

Характеристики изменчивости объёмного рассеяния звука на подспутниковых полигонах в океане

А.В. Березуцкий, В.Е. Скляр

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

117851 Москва, Нахимовский проспект, 36

E-mail: alxber@mail.ru, vsklyarov@km.ru

Обобщенный анализ данных натуральных экспериментов, проведённых в различных районах Северной Атлантики, морях Арктического бассейна и водах тихоокеанского сектора Антарктики, показал наличие существенной синоптической, мезомасштабной и тонкоструктурной изменчивости обратного объёмного рассеяния звука на глубинах 0-2000 м в диапазоне частот 10-150 кГц. Акустические измерения сопровождались наблюдениями из космоса со спутников "NOAA" в видимой и инфракрасной областях спектра. Осуществлялись и все доступные гидрологические измерения с борта научно-исследовательских судов. В результате многочисленных исследований, проводившихся по схеме подспутниковых полигонов, было установлено, что определяющими механизмами, обусловившими изменчивость объёмного рассеяния звука в указанном диапазоне масштабов, являлись особенности динамики морских вод. Было исследовано влияние динамики фронтальных разделов, связанных со струйными течениями океана, а также динамических образований (вихрей и меандров) в Северной Полярной фронтальной зоне. Отмечено влияние на изменчивость объёмного рассеяния звука топографических факторов вблизи СПФЗ и дискретно-непрерывного характера распространения в Северной Атлантике промежуточных вод средиземноморского происхождения.

Ключевые слова: акустическое зондирование, объёмное рассеяние звука, тонкая структура, мезомасштабная и синоптическая изменчивость.

Введение

Получение сведений в реальном времени о трехмерной структуре поля скорости течений в океане является актуальной задачей океанологии. Получить эти сведения с помощью космических измерений удается только для приповерхностного слоя океана. Вместе с тем синхронные подспутниковые измерения скорости течений методом акустической доплеровской локации с большого количества судов могут быть вполне посильной задачей в будущем. Безусловно, важным является разработка методических основ и практики подобных измерений. Проведённые в последние годы исследования [1] продемонстрировали значительный потенциал и дистанционного сейсмо-акустического зондирования (САЗ) для исследования неоднородностей водной толщи Мирового океана. Однако результаты этих исследований также показали и то, что для адекватного мониторинга и картирования структуры океанских фронтов, внутритермоклинных вихрей и тонкоструктурных образований требуется знание количественных значений уровней рассеяния звука в диапазоне частот САЗ. В настоящей работе приведены основные результаты акустико-гидрологических исследований, выполненных в различных районах Мирового океана. Эти результаты свидетельствуют, что знание количественных характеристик акустического рассеяния на неоднородностях водной толщи в сочетании со спутниковой информацией позволяет значительно повысить информативность измерений в целом. Открываются реальные перспективы дистанционного трехмерного мониторинга скоростей течений и картирования динамических образований в Мировом океане в масштабах от синоптического до тонкоструктурного. Успешное развитие в последние годы методов альтиметрических измерений из космоса только

способствует сделанным выводам. Расчеты параметров циркуляции по аномалиям урочной поверхности становятся рутинным этапом анализа в современной океанологии. Для перехода к трехмерному анализу необходимо соединить измерения из космоса с акустическими судовыми измерениями.

Пространственная изменчивость объёмного рассеяния звука в течении Гольфстрим

Комплексные акустико-гидрофизические исследования течения Гольфстрим проводились на полигоне с координатами центра 36°N , 66°W (рис. 1). Всего в ходе исследований через Гольфстрим [2] было сделано три разреза, на каждом из которых осуществлялось зондирование водной толщи частотах 12 кГц, 24 кГц и 75 кГц до глубин 1000 м. На всех разрезах проводились непрерывные измерения скорости течения с помощью акустического доплеровского профилографа ADCP, а также измерения температуры поверхности океана (ТПО). На отдельных участках осуществлялись STD зондирования в диапазоне глубин 0-1000 м. В ходе исследований проводились регулярный приём и обработка информации со спутников NOAA (видимый и ИК диапазоны).

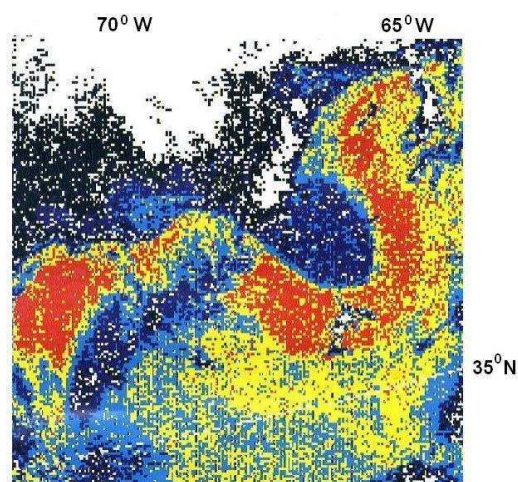


Рис. 1. Спутниковое ИК изображение поверхности океана в районе работ

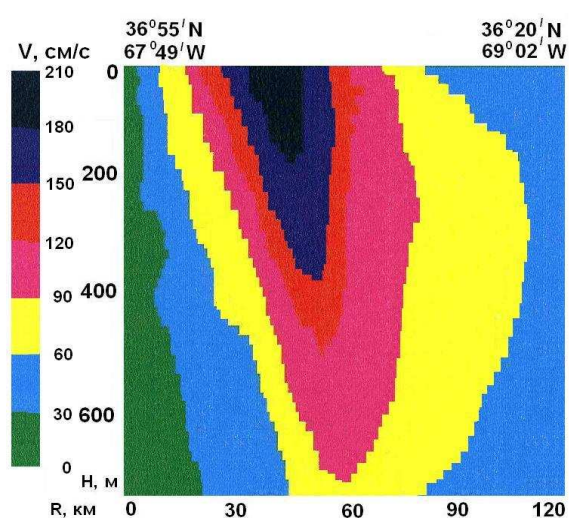


Рис. 2. Вертикальное сечение скорости течения на разрезе через Гольфстрим

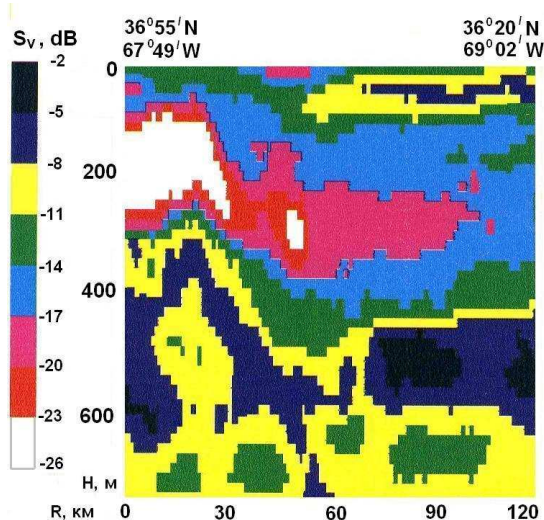


Рис. 3. Вертикальное сечение нормированной силы объёмного рассеяния звука S_v на разрезе через Гольфстрим. Частота 75 кГц

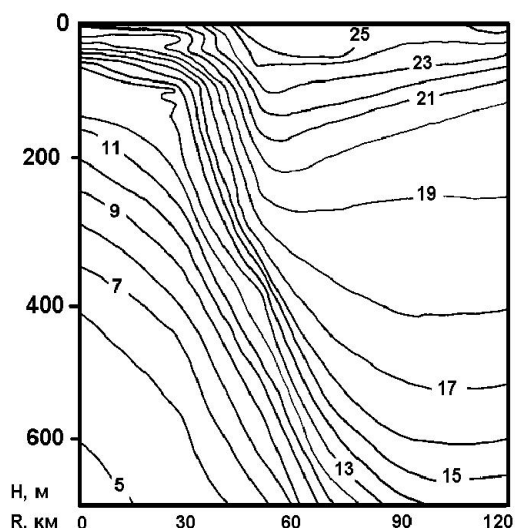


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры на разрезе через Гольфстрим

Спутниковые изображения показали наличие в районе исследований циклонического меандра Гольфстрима. По данным ADCP скорость течения в стрежне Гольфстрима на поверхности океана превышала 2,1 м/с, а на глубинах 500-600 м достигала 1м/с (рис.2). Такие высокие значения скоростей были, по-видимому, связаны с процессом образования из меандра циклонического вихря. По данным STD зондирований перепад температуры поперёк Гольфстрима составлял около 5⁰С на поверхности океана, более 10⁰С на глубине 200 м и более 11⁰С на глубинах 400 м и 600 м (рис. 3).

Акустические измерения показали, что главной особенностью структуры поля объёмного рассеяния в исследованном районе являлся основной хорошо выраженный звукорассеивающий слой (ЗРС), который со стороны склоновых вод располагался на глубинах от 400 м до 600 м (рис. 4). В области основного фронта ось этого ЗРС сначала поднималась до горизонтов 310-320 м, а затем заглублялась до 530-540 м. Толщина ЗРС в склоновых водах составляла более 200 м, а в водах Гольфстрима она варьировалась от 120 м до 180 м. Следует также отметить, что со стороны Саргассова моря в водах Гольфстрима в приповерхностном слое на горизонтах от 30 м до 80 м наблюдался ещё один ЗРС, для которого были характерны практически такие же уровни рассеяния, что и для основного ЗРС. Однако в склоновых водах этот слой практически не прослеживался. Минимальные уровни рассеяния наблюдались со стороны склоновых вод на горизонтах 130-250 м, которые более чем на два порядка были ниже уровней, характерных для основного ЗРС. На основном фронте происходило заглубление центральной оси слоя с минимальными уровнями рассеяния до горизонта 300 м с последующим уменьшением его толщины до нуля в водах Саргассова моря.

В целом результаты проведённых исследований продемонстрировали существенную корреляцию между пространственной структурой поля объёмного рассеяния звука S_v и особенностями структуры основного фронта Гольфстрима на всех трёх разрезах.

Трёхмерная структура поля объёмного рассеяния звука в Баренцевом море

Одной из главных гидрологических особенностей динамики вод Баренцева моря является Северная Полярная Фронтальная Зона (СПФЗ). В целом её существование обусловлено взаимодействием трансформированных Атлантических вод с Арктическими водами. Следует отметить, что анализ ранее проведённых исследований указывает на значительное влияние топографических факторов на структуру и динамику термохалинных полей СПФЗ в Баренцевом море.

Полномасштабные уникальные детальные акустико-гидрологические исследования трёхмерной структуры СПФЗ проводились в районе, ограниченном координатами 36⁰Е–40⁰Е и 71⁰Н-72⁰Н. Было выполнено 63 гидролого-акустические станции [3], располагавшиеся по эквидистантной схеме на периферии Центрального желоба Баренцева моря. Кроме того, акустические измерения на частотах 12 кГц, 24 кГц и 75 кГц проводились также и на переходах между станциями. Непосредственно перед проведением исследований и в ходе работ на полигоне принималась и обрабатывалась информация со спутников NOAA и Метеор. Спутниковые данные позволили точно локализовать положение крупномасштабного меандра СПФЗ в районе Центрального желоба Баренцева моря, а также получить детальную информацию о его мезомасштабной структуре. В частности, в южной части исследованного района был идентифицирован холодный мезомасштабный меандр, а в северо-западной части - цепочка мезомасштабных структур.

Данные STD измерений показали, что в исследованном районе происходило взаимодействие между относительно тёплыми и солёными ($T=2-5^0C$, $S=34,8-34,9$ ppt) водами Центральной ветви течения Норд Кап и более холодными и менее солёными ($T=-1^0C$ - $+4^0C$, $S = 34,7 - 34,8$ ppt) водами Баренцева моря. Основные особенности термоструктуры исследованной части СПФЗ показаны на рис. 5. Контрасты температуры поперёк фронтальной зоны варьировались в пределах 1⁰С в верхних слоях до 3-4⁰С на горизонтах 100-150 метров. На более глубоких горизонтах

контраст составлял $1-2^{\circ}\text{C}$. Вариации солёности во всём диапазоне глубин были незначительны и не превышали $0,01$ ppt. Контрасты условной плотности достигали значений $0,2-0,3$ SU (за исключением глубинных слоёв, где они были незначительны). Географически фронт заглаблялся в направлении от вод Баренцева моря к водам течения Норд Кап.

Анализ данных гидрофизических измерений выявил существование цепочки мезомасштабных меандров и вихревых образований, располагавшихся в зоне взаимодействия вод в направлении с северо-запада на юго-восток. Характерные горизонтальные масштабы этих образований составляли $50-60$ км.

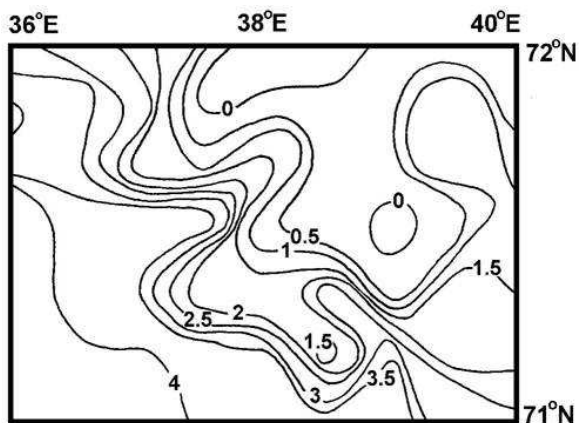


Рис. 5. Карта температуры на глубине 100 м

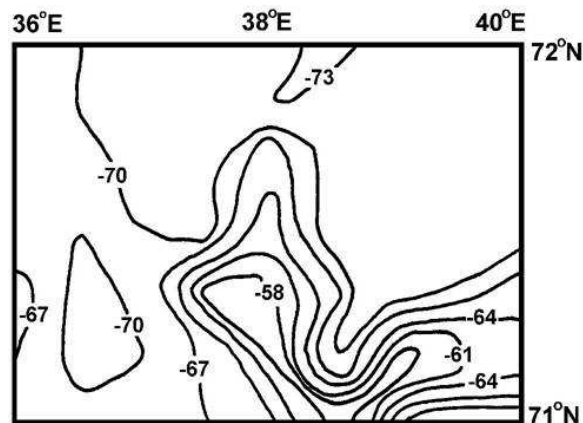


Рис. 6. Карта распределения S_v на глубине 100 м.
Частота 12 кГц

Один из таких меандров располагался в районе $71^{\circ}30'\text{N}$ и $37^{\circ}30'\text{E}$ на склоне желоба. Вычисления показали, что меридиональный прогиб в распределении гидрофизических характеристик в циклонической и антициклонической частях этого образования достигал 100 м, а горизонтальные аномалии температуры, солёности и условной плотности превышали 2°C , $0,1$ ppt и $0,2$ SU соответственно. При этом важно, что меандрирование прослеживалось от поверхности до придонных слоёв. В тоже время следует отметить, что в зональном направлении заглабление изолиний составляло около 50 м, что свидетельствовало о том, что процесс формирования вихревой пары ещё не завершился.

Юго-восточнее этого формирующегося образования была обнаружена вихревая пара, состоящая из циклонической ($71^{\circ}10'\text{N}$, $38^{\circ}30'\text{E}$) и антициклонической ($71^{\circ}20'\text{N}$, $38^{\circ}30'\text{E}$) частей. Характерные горизонтальные масштабы этих образований составляли $20-30$ км. Разница между значениями температуры, солёности и условной плотности в центральной и периферийными частями в меридиональном и зональном направлениях составляли $1,5-2,0^{\circ}\text{C}$, $0,05-0,1$ ppt и $0,15-0,20$ SU соответственно. Наиболее существенное различие в гидрофизических характеристиках наблюдалось на горизонтах $50-170$ м.

Данные детальных акустических измерений на частотах 12 и 24 кГц показали высокую степень их подобности на обеих частотах, а также значительную корреляцию между пространственной структурой гидрофизических и акустических характеристик в исследованном районе СПФЗ. Основные элементы и динамические образования фронтальной зоны отчётливо прослеживались как на меридиональных и зональных разрезах силы слоя S_v , так и на картах S_v на различных горизонтах. На рис. 6 приведена карта S_v исследованного района на горизонте 100 м. На рис. 7, 8 и 9 показаны вертикальные сечения S_v на зональных разрезах вдоль $71^{\circ}10'\text{N}$ и $71^{\circ}20'\text{N}$ и меридиональном разрезе вдоль $38^{\circ}30'\text{E}$. На карте и разрезах отчётливо прослеживаются как генеральное направление фронта, так и положение его основных меандрирующих и вихревых структур. Наибольшие горизонтальные контрасты в силе объёмного рассеяния наблюдались в центральной и юго-западной частях исследованного участка СПФЗ в зоне взаимодействия вод Баренцева моря и течения Норд Кап. Они достигали своих максимальных значений $15-20$ дБ на горизонтах $90-180$ м. По данным акустических измерений типичная ширина меандрирующих градиентных зон составляла $10-15$ км,

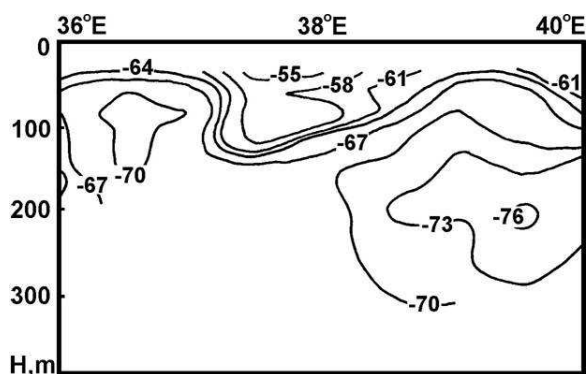


Рис. 7. Вертикальное распределение S_v вдоль $71^{\circ}10'N$. Частота 12 кГц

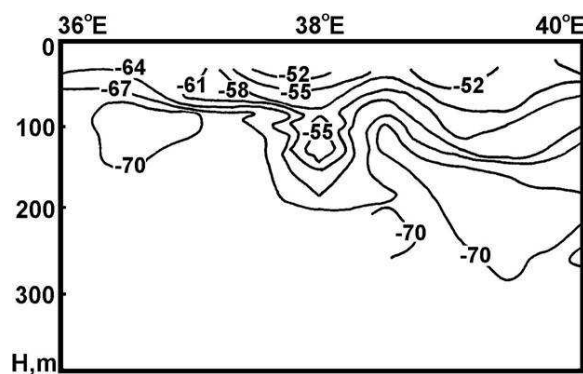


Рис. 8. Вертикальное распределение S_v вдоль $71^{\circ}20'N$. Частота 12 кГц

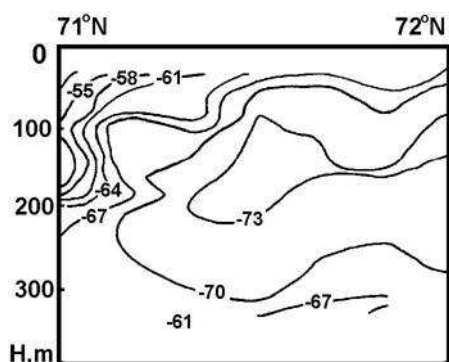


Рис. 9. Вертикальное распределение S_v вдоль $38^{\circ}30'E$. Частота 12 кГц

ветствующие значения пространственного градиента силы объёмного рассеяния составляли 1-1,6 дБ/км. При этом на глубинах 50-90 м контрасты S_v поперёк фронта составляли 10-12 дБ, а на горизонтах ниже 180 м разница с силой рассеяния составляла 4-6 дБ.

Структурные особенности формирующейся вихревой пары также отчётливо проявляются и на вертикальном сечении силы объёмного рассеяния звука вдоль $38^{\circ}30'E$. Прогиб изолиний силы рассеяния между центральной и периферической частями в циклонической части пары составляет 100-100 м в слое 90-200 м. Аналогичный прогиб в антициклонической части меньше и составляет 25 м на горизонтах 100 м. Важно отметить, что выявленные по данным акустических измерений величины вертикальных смещений изолиний S_v являются дополнительным индикаторами динамики этого вихревого образования в исследованном районе СПФЗ.

Проведённые детальные акустико-гидрологические исследования показали наличие существенной мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости объёмного рассеяния звука в исследованном районе СПФЗ. Выявлено, что типичные горизонтальные масштабы областей с квазиоднородными характеристиками объёмного рассеяния составляли 20-40 км, что соответствовало масштабам основных гидродинамических структур исследованного района Баренцева моря. Переходные между этими «квазиоднородными» областями зоны являлись зонами высоких пространственных градиентов силы рассеяния S_v , достигавших значений 1,6-1,8 дБ/км. При этом важно, что пространственная конфигурация этих «градиентных» зон в целом хорошо отражала особенности пространственной конфигурации трёхмерной гидродинамической структуры исследованного участка СПФЗ. Последнее, в частности, показывает возможность акустического мониторинга в реальном времени мезомасштабной и субмезомасштабной структур океанических фронтов с помощью акустических систем, установленных на борту судна, а также при их размещении на специальных платформах на дне океана (акустическая локация в направлении от дна к поверхности океана).

Некоторые особенности крупномасштабной структуры поля объёмного рассеяния звука в Тихоокеанском секторе Антарктики

Исследования особенностей крупномасштабной изменчивости объёмного рассеяния звука в Тихоокеанском секторе Антарктики выполнялись на 113 гидролого-акустических станциях, расположенных на разрезе вдоль 67°S от 80°W до 170°E . Измерения проводились на частотах 12 кГц и 24 кГц в диапазоне глубин 0-1200 м. Главными задачами исследований являлись: 1 – изучение картины географического распределения силы объёмного рассеяния звука на зональном разрезе вдоль Южного полярного круга, 2 – выяснение связи между особенностями крупномасштабной структуры объёмного рассеяния звука и особенностями распределения водных масс в этом районе Мирового океана, 3 – выявление основных механизмов, определяющих изменчивость объёмного рассеяния звука в регионе исследований, 4 – анализ основных особенностей пространственно-временной изменчивости акустического рассеяния.

В ходе всего периода исследований на разрезе осуществлялся регулярный приём спутниковых изображений поверхности океана (ТПО) в видимой и инфракрасной областях спектра, а на дрейфовых станциях проводились STD зондирования от поверхности до дна.

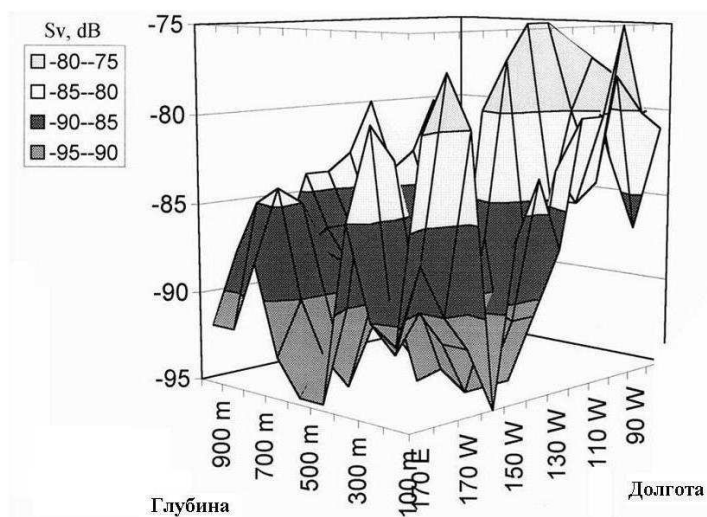


Рис. 10. 3D представление распределения силы объёмного рассеяния звука S_v на разрезе вдоль 67°S . Частота 12 кГц

Наиболее интересные результаты были получены при измерениях на частоте 12 кГц, проводившихся на дневных станциях разреза. На рис. 10 показано 3D представление распределения силы объёмного рассеяния звука вдоль 67°S .

Средние величины силы рассеяния в исследованном районе варьировали от -96 дБ до -68 дБ, что соответствовало изменению интенсивности рассеянного сигнала на три порядка. Минимальные значения S_v наблюдались на горизонтах от 500 м до 600 м в западной части разреза, а также на горизонтах от 300 м до 500 м в его восточной части. Рис.10 показывает достаточно сложную структуру пространственной изменчивости акустического рассеяния. Главной особенностью являлась её сильная неоднородность, проявлявшаяся как в вертикальном (по глубине), так и в зональном (вдоль разреза) направлениях. Анализ акустических данных позволил выявить ряд основных рассеивающих структур. В первую очередь следует отметить область повышенных уровней объёмного рассеяния, приуроченную к горизонтам от 300 м до 500 м в восточной части разреза. Максимальные значения силы рассеяния в этом слое достигали значения -75 дБ. Такие величины были характерны для моря Амундсена и западной части моря Беллинсгаузена. Следует заметить, что в восточной части моря Беллинсгаузена в этом же

Данные спутниковых наблюдений показали, что на отдельных участках разреза наблюдалось проникновение океанических фронтов в южном направлении до широт 68° - 69°S (море Беллинсгаузена и море Росса) с перепадами ТПО порядка $1,0^{\circ}$ - $1,2^{\circ}\text{C}$.

Основным результатом проведённых исследований явилось определение количественных значений силы объёмного рассеяния в Тихоокеанском секторе Антарктики и выявление основных особенностей пространственно-временной изменчивости акустического рассеяния в данном районе Мирового океана.

диапазоне глубин значение силы рассеяния в целом было на 6 дБ ниже. Другой интересной особенностью пространственного распределения силы рассеяния являлся глубоководный звукорассеивающий слой, располагавшийся в среднем на горизонтах 850-1150 м на этом же участке разреза. Максимально наблюдавшиеся в этом слое значения силы рассеяния составляли -85 дБ. Следует также отметить, что указанный слой прослеживался на этих глубинах вплоть до западной части моря Росса. Своей максимальной толщиной 400 м он достигал в северо-западной части моря Беллингаузена, а минимальной (около 150 м) – в западной части моря Росса. Третья интересная область была обнаружена на периферии моря Росса. Она характеризовалась очень низкими уровнями рассеяния со средними значениями S_v около -96 дБ. Свою максимальную толщину 600 м эта область низкого рассеяния имела в северо-восточной части моря Росса, а минимальную 150 м – на его северо-западной периферии. Ещё одна область с низкими уровнями акустического рассеяния -96 дБ также была выявлена между 140°W и 160°E на глубинах 500-700 м. К числу интересных особенностей структуры акустического рассеяния также относилась область повышенных (до -80 дБ) значений S_v в северо-западной части моря Росса в диапазоне глубин 350-500 м. Анализ акустических изображений этой области показал их идентичность акустическим изображениям, полученным в море Амундсена, что позволяет сделать предположение о преобладании одинаковых механизмов рассеяния на указанных участках разреза.

Расчёты величин зональных ds_v/dR градиентов силы объёмного рассеяния звука на разных глубинах показали, что их средние значения находятся в пределах от -2 дБ до 2 дБ на 100 км для глубин 0-400 м, от -1 дБ до 1 дБ на горизонтах 400-600 м, от -1 дБ до 0,5 дБ на 100 км на глубинах 600-1000 м и от -0,5 дБ до 0,5 дБ на горизонтах 1000-1200 м. Интересно отметить, что даже на глубинах свыше 1000 м наблюдалась хорошо выраженная зональная изменчивость объёмного рассеяния звука.

Выводы

Целью настоящей работы являлось рассмотрение результатов измерений из космоса совместно с акустическими измерениями с борта научно-исследовательских судов. Исследовалось влияние пространственной изменчивости и динамики океанских течений, фронтов и других динамических структур на изменчивость характеристик объёмного рассеяния звука в океане. Обобщенный анализ данных натуральных экспериментов, проведённых в различных районах Северной Атлантики, морях Арктического бассейна и водах тихоокеанского сектора Антарктики, показал наличие широкого спектра пространственной и временной изменчивости обратного объёмного рассеяния звука на глубинах 0-2000 м в диапазоне частот 10-150 кГц в масштабах от синоптического до тонкоструктурного. Как правило, эта изменчивость соответствовала термическим контрастам на спутниковых ИК-изображениях океана. Сочетание акустических измерений и альтиметрических измерений из космоса представляется весьма перспективным в будущем для получения трехмерной структуры океанских течений.

Литература

1. Geli L., Savoye B., Carton X. et al. Seismic imaging of the Ocean internal structure: a new tool in physical oceanography? // EOS, 2005. V. 86. N. 2. P. 15.
2. Berezutskii A.V., Maximov S.E., Sklyarov, V.E., Gordon R.I. Deep ADCP velocity measurements in the Gulf Stream // Journal of Atmospheric and Ocean Technology, 1991. V. 8, N.6, P.884-887.
3. Березуцкий А.В., Максимов С.Э., Родионов В.Б., Скляр В.Е. Комплексное гидролого-акустическое исследование структуры полярного фронта в Баренцевом море контактными и дистанционными методами // Океанология, 1994, V. 99, N. 10, P.20,375-20,379.
4. Sklyarov V.E., Berezutskii A.V. On the influence of large scale circulation on volume sound scattering in the Pacific section of the Antarctic // Proceedings of SPIE, V.6522, 652212(Nov. 2006) doi 10.1117/12.723099.

Characteristics of volume sound scattering variability in sub-satellite oceanic experiments

A.V. Berezutsky, V.E. Sklyarov

P.P. Shirshov Institute of Oceanology

Combined analysis of oceanic experiments made in different parts of the North Atlantic, Arctic seas of Russia and in the Pacific sector of the Antarctic showed the existence of significant mesoscale and finestructure variability of volume sound scattering at depth of 0–2500 m in the frequency band of 10–150 kHz. Acoustic measurements were combined with data of satellite observations in the IR and visible spectral ranges (NOAA satellites). In addition, data of hydrologic measurements from a board of research vessels were also used for the analysis. As a result of the numerous sub-satellite field experiments it was revealed that the main mechanisms which dominantly influenced on the volume sound scattering variability were the peculiarities of ocean dynamics at depths of acoustic measurements. The influence of oceanic fronts dynamics connected with the oceanic currents and streams as well as open ocean eddies and near shore upwellings were investigated. A role of topographic factors in the region of North Polar Frontal Zone and an influence of Intermediate Atlantic Waters on the field of volume sound scattering were also revealed.

Keywords: acoustic sensing, volume sound scattering, fine structure, meso-scale and synoptic variability.