдался внутренний приливной бор (4,4, 4,8), а во

время отлива – прохождение цугов интенсивных короткопериодных внутренних волн (4,1, 4,5, 4,9). Бор имел вид относительно длиннопериодной внутренней волны, характерной чертой которой является практически отвесный передний и пологий задний фронты. Высота передней «стенки» внутреннего бора, по данным сканирования, составляла 10–14 м (рис.4,4, 4,8). При этом вертикальная структура поля температуры вод под действием бора значительно изменялась. Сопоставление данных наблюдений на разных станциях показало, что бор двигался из глубоководной части Бассейна к проливу.

Примерно через 2.5 ч после прохождения передней стенки бора, когда скорость течения падает, а направление начинает перестройку на противоположное, по данным сканирования наблюдается прохождение цуга короткопериодных волн (рис.4,5). Четко выделяются три волны высотой 14–17 м и длительностью колебаний 10–20 мин, за которыми следует «хвост» из волн меньшей амплитуды. Головные волны упорядочены по амплитуде, первая из них максимальна. Эту группу волн можно отнести к интенсивным внутренним волнам (ИВВ). Они обладают признаками нелинейности, проявляющейся в асимметрии их формы и большом отношении амплитуд волн к глубине залегания пикноклина (> 0.1). Их образование повторяется в каждом приливном цикле (рис.4,1, 4,5, 4,9). В это же время на поверхности воды отмечались четкие сликовые полосы. (Некоторое отличие колебаний, приведенных на рис.4,1, от цуговой структуры может объясняться тем, что одна из внутренних волн в пакете претерпела обрушение). В отличие от бора, имеющего сглаженную вершину, эти волны имеют обостренные гребни. Вторым отличием является их движение в сторону открытого моря.

Фаза малой воды характеризуется незначительным увеличением толщины и ослаблением интенсивности термоклина (рис.4,2, 4,6). При этом в слое термоклина иногда проявляются волны с периодом 10–16 мин, амплитудой до 5 м, обладающие признаками нелинейности. Взаимный корреляционный анализ записей, полученных на буйковых станциях, показал, что они распространяются от банки, располагавшейся в центральной части полигона, в разных направлениях.

Некоторого пояснения требуют результаты наблюдений, выполненные с 0.00 до 2.00 ч 9.08.2010 (рис.4,3). В первую половину этого сканирования термоклин прижимается к поверхности, во вторую – интенсивные внутренние волны имеют высоту около 10 м. До этого во второй половине дня 8.08.2010 северный ветер усилился до 5–7 м/с. А во время сканирования по данным ADP были отмечены самые сильные течения, направленные на юг. Скорее всего, интенсификация течений была связана с прохождением над районом работ атмосферного фронта. В период времени, когда ветровые и приливные течения совпадали по направлению, наблюдался подъем термоклина, а перестройка поля приливных течений привела к образованию группы короткопериодных внутренних волн, «сидящих» на гребне более длинной волны. Вероятно, с этим же процессом наложения дрейфового течения на приливное связаны увеличение вертикальных градиентов скорости и развитие гидродинамической неустойчивости, которая (рис.4,1) привела к обрушению первой и второй волн в группе ИВВ.

Представления о статистических характеристиках высот и периодов внутренних волн можно получить из табл.2. В районе преобладает внутреннее волнение высотой от 2 до 5 м. Средняя высота ВВ составляла 4.3 м, а период – 14 мин. Перемежаемость достигла 50 %. Наиболее повторяющаяся высота волн составила 2.8 м, период – 10 мин. Каждые 12 ч наблюдений регистрировались 2–3 волны высотой больше 10 м. Внутренняя волна максимальной амплитуды 17.9 м была зарегистрирована в 2010 г. Стоит отметить, что высота волны достигла почти половины глубины места наблюдения. Каждый приливный цикл волны M_2 наблюдалось 4 или 6 волн, высота которых сопоставима с глубиной залегания пикноклина. Эти волны можно уверенно отнести к ИВВ. В период каждого отлива в районе наблюдались повторяющиеся цуговые системы из 3–4 волн. Интенсивность внут-

ренного волнения в данном районе существенно выше, чем на полигоне № 1. Так, за приливный цикл регистрировалось не менее семи внутренних волн, по амплитуде превышающих любую из отмеченных в районе термоклина в области Бассейна.

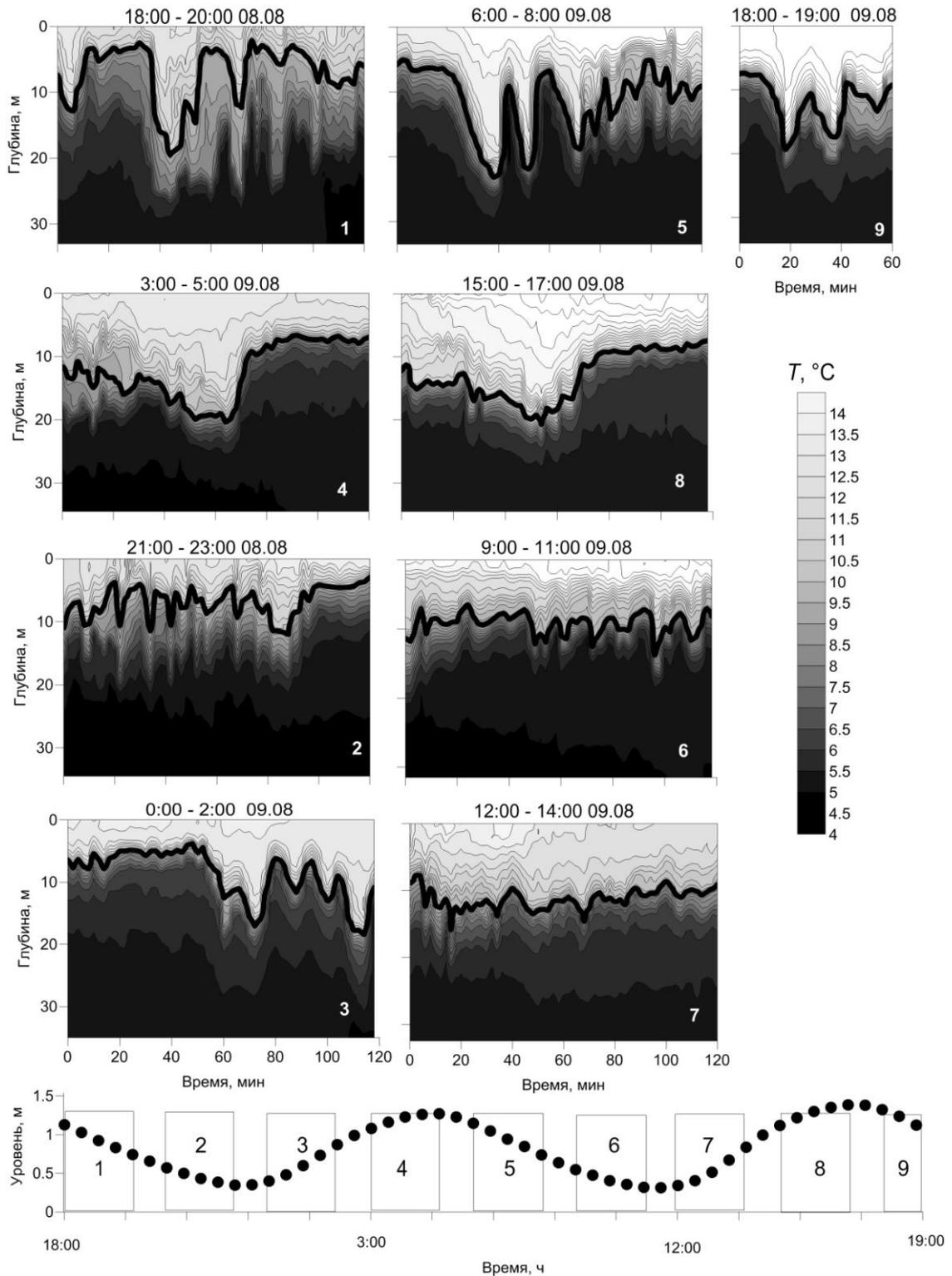


Рис.4. Временная изменчивость вертикального распределения температуры по данным измерений СТД-зондом с 18.00 8.08 до 19.00 9.08.2010 на полигоне № 2.

Объяснения те же, что на рис.3.

Таблица 2

Повторяемость высот и периодов короткопериодных ВВ по данным сканирования на полигоне № 2

Интервал высот ВВ		Средняя высота в интервале, м	Повторяемость	
от	до		случаев	%
1.0	2.0	1.5	39	16.7
2.0	3.0	2.5	54	23.1
3.0	4.0	3.5	48	20.5
4.0	5.0	4.5	32	13.7
5.0	6.0	5.4	19	8.1
6.0	7.0	6.5	11	4.7
7.0	8.0	7.6	11	4.7
8.0	9.0	8.4	4	1.7
9.0	10.0	9.4	2	0.9
10.0	11.0	10.3	2	0.9
11.0	12.0	11.7	3	1.3
12.0	13.0	12.4	2	0.9
13.0	14.0	13.7	5	2.1
14.0	15.0	14.2	1	0.4
15.0	16.0	0.0	0	0.0
16.0	17.0	0.0	0	0.0
17.0	18.0	17.9	1	0.4
			234	100.0
Интервал периодов ВВ		Среднее значение периода в интервале, мин		
от	до			
3.0	13.1	8.5	168	70.3
13.1	23.2	17.0	46	19.2
23.2	33.3	28.7	8	3.3
33.3	43.3	36.3	9	3.8
43.3	53.4	47.0	2	0.8
53.4	63.5	56.0	2	0.8
			234	100.0

Основной особенностью внутреннего волнения в данной мелководной зоне с двухслойной стратификацией можно считать его чрезвычайную интенсивность и наличие двух, возникающих 2 раза в сутки, систем волн: приливного бора, движущегося к проливу, и пакета интенсивных короткопериодных внутренних волн, движущихся в открытое море.

В узкой части пролива Западная Соловецкая Салма на полигоне № 3 приливная волна имеет несимметричный вид (рис.5). Рост уровня идет более интенсивно, чем его падение. Величина прилива составляет 0.8 м. В период отлива течения направлены на северо-запад, прилива – на юго-восток. Смена течения на противоположное занимает меньше 2 ч за полусуточный приливной цикл. Остальное время оно сохраняет то или иное доминирующее направление. Максимальные скорости течения, по данным АДР, составляли до 70 см/с.

По результатам сканирования (рис.5) видно, что колебания температуры с полусуточным периодом хорошо выражены. В период прилива наблюдается заток более холодных и соленых вод через порог пролива. Воды поступают в придонном десятиметровом слое (рис.5,3; 5,4; 5,9; 5,10), при этом максимальная разность температур «поверхность–дно» достигает 2.0°C (рис.5,10). В результате возникает двухслойная структура вод, наблюдаются короткопериодные ВВ. Периоды этих волн меньше, чем на полигонах № 1 и 2. Они преимущественно составляют 5–10 мин и часто имеют выраженную цуговую структуру. Эти колебания «сидят» на гребне приливного затора вод. Самые интенсивные из них наблюдаются в конце фазы прилива. В период отлива структура вод становится однород-

ной от поверхности до дна. Изменчивость температуры в течение полутора часов не превышает 0.1°C . Картина возникновения и исчезновения стратификации вод повторяется каждый приливный цикл волны M_2 . На фоне возникновения двухслойной структуры вод регистрируются 3–4 короткопериодные волны с высотой больше 2 м (рис.5,4).

Средняя высота внутренних волн в проливе составляет 1.7 м, период 6 мин, пережимаемость 10 %. Наиболее повторяющаяся высота волн составила 1.1 м, период 5 мин. Внутренние волны отмечаются только во время прилива и распространяются пакетами по 3–5 волн. Из табл.3 видно, что на полигоне наблюдаются преимущественно короткопериодные колебания с амплитудами до 1 м и периодами до 10 мин.

В глубокой части Онежского залива на полигоне № 4 прилив имеет несимметричный вид (рис.6). Рост уровня идет более интенсивно, чем его падение. Величина прилива составляет 0.8 м. В период отлива течения направлены на северо-запад, в период прилива – на юго-восток. Максимальная скорость течения составляет 56 см/с.

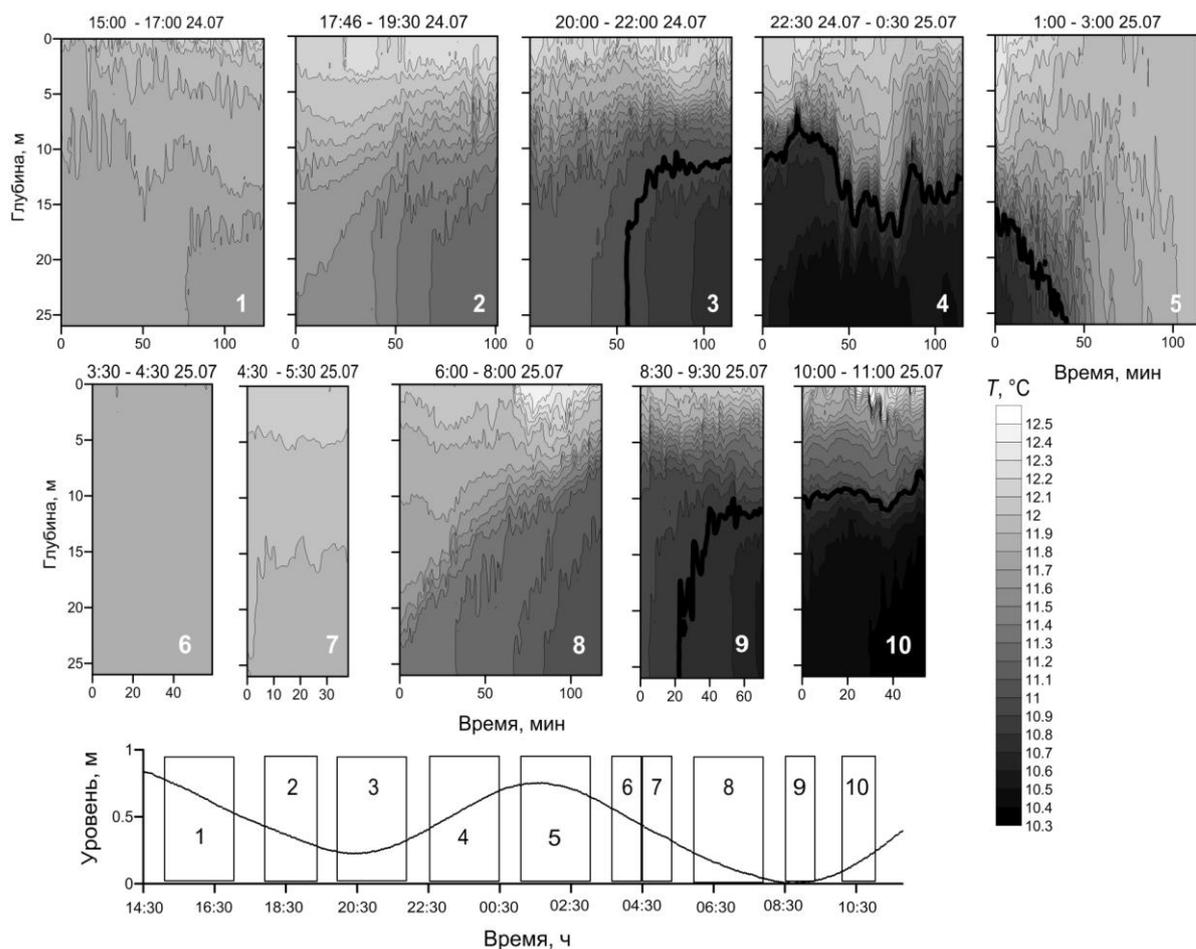


Рис.5. Временная изменчивость вертикального распределения температуры по данным сканирования СТД-зондом (узкая часть пролива Западная Соловецкая Салма) с 15.00 24.07 до 11.30 25.07.2011 на полигоне № 3.

Объяснения те же, что на рис 3.

Таблица 3

Повторяемость высот и периодов короткопериодных внутренних волн по данным сканирования на полигоне № 3

Интервал высот ВВ		Средняя высота в интервале, м	Повторяемость	
от	до		случаев	%
1.0	2.0	1.3	18	64.2
2.0	3.0	2.2	8	28.7
3.0	4.0	3.4	2	7.1
			28	100.0
Интервал периодов ВВ		Среднее значение периода в интервале, мин		
от	до			
4	6	5.4	9	32.1
6	8	7.5	11	39.3
8	10	9.3	4	14.3
10	12	12	1	3.6
12	14	0	0	0.0
14	16	15.7	3	10.7
			28	100.0

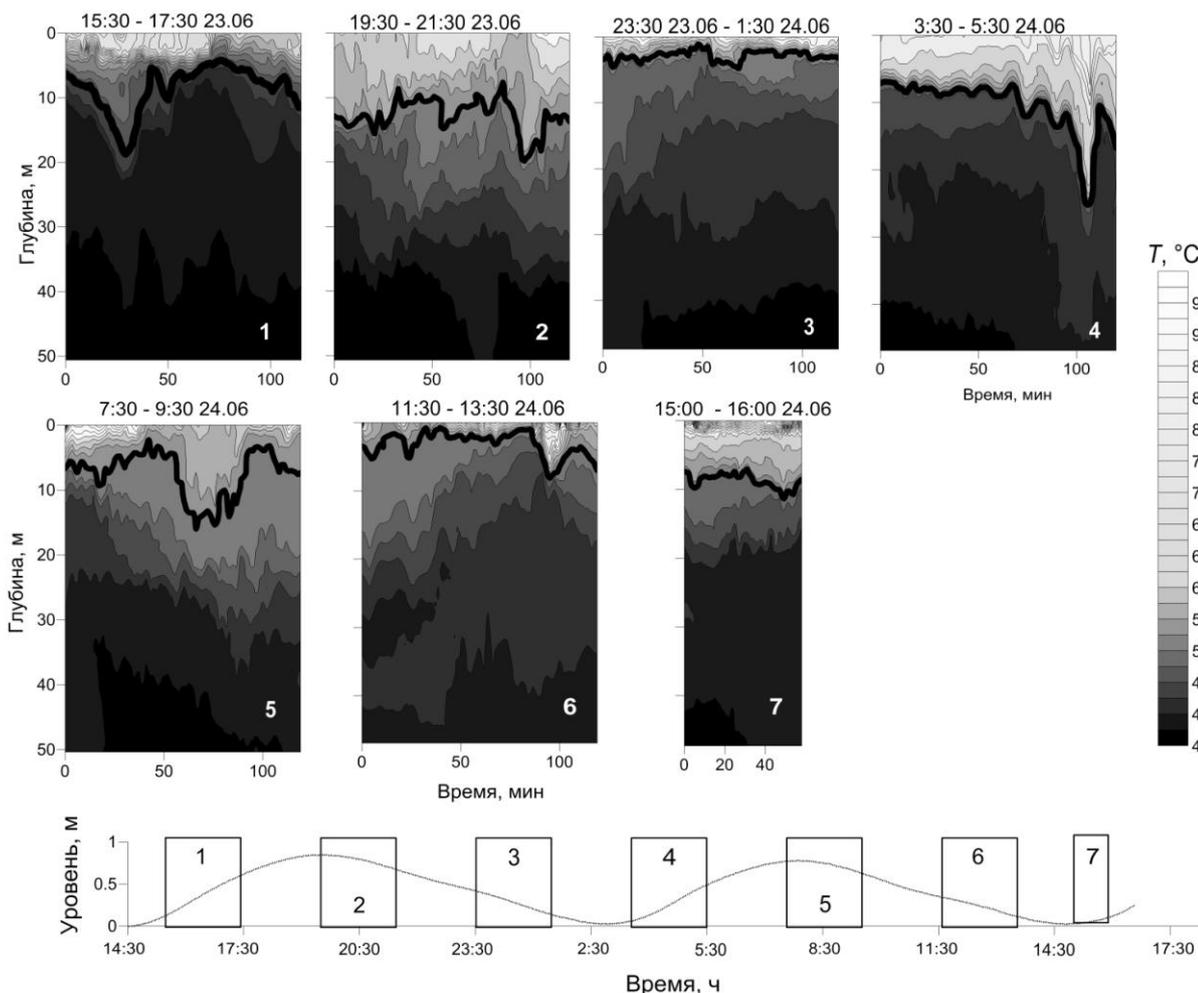


Рис.6. Временная изменчивость вертикального распределения температуры по данным сканирования СТД-зондом на полигоне № 4 (Онежский залив) с 15.30 23.06 до 16.00 24.06.2009 и колебания уровня по данным ADP.

Объяснения те же, что на рис.3.

Таблица 4

Повторяемость высот и периодов короткопериодных ВВ по данным сканирования на полигоне № 4

Интервал высот ВВ		Средняя высота в интервале, м	Повторяемость	
от	до		случаев	%
1.0	2.0	1.6	20	27.0
2.0	3.0	2.5	21	28.4
3.0	4.0	3.4	11	14.9
4.0	5.0	4.4	6	8.1
5.0	6.0	5.5	6	8.1
6.0	7.0	6.2	2	2.7
7.0	8.0	7.8	2	2.7
8.0	9.0	8.2	3	4.1
9.0	10.0	9.3	1	1.4
10.0	11.0	0.0	0	0.0
11.0	12.0	0.0	0	0.0
12.0	13.0	0.0	0	0.0
13.0	14.0	0.0	0	0.0
14.0	15.0	14.7	2	2.7
			74	100.0
Интервал периодов ВВ		Среднее значение периода в интервале, мин		
от	до			
4.0	10.9	7.3	35	46.7
10.9	17.8	13.6	24	32.0
17.8	24.7	20.8	11	14.7
24.7	31.6	26.5	2	2.7
31.6	38.4	34.0	1	1.3
38.4	45.3	39.0	1	1.3
			74	100.0

Измерения выполнялись в течение четырех приливных циклов волны M_2 . Общее время сканирования 18 ч 49 мин. Рассмотрим в качестве примера результаты сканирования, полученные в 2009 г. (рис.6). Нижняя граница термоклина и пикноклина располагалась на глубине 8 м. Градиент температуры в термоклине составлял $0.4^\circ\text{C}/\text{м}$. Глубже располагался слой, где температура медленно понижалась с глубиной, а плотность так же монотонно возрастала. Фаза прилива хорошо идентифицируется по подъему холодных вод в придонном слое. Заток холодных вод приводит к интенсификации термоклина и приближению его к поверхности. Во время отлива интенсивность термоклина уменьшается и он заглубляется. Положение его под воздействием прилива не всегда смещается плавно. В фазу прилива наблюдались одиночные короткопериодные ВВ высотой 7–9 м (рис.6.1), а иногда цуги волн с доминирующей последней волной (рис.6.4) высотой более 10 м. При прохождении первых двух волн в цуге термоклин сохранял свой гладкий профиль. Во время прохождения последней волны на вертикальном профиле температуры под термоклином отмечались инверсии, что позволяет предполагать, что начало потери устойчивости волны. Инверсии появляются на глубине 20–40 м как в фазу прилива (рис.6.4), так и отлива (рис.6.6), – указание на то, что в Онежском заливе идет интенсивное перемешивание вод.

Максимальная из зарегистрированных на полигоне № 4 волн имела высоту 14.7 м. Средняя высота ВВ составила 3.7 м, период 13 мин, перемежаемость 22 %. Наиболее повторяющаяся высота волн была 2.8 м, период 8 мин. Представления о повторяемости характеристик высот и периодов ВВ можно получить из табл.4, из которой видно, что более $\frac{2}{3}$ волн имеют высоту от 1 до 4 м и период от 5 до 25 мин. Однако один раз за приливный цикл волны M_2 отмечается хотя бы одна волна высотой более 8 м. Данный район является

вторым по интенсивности проявления короткопериодных ВВ после полигона № 2. На фоне относительно медленных вертикальных движений термоклина, временные масштабы которых измеряются в часах, здесь отмечаются цуги и отдельные внутренние волны – их появление связано с фазой приливного цикла. Как и на полигоне, на границе Бассейна и пролива Западная Соловецкая Салма эти волны могут иметь характер ИВВ, что не свойственно районам Бассейна и узкой части пролива Западная Соловецкая Салма.

Обобщая результаты исследований, можно сделать следующие выводы.

1. На всех исследуемых полигонах поле ВВ состоит из двух основных компонент: приливных волн полусуточного периода и короткопериодных волн.
2. В глубоководной части шельфа Бассейна Белого моря наиболее интенсивное внутреннее волнение имеет полусуточный период и отмечается в слое придонных вод.
3. В мелководной части шельфа Бассейна во время прилива наблюдается внутренняя приливная волна в виде бора, движущегося к берегу, а во время отлива – группы интенсивных короткопериодных ВВ, движущихся в противоположном направлении; интенсивные ВВ наблюдаются в каждый приливной цикл; их высота значительно превышает толщину верхнего однородного слоя и достигает 14–17 м; длительность колебаний лежит в диапазоне 10–20 мин.
4. В узкой части Западной Соловецкой Салмы в период отлива наблюдается полная однородность вод, а в прилив – заток холодных вод в придонном слое, на гребне которого наблюдаются короткопериодные ВВ с высотой до 2–3 м и длительностью колебаний 5–10 мин.
5. В Онежском заливе на фоне хорошо выраженных полусуточных вариаций термоклина эпизодически наблюдаются ИВВ, средняя высота волн – 3.7 м, длительность колебаний 13 мин, в каждый приливной цикл наблюдалась хотя бы одна волна высотой более 8 м.

Выполненное обобщение результатов экспериментальных исследований может послужить основой для районирования акватории Белого моря по частоте и особенностям проявлений короткопериодных ВВ. Районирование следует выполнять на основе комплексного подхода, включающего результаты гидродинамического моделирования, натурных экспериментов и спутникового зондирования.

Часть работы выполнена в рамках гранта Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых, а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0639.

Литература

1. Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. 154 с.
2. Каган Б.А., Тимофеев А.А. Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т.41, № 4. С.844–850.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.2: Белое море. Вып.1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
4. Май Р.И. Нелинейные баротропные и бароклинные приливные явления в морях Европейской Арктики: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.28. СПб., 2006. 20 с.
5. Май Р.И., Фукс В.Р. Остаточные приливные явления в Белом море // Матер. IX Междун. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря». Петрозаводск, 2005. С.202–207.
6. Зимин А.В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология. 2012. Т.52, № 1. С.16–25.

7. *Серебряный А.Н., Пака В.Т., Корж А.О.* Исследование с помощью ADCP течений и внутренних волн в Белом море // Геология морей и океанов: Матер XVIII Междун. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: ГЕОС, 2009. С.245–250.
8. *Родионов А.А., Семенов Е.В., Зимин А.В.* Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т.5, № 2.
9. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Волны внутри океана. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
10. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // *Акуст. журн.* 2007. Т.53, № 3. С.410–436. СПб.: Наука. С.89–108.
11. *Munk W., Wunsch C.* Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // *Deep-Sea Res.* 1998. V.45, N 12. P.1977–2010.
12. *Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю.* Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
13. *Зимин А.В.* Экспериментальные исследования изменчивости гидрофизических полей на шельфе Белого моря в районах с различной вертикальной структурой вод // *Система Белого моря. Том II: Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера*. М.: Научный мир, 2012. С.392–410.
14. *Валерианова М.В., Жуков Л.А.* Практические работы по курсу «Общая океанология». Л.: Ленинградский гидрометеорологический институт, 1974. 93 с.

Статья поступила в редакцию 02.11.2012 г.

