

УДК 551.466.88

© А.В.Зимин^{1,2}, Т.А.Пикуль², 2012

¹Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
zimmin2@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН

По данным натурных наблюдений, выполненных в шельфовом районе Белого моря, установлено наличие внутреннего приливного бора и пакетов интенсивных внутренних волн с периодом 10–20 мин. Для описания внутренних волн наряду со стандартными методами был применен вейвлет-анализ. Произведен обоснованный выбор базисного вейвлета и его способа построения. Показаны возможности вейвлет-преобразования при описании нелинейных волн.

Ключевые слова: внутренние волны, контактные измерения, вейвлет-анализ, шельф Белого моря.

В мезомасштабной и короткопериодной изменчивости процессов в шельфовых районах Арктических морей значительную роль играют короткопериодные внутренние волны (ВВ) [1]. ВВ оказывают влияние на интенсификацию перемешивания [2], особенности переноса массы, импульса, энергии [3] и т.д. Однако до настоящего времени их исследованию уделялось недостаточно внимания не только в связи со сложностью получения натурных данных, но также из-за сложности интерпретации получаемой информации. Часто в натурных экспериментах на шельфе фиксируются колебания пикноклина или термоклина, далекие от синусоидальных в виде «квазипрямоугольных плато» [4], «зубцов» с разной крутизной подъема [5], неранжированных цугов [6]. Подобные наблюдения обуславливают актуальность дальнейших исследований внутренних волн в шельфовых районах морей, а также требуют применения нестандартных методов обработки результатов наблюдения.

Шельфовый склон создает неоднородность для распространения баротропной приливной волны. Это приводит к образованию внутренних волн с периодами от приливного до минимального, соответствующего максимальным градиентам плотности. По мере движения волн приливного периода по шельфу они сильно деформируются и могут приобретать вид бора. Характерный признак бора – практически отвесный передний фронт. Часто деформация внутреннего прилива заканчивается распадом длинной волны на группу короткопериодных волн [5, 7], по своим характеристикам близким к солитонам.

При обработке данных наблюдений низкоамплитудных внутренних волн чаще всего применяется метод спектрального анализа [8]. Однако его применимость для описания нелинейных ВВ типа «солитонов» и «боров», обладающих значительной перемежаемостью во времени, представляется сомнительной. Например, аппарат Фурье-преобразований не дает информации о преимущественном распределении частот во времени, может дать неверные результаты для нестационарных сигналов с участками резкого изменения. Экспериментальные исследования показывают, что в прибрежной зоне океана цуги короткопериодных внутренних волн могут состоять из небольшого числа интенсивных колебаний разных периодов [9–11]. Это накладывает ограничения на возможность применения стандартной методики спектрального анализа.

Обойти эти ограничения можно, используя метод вейвлет-преобразования, который оказывается эффективным при анализе сигналов с изменяющимися частотно-временными характеристиками [12]. Математический аппарат вейвлет-преобразования находится в стадии активной разработки [13], хотя специальные пакеты вейвлет анализа уже представлены в основных системах компьютерной математики (Matlab, Mathcad и др.) [14]. Форма вейвлета (четность или нечетность), доминирующая частота и степень ее локализации существенно влияют на вейвлет-спектры анализируемых сигналов и на возможности выделения его локальных особенностей. Известно большое количество классов вейвлет-функций, однако нет общепринятых правил и рекомендаций для выбора типа вейвлета и его характеристик для обработки данных о короткопериодных внутренних волнах.

Современные знания о пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей Белого моря нашли обобщения в монографиях [15, 16]. В частности, показано, что мезомасштабная изменчивость гидрологических характеристик в Белом море обусловлена синоптическими процессами и приливными движениями. Установлено, что прилив M_2 доминирует среди других приливных гармоник. Приливный поток трансформируется под влиянием изменений рельефа дна и конфигурации береговой линии, что приводит к образованию на шельфе внутренних приливных и короткопериодных волн и к периодическим смещениям фронтальных зон в районах проливов с полусуточным периодом. При продвижении внутренней приливной волны по шельфу в районах с хорошо выраженной стратификацией происходит ее нелинейно-дисперсионный распад, приводящий к образованию короткопериодных волн и эпизодической интенсификации перемешивания [17]. В проливах и заливах, где воды однородны по вертикали, колебания температуры и солености обуславливаются лишь горизонтальными смещениями масс воды в течение приливного цикла.

В работе предлагается применить аппарат вейвлет-преобразований для выделения короткопериодных ВВ в шельфовом районе Белого моря и оценки их характеристик.

Материалы для работы были получены с 8 по 11 августа 2010 г. в мористой части прол. Западная Соловецкая салма в точке с координатами $65^{\circ}11.8'$ с.ш. $35^{\circ}01.3'$ в.д., глубина места около 34 м (рис.1). В данном районе были выполнены суточная и полусуточная океанографические станции, где методом сканирования с помощью STD-зонда T-90 (Sea & Sun Technology GmbH) с заякоренного судна определялись профили температуры, солености и плотности от поверхности до дна с разрешением 0.5 м. Один «спуск» и «подъем» зонда занимали от 1 до 2 мин. Сканирования велись в режиме 2 ч с часовым перерывом. Всего было выполнено 15 серий сканирований. Около точки сканирования на дно на немагнитной платформе устанавливался акустический профилограф течения ADP Sontek 500 кН. Кроме измерений течений он регистрировал колебания придонного давления, на основании которых определялись характеристики колебаний уровня. Подробно результаты эксперимента описаны в [17]. В работе рассматриваются только некоторые из них, для обработки которых целесообразно применять вейвлет-анализ.

По данным STD-зонда, в районе наблюдалась четко выраженная двухслойная структура вод. Согласно имеющимся представлениям [15], их можно интерпретировать как летние поверхностную и промежуточную водные массы Бассейна. Пикноклин прослеживался в слое от 5 до 16 м с интенсивностью до 0.2 у.е./м, а частота Вьяйсяля-Брента в этом слое составляла 0.036 1/с. Ниже этого слоя стратификация была устойчивая, но слабовыраженная, а среднее значение частоты Вьяйсяля-Брента составляло 0.009 1/с (32 цикл./ч). Плотностная структура практически полностью повторяла ход температуры.

Представление об изменчивости характеристик течения и колебаний уровня в ходе приливного цикла можно получить из рис.2. По данным колебания уровня видно, что баротропная приливная волна имеет несимметричный вид. Рост уровня идет более интенсивно, чем его падение. Общий размах колебаний составляет 1.3 м. Максимальные

скорости течения до 48 см/с отмечаются в периоды прилива и отлива. В отлив течения направлены на север, а в прилив на юго-юго-восток.

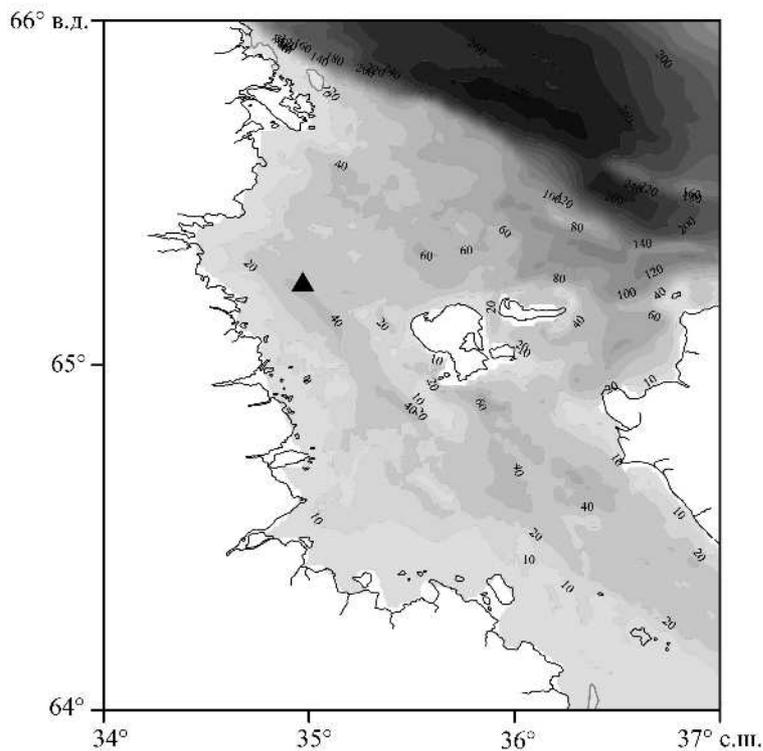


Рис.1. Расположение района работ, выполняемых НИС «Эколог». Темный треугольник – многочасовая океанографическая станция.

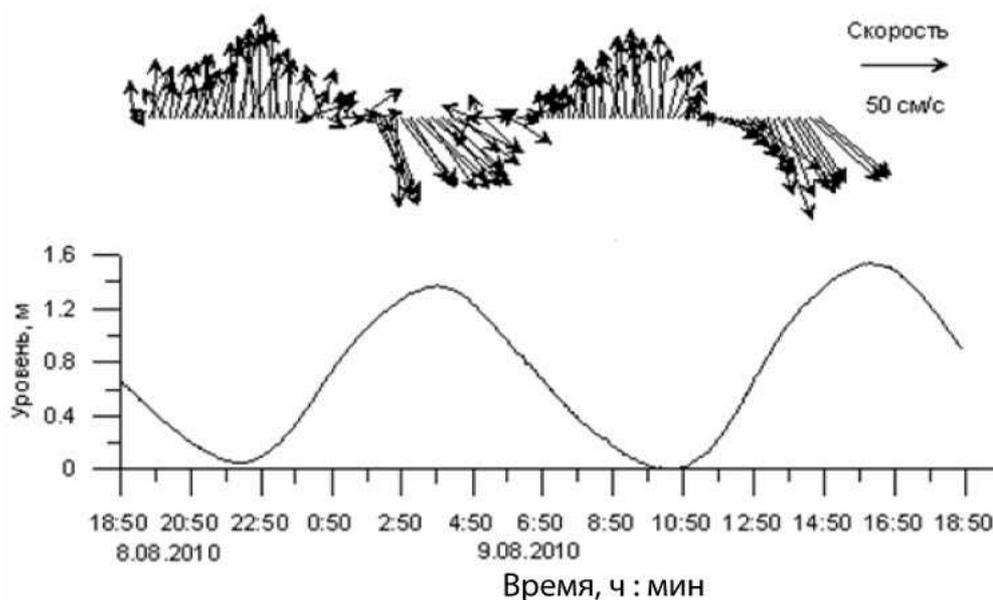


Рис.2. Временная изменчивость скорости и направления течения на глубине 14 м и колебания уровня по показаниям датчика давления с 18.50 8 августа до 19.20 9 августа 2010 г.

По данным сканирования видно (рис.3), что температура испытывает полусуточные вариации, которые имеют несинусоидальную форму.

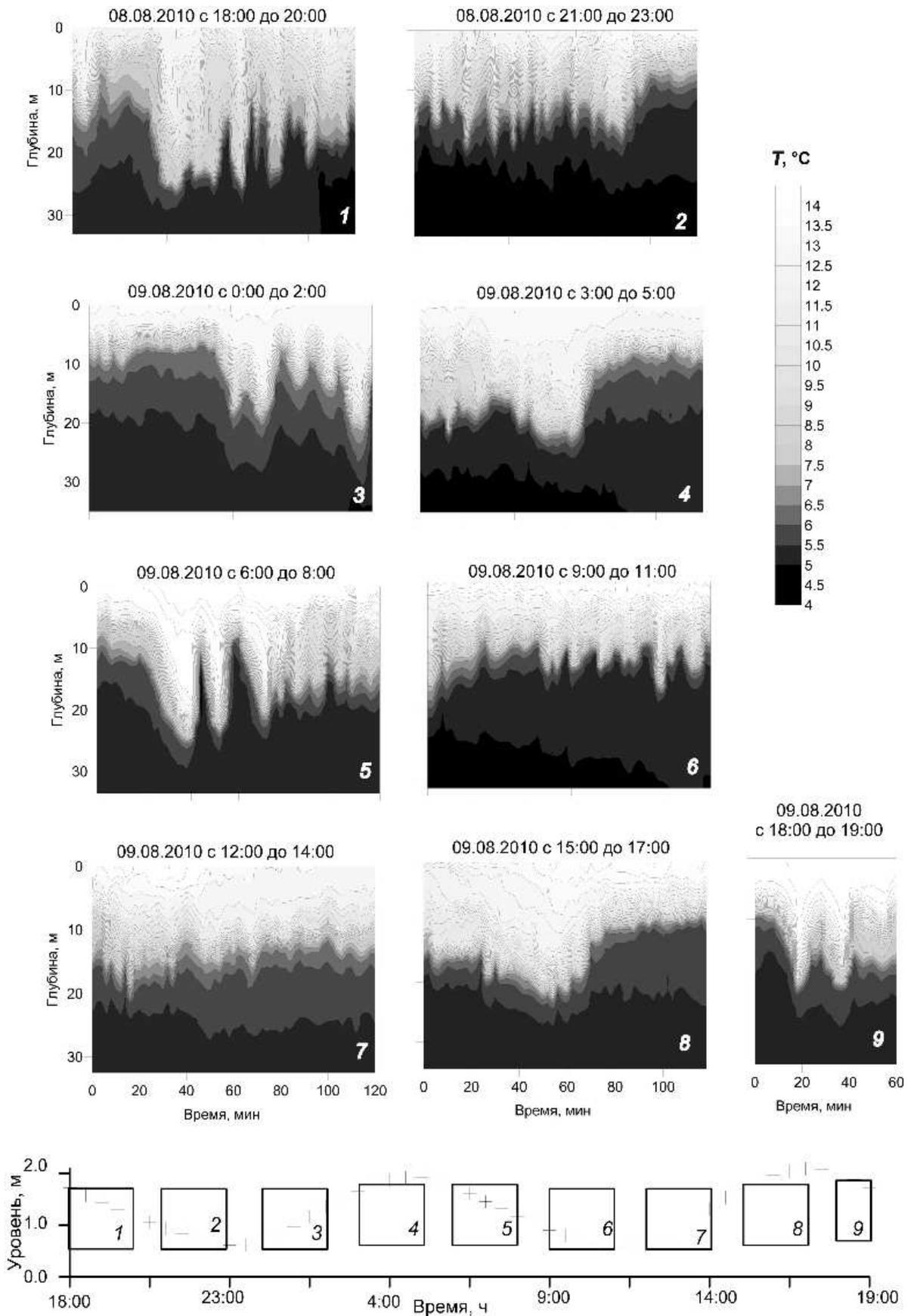


Рис.3. Временная изменчивость температуры по данным сканирования на суточной станции с 18.00 8.08.2010 до 19.00 9.08 и колебания уровня по показаниям датчика давления (внизу). Прямоугольники с номерами хода уровня – периоды сканирования.

Полная вода в придонной области характеризуется затоком холодных вод, а в области термоклина резким подъемом последнего к поверхности (рис.3,4, 3,8), причем перестройка его положения происходила резко, менее чем за 10–20 мин. Перед этим регистрировались изменение направления течения и быстрый рост скорости до максимальных значений (рис.2). Описанный характер колебаний термоклина и течения позволяет утверждать, что в эти моменты времени в районе наблюдается явление внутреннего приливного бора. Высота передней «стенки» внутреннего бора, по данным сканирования, составляет 10–14 м (рис.3,4; 3,8). Это явление, по данным наблюдений, повторяется каждый прилив. Распределение поля температуры под действием бора испытывает сильное изменение. До его прохождения можно проследить три слоя (рис.3,4): поверхностный квазиоднородный слой теплой воды толщиной 10–12 м, под ним – слой термоклина толщиной 8–10 м, содержащий тонкоструктурные прослойки, а ниже – однородный слой холодных вод. Прохождение бора приводит к тому, что толщина верхнего квазиоднородного слоя и термоклина сокращается до 5 и 4 м соответственно. При этом термоклин становится очень интенсивным, перепад температур в нем достигает $2^{\circ}\text{C}/\text{м}$ и тонкоструктурных элементов в нем не наблюдается. Нижний слой холодных вод занимает всю толщу вод с глубины 8–9 м.

Примерно через 2.5 ч после прохождения передней стенки бора скорость течения падает, направление течения начинает меняться на противоположенное, по данным сканирования, наблюдается прохождение цуга нелинейных волн (рис.3,5). Четко выделяются три волны высотой 14–17 м, с периодом 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 ВВ. Они обладают признаками нелинейности, проявляющимися в вертикальной и горизонтальной асимметрии их формы, большим отношением амплитуд волн к глубине залегания пикноклина (>0.1). Их прохождение повторяется в каждом приливном цикле (рис.3,1, 3,5, 3,9). В это же время на поверхности воды отмечались четкие сликовые полосы. Некоторое отличие колебаний, приведенных на рис.3,1 от цуговой структуры, объясняется тем, что одна из внутренних волн в пакете, возможно, претерпела обрушение. Так, около 18.45 8.08.2010 наблюдается прохождение инверсии температуры через точку наблюдения. Оценки числа Ричардсона ($Ri \leq 0.1$) показали возможное проявление механизма гидродинамической неустойчивости.

В отличие от бора, имеющего сглаженную вершину, эти короткопериодные волны имеют обостренные гребни и цуговую структуру с изменением периода от головы к хвосту цуга (рис.3,5). После прохождения пакета интенсивных ВВ термоклин опять начинает терять интенсивность и расслаивается. Фаза малой воды характеризуется увеличением толщины верхнего квазиоднородного слоя и термоклина (рис.3,2; 3,6). При этом в слое термоклина иногда проявляются волны периодом 10–16 мин амплитудой 2–5 м, обладающие нелинейными признаками.

Анализ экспериментальных данных показывает (рис.3), что основной особенностью внутреннего волнения в данном районе Белого моря можно считать наличие двух нелинейных систем волн: приливного бора и пакета интенсивных короткопериодных внутренних волн. Для их исследования требуется применение методики, отличной от спектрального анализа.

Для определения характеристик ВВ со всех 15 временных разрезов, полученных по данным сканирования, снимались глубины залегания изотерм, соответствовавших середине слоя термоклина, с шагом по времени равным одной минуте.

Для обработки полученных временных реализаций сигналов был использован пакет AutoSignal, который имеет специальные средства для построения спектрограмм сигналов, синтезированных вейвлетами. Преимуществом данной программы является воз-

возможность с помощью опции Wavelet Smoothing and Denoising произвести выбор базисного вейвлета и его корректирующих параметров, основываясь на его локализации в частотной и временной областях и качестве восстановления исходного ряда.

Базис выбирался на основе оценки среднеквадратичной ошибки точности восстановления исходных данных по используемому вейвлет-спектру. Были рассмотрены вейвлеты: Морле (с номером волны от 6 до 27), Пауля (от 4 до 40), производная функции Гаусса (порядка от 2 до 80). Разложение считалось оптимальным при минимальной ошибке значений восстановленного ряда и сохранении при этом временной и частотной локализации вейвлет-функции.

Для исследования качества разложения ряда использовались данные о прохождении цуга интенсивных ВВ (рис.3,5). Точность восстановленного ряда увеличивается с увеличением нулевых моментов вейвлета, т.е. с увеличением корректируемого параметра (номер волны или производная). Это позволяет извлечь информацию об особенностях более высокого порядка, содержащихся в сигнале. Однако с увеличением корректируемого параметра ухудшается временная локализация вейвлета, что негативно сказывается на получаемых результатах. Вейвлет Морле имеет четкую локализацию в частотной области, но плохую во временной. Противоположностью ему является вейвлет Пауля – он имеет хорошую локализацию во временной области, но плохую в частотной. Вейвлет на основе производной функции Гаусса находится между этими двумя вейвлетами и в частотной, и во временной области. Наилучшие результаты были получены для производной восьмого порядка функции Гаусса, при котором минимальное значение корректируемого параметра давало точное восстановление ряда. Далее при обработке исходных данных использовалась эта функция.

Пример полученных результатов представлен на рис.4 (исходные данные представлены на рис.3,5): на оси ординат – масштаб колебаний термоклина (частота слева и период справа), на оси абсцисс – время наблюдения, значения вейвлет коэффициентов затонированы: чем больше значение, тем интенсивнее тон. На полученных изображениях колебания выглядят, как цепочка холмов. Изменения положения «вершин» этих холмов описывают особенности сигнала. Если одинаковые «вершины» располагаются на одной линии вдоль оси времени и расстояние между вершинами равно, то колебания представляют постоянно повторяющийся процесс. На рис.4 это – колебание с периодом около 45 мин, прослеживающееся практически на всей длине ряда (адвективный перенос масс воды может приводить к погрешности в пределиении частот/перепадов короткопериодных волн). Если частота колебаний меняется, то «вершины» смещаются в направлении изменяющегося масштаба. На рис.4 с 36 по 78 мин измерений наблюдается колебание с увеличением периода от 10 до 25 мин, а также с 74 по 90 мин затухающие колебания – с периодом 7–9 мин. Резкие изменения исследуемого процесса проявляются на изображении как граница области резкого перепада яркости, выходящая из точки соответствующей времени скачка. В частности, резкое заглубление термоклина на 30–40-й минутах отображается на рис.4 протяженной «вершиной», охватывающей периоды 6–45 мин. Подобные локализованные максимумы функции вейвлет-преобразования и их временная последовательность могут учитываться при анализе перераспределения энергии. Если область высоких значений вейвлет-коэффициентов смещается из области больших периодов в область меньших, возможно, идет поток энергии от крупномасштабных внутренних волн к мелкомасштабным. На этом временном участке можно ожидать генерации турбулентности, обусловленной динамической неустойчивостью крупномасштабных движений. То есть первая из зарегистрированных волн цуга, изображенных на рис.3,5, может находиться в стадии, близкой к обрушению. Расчеты числа Ричардсона показали, что сразу за фронтом волны наблюдается зона неустойчивости, связанная с увеличением локальных градиентов скорости. Стабильность максимумов

функции вейвлет преобразования в моменты прохождения других волн пакета показывает, что они не испытывают трансформации.

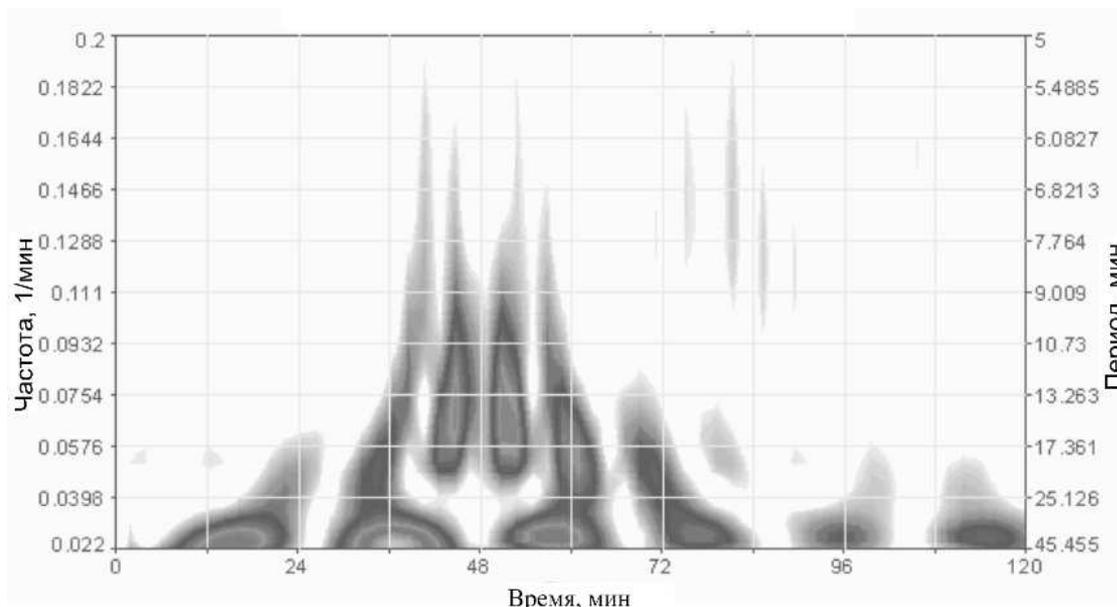


Рис.4. Результаты обработки вейвлет-преобразованием данных о положении термоклина с 6:00 до 8:00 9.08.2010 (в период наблюдения цуга интенсивных ВВ).

Если в области максимумов вейвлет-преобразования наблюдается смещение от меньших масштабов к большим, то, возможно, происходит энергоснабжение крупномасштабных движений от мелкомасштабных. Отметим, что после прохождения интенсивных ВВ с 72-й по 90-ю мин (рис.4) наблюдается пакет из менее интенсивных волн с периодом 7–9 мин, вероятно, предающих энергию движениям больших масштабов.

Характерное отображение в картине вейвлет преобразования находит и момент прохождения передней стенки бора, представленное на рис.5 (исходные данные о положении термоклина приведены на рис.3,4). Он отражается в виде двух линий локальных экстремумов около 71 мин измерений (рис.5). Таким образом, коэффициенты вейвлет-преобразования резко возрастают при прохождении бора и убывают с ростом масштаба колебания. При визуальном анализе можно выделить два интервала. На интервале 0–70 мин выделяется линейный тренд, на который в начале периода наблюдений накладываются слабые колебания с периодами порядка 7–9 мин. На интервале 73–120 мин высокочастотные колебания не прослеживаются и их энергетика падает. Таким образом, масштабно-временная развертка, получающаяся в результате вейвлет-преобразования сигнала, позволяет выявить не только колебания с непостоянным периодом, но и изолированные особенности сигнала типа ступеньки. Соответственно любая изменчивость положения термоклина (пикноклина) имеет свое характерное отображение на схеме коэффициентов вейвлет-преобразования, а его величина отражается яркостью.

Обобщая результаты экспериментальных работ и вейвлет-анализа, можно резюмировать, что главной особенностью внутреннего волнения на шельфе Белого моря можно считать наличие двух основных систем волн, возникающих в каждом приливном цикле. В каждый прилив наблюдается внутренний приливный бор с периодом более двух часов, а в каждый отлив наблюдается пакет из 3–5 интенсивных внутренних волн с периодом 10–20 мин, которые образуют цуг длительностью около 40 мин.

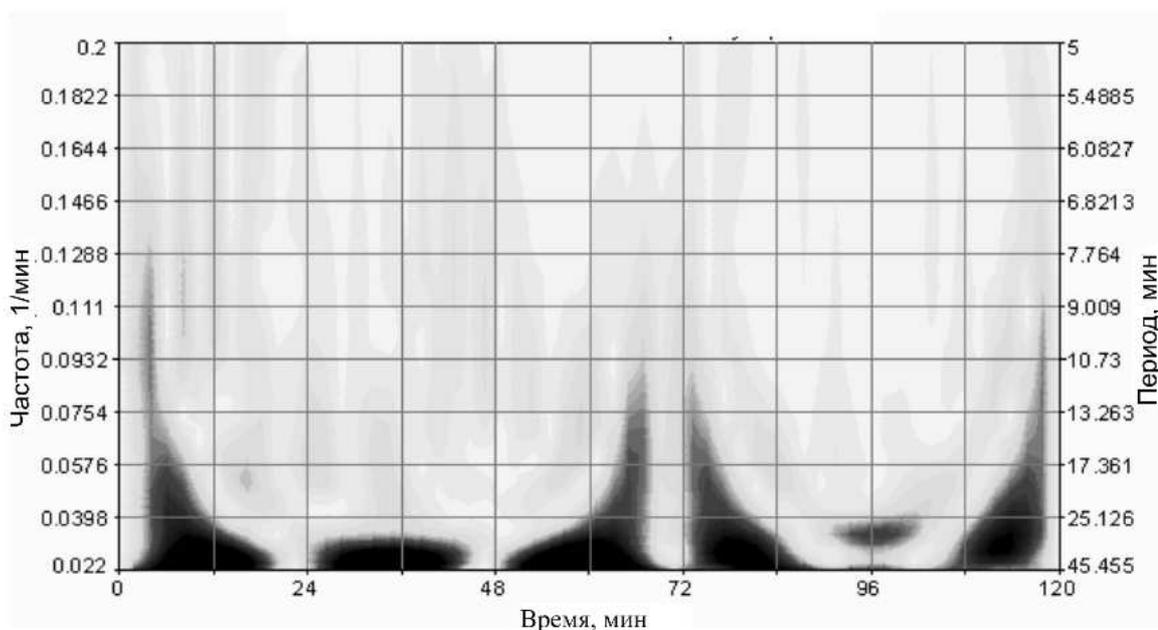


Рис.5. Результаты обработки вейвлет-преобразованием данных о положении термоклина с 3:00 до 5:00 9.08.2010 (в период наблюдения приливного бора).

Проведенное исследование показало, что вейвлет-анализ на основе использования производной восьмого порядка функции Гаусса позволяет просто и наглядно оценивать не только параметры короткопериодных ВВ, но и возможный характер трансформации энергии по масштабам. Подобные колебания характерны для шельфовых районов приливных арктических морей, а их анализ часто затруднен из-за значительного временного усреднения на фоне полусуточного прилива. Использование вейвлет-преобразования открывает широкие возможности для исследования характеристик короткопериодных ВВ, возникающих на фоне резких смещений пикноклина.

Работа выполнена при частичном финансировании грантом Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (договор № 11.G34.31.0078), а также в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., мероприятие 1.2.2 – Поддержка научных исследований, проводимых группами под руководством кандидатов наук по научному направлению «Науки о Земле» в области «Океанология».

Литература

1. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И.В.Лавренова и Е.Г.Морозова. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 363 с.
2. Munk W., Wunsch C. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // Deep Sea Res. 1998. V.45. P.1977–2010.
3. Серебряный А.Н., Шапиро Г.И. Наблюдение внутренних волн в Печорском море // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир, 2001. С.140–150.
4. Степанюк И.А. Методы измерений характеристик морских внутренних волн. СПб: изд-во РГГМУ, 2002. 133 с.
5. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. Л.: Гидрометеоздат, 1992. 272 с.
6. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Внутренние волны на материковом и островном шельфах открытого океана: сравнительный анализ на примере наблюдений на Нью-Йоркском и Гавайском шельфах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т.46, № 5. С.694–702.
7. Серебряный А.Н., Пао К.П. Прохождение нелинейной внутренней волны через точку переверота на шельфе // Докл. АН. Т.420, № 4. 2008. С.543–547.
8. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // Акуст. журн. 2007. Т.53, № 3. С.410–436.

9. Зимин А.В., Николаев В.Г. Методика определения разнопериодных внутренних волн // Космогеофиз. и гидрофиз. факторы в морских технологиях / Под ред. проф. И.А.Степанюка. СПб.: Астерион, 2008, С.70–74.
10. Зимин А.В., Родионов А.А., Николаев В.Г. Наблюдения короткопериодных внутренних волн в Белом море // Тр. X Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2010. С.229–232.
11. Степанюк И.А. Методы измерений морских внутренних волн. СПб.: изд-во РГГМУ, 2002. 138 с.
12. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. 1996. Т.166, № 11. С.1145–1170.
13. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
14. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
15. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.2: Белое море. Вып.1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
16. Филатов Н.Н., Тержеев А.Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
17. Зимин А.В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натуральных наблюдений // Океанология. 2012. Т.52, № 1. С.16–25.

Статья поступила в редакцию 16.01.2012 г.

