

УДК 551.46.06

© А. А. Родионов<sup>1</sup>, А. В. Зимин<sup>1,2</sup>, Д. А. Никитин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург  
zimin2@mail.ru

## КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В МЕЗО- И СУБМЕЗОМАСШТАБНОМ ИНТЕРВАЛЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ (на примере Белого моря)

Предметом обсуждения в работе являются результаты наблюдений (мониторинга) субмезомасштабных явлений (внутренних волн и вихрей) в Белом море и оценка влияния изменчивости гидрофизических полей на распространение гидроакустических сигналов. Спутниковые наблюдения, как часть системы наблюдения, позволяют определить характерные районы, в которых встречаемость субмезомасштабных явлений высока. В выделенных районах моря выполняются судовые наблюдения, которые в сочетании с моделированием распространения гидроакустических сигналов позволяют определять характер их изменчивости под влиянием среды. Показано широкое распространение короткопериодных внутренних волн и субмезомасштабных вихревых структур на акватории Белого моря, установлено их влияние на локальные изменения рефракции гидроакустических волн и соответственно на вариативность уровней принимаемых гидроакустических сигналов.

**Ключевые слова:** наблюдения, внутренняя волна, вихрь, прилив, рефракция, гидроакустический сигнал, Белое море.

*A. A. Rodionov<sup>1</sup>, A. V. Zimin<sup>1,2</sup>, D. A. Nikitin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint-Petersburg Department of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Russia

<sup>2</sup>Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

## THE COMPLEX STUDY OF HYDRODYNAMIC AND HYDROACOUSTIC PHENOMENA IN MESO- AND SUBMESOSCALE VARIABILITY OF HYDROPHYSICAL FIELDS IN THE ARCTIC SEAS (illustrated by the example of the White Sea)

The paper discusses the results of submesoscale phenomena monitoring (internal waves and eddies) in the White Sea and the assessment of the impact of hydrophysical fields variability on hydroacoustic signals propagation. Satellite observations as a part of a surveillance system allow specifying the areas of the frequent occurrence of submesoscale phenomena. Combining in situ observations of these areas with modeling of hydroacoustic signals propagation allows determining the nature of their variability under the impact of the environment. The widespread existence of short-period internal waves and submesoscale eddies in the White Sea is shown, their impact on the local changes of hydroacoustic waves refraction as well as on the level variability of the received hydroacoustic signals is found out.

**Key words:** monitoring, internal wave, eddy, tide, refraction, hydroacoustic signal, the White Sea.

Во второй половине прошлого и начале нынешнего века в связи с развитием спутниковых и контактных полигонных систем наблюдений стали накапливаться сведения о гидрофизических процессах и явлениях в короткопериодной части мезомасштабной изменчивости полей, так называемом субмезомасштабе, с размерами структур по горизонтали от сотен метров до единиц километров и характерным временем изменчивости от нескольких минут до суток. Физически они связаны с тонкой структурой стратификации вод, короткопериодными внутренними волнами, малыми вихревыми и струйными течениями, мезомасштабной динамикой фронтальных разделов.

Незначительные пространственные масштабы и малые времена жизни затрудняли регулярное наблюдение этих явлений, оценку их параметров и ареалов распространения. Вместе с тем интенсивные мезо- и субмезомасштабные процессы могут оказывать существенное воздействие на подводные мобильные объекты и стационарные сооружения, а также на каналы распространения

гидроакустических волн. Это, в свою очередь, влияет на решение задач управляемости и навигации подводных объектов, освещения обстановки и связи под водой, добычи и транспортировки полезных ископаемых, создания и эксплуатации инфраструктуры подводных сооружений. Особенно актуально решение указанных задач для арктических морей России, имеющих важное военно-стратегическое и хозяйственное значение.

Необходимость исследований мезо- и субмезомасштабных явлений диктуется также потребностями науки, а именно изучением закономерностей передачи энергии от синоптических масштабов к микроструктуре океана. В связи с этим в последние годы отмечается рост теоретических и экспериментальных исследований процессов в короткопериодном интервале изменчивости гидрофизических полей (ГФП) [1, 2]. Высокорастворимые численные модели, способные воспроизводить эти сложные гидродинамические процессы в ограниченных областях, нуждаются в новой экспериментальной информации о короткоживущих структурах для согласования ключевых параметров теоретических подходов [3]. Для этого были организованы несколько комплексных масштабных экспериментов, среди которых можно отметить проекты Latex (LAgrangian Transport EXperiment, 2008—2011 гг., Лионский залив), Latmix (Scalable Lateral Mixing and Coherent Turbulence, 2011—2012, Саргассово море, Голфстрим), SubEx (Submesoscale Experiment 2011, 2013, Калифорнийский залив), GLAD (Grand LAgrangian Deployment, 2012, Мексиканский залив). Российскими специалистами были выполнены подспутниковые эксперименты в Черном море [4, 5] и в Белом море в 2012 г. [6], которые показали необходимость получения высокоразрешающих спутниковых данных и полезность наблюдений *in situ* для изучения характеристик субмезомасштабных структур. Однако в научной литературе в настоящее время отсутствуют данные о комплексном исследовании гидродинамических и гидроакустических явлений в мезо- и субмезомасштабном интервале изменчивости гидрофизических полей, в том числе для арктических морей. В данной статье предлагается восполнить этот пробел на примере Белого моря, обладающего всеми типичными для арктического моря гидрологическими особенностями.

Для изучения и набора статистик по мезо- и, особенно, субмезомасштабным явлениям неприменимы традиционные методы океанологических измерений, основанные на получении данных на стандартных горизонтах на относительно редкой для подобных явлений сетке станции. Исследование необходимо осуществлять на основе методологии специализированного мониторинга, позволяющей с одной стороны охватывать значительные акватории, а с другой — получать детальные представления об изменчивости гидрофизических полей на небольших пространственно-временных масштабах с учетом их связи с динамическими процессами большего масштаба. Такая методология отрабатывалась авторами статьи в 2006—2014 гг. на Белом море. Ее элементы представлены в работах [7—11] и защищены авторским свидетельством [12].

Система наблюдений (мониторинга) короткопериодной изменчивости ГФП в море включает судовую и космическую подсистемы наблюдений. В рамках системы объединяются результаты учащенных судовых наблюдений в отдельных районах моря и спутниковые данные высокого разрешения, охватывающие значительные акватории моря.

Космическая подсистема позволила получить представления о пространственном распределении мезо- и субмезомасштабных структур на акватории всего моря. В работе использовались данные со спутников ENVISAT (ASAR), RADARSAT (SAR) и Terra/Aqua (MODIS). По спутниковым данным выбирались районы работ для судовой подсистемы наблюдений. Она включала в себя микромасштабные океанографические съемки и измерения на полигонах из буйковых станций, дополненные данными учащенных океанографических станций (сканирований) с заякоренного в районе полигона судна.

Мелкомасштабные океанографические съемки выполнялись в разные фазы приливного цикла. Каждая съемка состояла из 2—4 разрезов. Наблюдения производились за температурой и соленостью с помощью STD-зондов с дискретностью по вертикали не более одного метра.

Общее время измерений на полигоне буйковых станций составляло, как правило, 26—27 ч. Устанавливались 3 буйковых станции:

- на северной границе полигона на дно на немагнитной платформе устанавливался акустический профилограф течения. Кроме измерений течений он регистрировал колебания уровня и придонной температуры;
- в центральной части полигона устанавливалась буйковая станция с измерителем течений в придонном слое и STD-зондом, располагавшимся на горизонте слоя скачка;
- на южной границе полигона с заякоренного судна проводились работы позиционными измерителями течений и температуры, а также сканирование водной толщи STD зондом.

Дискретность измерений у всех приборов задавалась 2 мин. Сканирование выполнялось от поверхности до дна и велось в режиме 2 ч непрерывного сканирования, перерыв — 1 ч. Один спуск и подъем зонда занимали 1—2 мин.

Спутниковые наблюдения позволили охватить всю акваторию моря (100 снимков), а контактные наблюдения выполнялись на 19 полигонах, располагавшихся в различных по гидрологическим условиям районах моря, в период с 2006 по 2014 гг. Выполненные исследования позволили создать базы данных субмезомасштабных явлений и процессов в Белом море и сформулировать обобщенные данные по их характеристикам и ареалам распространения.

Впервые выявлено широкое распространение короткопериодных внутренних волн (ВВ) на акватории Белого моря. Типовые районы регистрации короткопериодных ВВ:

— участки шельфа вблизи фронтальных зон с ярко выраженной стратификацией вод, в частности на границе Бассейна и Горла, Двинском заливе, севернее Соловецких островов;

— участки шельфа с глубинами 30—50 м, как правило, около проливных зон, где при наличии активной динамики сохраняется стратификация вод, и присутствуют значительные неровности дна: подводный желоб на границе Бассейна и Горла, районы Западной и Восточной Соловецких салм.

Регулярность наблюдений короткопериодных ВВ в определенную фазу волны  $M_2$  и зависимость количества их проявлений от фазы луны подтверждает вывод о преимущественно приливном характере их образования.

Длины короткопериодных ВВ в пределах акватории Белого моря меняются от 100 м до 2 км (рис. 1, см. вклейку), периоды от единиц до десятков минут, высоты достигают 20 м.

Во всех рассматриваемых районах Белого моря спектры короткопериодных ВВ по абсолютным значениям превосходят модельный спектр Гарретта—Манка, а по закону спадания совпадают с ним. В глубокой части моря наиболее интенсивные ВВ имеют полусуточный период и отмечаются в слое придонных вод, а короткопериодные ВВ в термоклине отмечаются эпизодически; на неглубоких (40—50 м) участках шельфа с выраженной двухслойной структурой вод преобладает короткопериодное волнение.

Многолетние наблюдения за пространственно-временной изменчивостью субмезомасштабных вихревых структур показали, что они:

— распространены на акваториях Двинского залива и Бассейна в районах фронтов и свала глубин и имеют диаметр 2—8 км;

— наиболее часто регистрируются в июне и июле в период сизигийных приливов;

— обладают преимущественно циклоническим характером вращения;

— над банками около Соловецких островов их образование отмечается в определенную фазу прилива, они имеют характерное время жизни несколько часов и прослеживаются в верхнем 10—15-метровом слое.

Исследования особенностей распространения гидроакустических волн проводились одновременно с наблюдением мезо- и субмезомасштабных явлений, а именно короткопериодных внутренних волн. С этой целью была разработана следующая схема проведения натурного эксперимента (рис. 2). Излучение гидроакустических волн производится с судна, стоящего на якорю в заданной точке, при помощи излучателя, погруженного на глубину на 3—5 м выше верхней границы пикноклина. На расстоянии 2—3 м от излучателя размещается контрольный измерительный гидрофон. Прием сигналов осуществляется вертикальной линейкой гидрофонов, опущенных с плавсредства, стоящего на якорю на заданном расстоянии от судна. Глубины расположения гидрофонов охватывают слой от глубины погружения излучателя до глубины ниже границы пикноклина на 3—5 м. Сигналы гидрофонов оцифровываются аналого-цифровым преобразователем и записываются на жесткий магнитный диск переносного персонального компьютера; в дальнейшем они подвергаются статистической обработке. С момента начала эксперимента включается тракт излучения и производится запись сигналов, принятых гидрофонами; одновременно с судна осуществляются непрерывные измерения гидрофизических полей.

Предварительно для оценки ожидаемых эффектов проводилось моделирование распространения гидроакустических импульсов через возмущенную область пикноклина по результатам натурных наблюдений короткопериодных внутренних волн в Белом море в августе 2013 г. [13] При построении двумерного пространственного распределения скорости звука (рис. 3, см. вклейку) задавалась скорость распространения первой моды внутренних волн равная 0.3 м/с, исходя из дисперсионного соотношения для среднего распределения плотности за указанный период. Из рисунка видно, что в диапазоне глубин от 7 м практически до дна наблюдаются внутренние волны, амплитуда которых постепенно уменьшается при приближении ко дну.

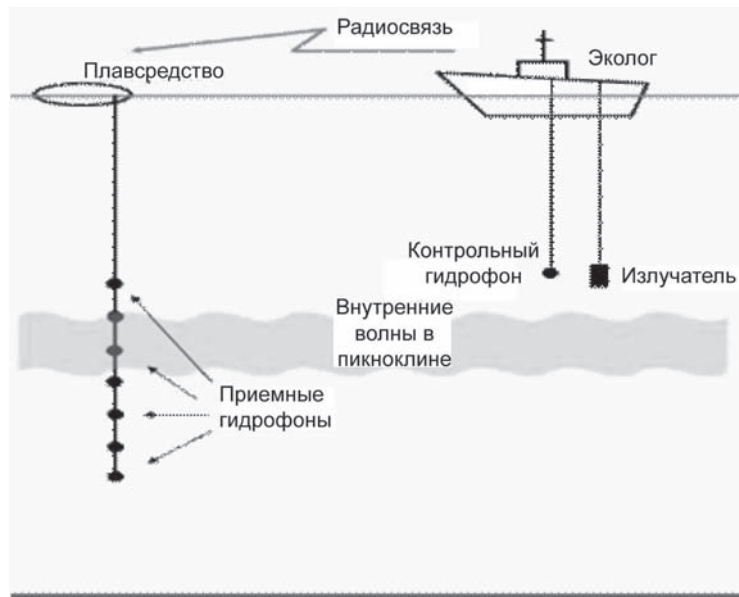


Рис. 2. Схема проведения натурального эксперимента.

Рассмотрено два варианта взаимного расположения излучателя и приемной системы. Излучатель расположен на глубине 7 м. Приемная система представляет собой вертикальную линейку, состоящую из 41-го гидрофона с расстоянием между ними 0,25 м и расположенную в диапазоне глубин от 10 до 20 м. В первом случае расстояние между излучателем и приемной системой составляет 150 м, во втором — 350 м. Диапазон углов выхода лучей из излучателя составляет  $\pm 5^\circ$ . Эти варианты подобраны таким образом, чтобы в первом случае исключить попадание отраженных от дна и поверхности лучей в приемную систему, а во втором наоборот обеспечить попадание в приемную систему как прямых лучей, так и лучей, отраженных от дна и поверхности. Расчеты распространения сигналов осуществляются лучевым методом в пространственно неоднородном волноводе [14] с учетом времени задержки сигналов по каждой лучевой трубке для каждого приемника. Далее также для каждого отдельного приемника моделируется суммарный импульс акустического давления от всех трубок и определяется его среднеквадратическое значение. Затем излучатель и приемная антенна перемещаются на один шаг по горизонтали, равный двум метрам (моделируется перемещение внутренней волны) и производится следующий цикл расчетов. На рис. 4 изображена лучевая картина и взаимное расположение излучателя и двух приемных систем для шага, при котором излучатель расположен на расстоянии 702 м, а приемные системы на расстоянии 852 и 1052 м соответственно. На рисунке хорошо видны области пространства, в которых лучи сгущаются и разрежаются, то есть происходит фокусировка и дефокусировка гидроакустических волн под влиянием внутренних волн.

Результаты моделирования представлены в виде двумерной яркостной картины (рис. 5, см. вклейку), которая отображает значения уровня принятого сигнала на каждом элементе системы в зависимости от цикла расчетов на расстоянии от начала координат, равном расстоянию до середины базы. Одновременно представлено контурное отображение двумерного распределения скорости звука в диапазоне 1465—1490 м/с с шагом 5 м/с.

На рис. 5, а (см. вклейку) представлены уровни сигналов, полученные с ближней приемной системы. Видны периодические полосы повышенного уровня сигнала, имеющие небольшой наклон. Эти локальные максимумы для приемников, расположенных в верхней части системы, хорошо совпадают с положением подошв внутренних волн. Размах вариаций уровней сигналов с каждого гидрофона в среднем составляет 5—7 дБ. На рис. 5, б (см. вклейку) приведены уровни сигналов с дальней приемной системы. Здесь также видны полосы повышенного уровня сигнала, однако, они не имеют четко выраженной регулярности по сравнению с сигналами, принятыми ближней системой.

Размах вариаций уровней сигналов с каждого гидрофона составляет величину порядка 20 дБ. На рисунке наблюдаются периодические волнообразные кривые, соответствующие минимальным значениям сигналов, удовлетворительно совпадающие по периоду и амплитуде с внутренними волнами. Данное явление, вероятно, связано с периодическим изменением рефракции и, соответственно, условий суммирования отраженных от дна и поверхности сигналов с прямым сигналом.



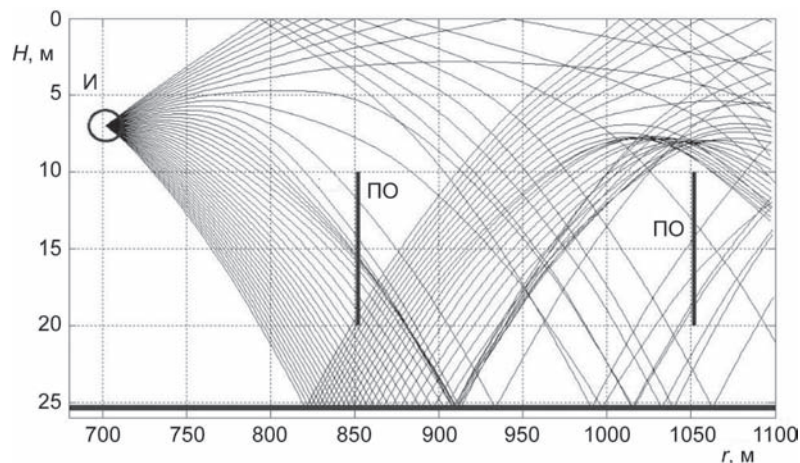


Рис. 4. Лучевая картина распространения гидроакустических импульсов. И — излучатель, ПО — приемные системы, Н — глубина, м;  $r$  — расстояние, м.

В июле 2014 г. проведен натурный эксперимент по оценке влияния мезомасштабной изменчивости гидрофизических полей на распространение гидроакустических сигналов в четырех точках акватории Белого моря. Глубины в этих точках составляли величины порядка 40 м. Излучающий тракт располагался на борту НИС «Эколог», его гидроакустическая антенна опускалась на глубину порядка 7 м. Для отстройки от помех, вносимых дрейфом судна, сигнал излучался одним элементом антенны, который не обладал высокой направленностью.

Приемная система, состояла из 4-х измерительных гидрофонов, расположенных в виде вертикальной линейки (расстояние от нижнего первого гидрофона до второго — 10 м; от второго до третьего — 5 м и от третьего до четвертого — 5 м), четырехканального измерительного усилителя, четырехканального АЦП и переносного персонального компьютера. Приемная система размещалась на катере, стоящем на якорю на расстоянии 150—670 м от судна. Антенна погружалась на глубину порядка 30 м. В процессе проведения экспериментов излучались тональные импульсы длительностью 0.1 с, частотой 3 кГц с периодом следования 5 с. Эти сигналы принимались приемной системой и регистрировались в виде файлов длительностью 10 мин. По результатам обработки принятых гидроакустических сигналов величины изменения уровней их дисперсий для дистанций 150 м составили 6...10 дБ; 280 м — 8...9 дБ; 570 м — 5...9 дБ; 670 м — 10...12 дБ, а периоды коррелируют с периодами внутренних волн.

На рис. 6, а (см. вклейку) для примера показаны результаты расчета временной динамики вертикального распределения скорости звука по данным многочасового сканирования гидрофизических полей в точке 3. В этой точке пикноклин находится на глубине 7 м с четко выраженными цугами внутренних волн размахом 7...10 м и периодами от 8 до 20 мин. Штриховыми линиями показан временной интервал регистрации гидроакустических сигналов. На рис. 6, б (см. вклейку) показана временная динамика дисперсии гидроакустических сигналов, принятых приемной системой в точке 3, расположенной на расстоянии 280 м от излучателя.

Периоды изменения дисперсии сигнала составляли величины порядка 10 и 20—25 мин, а уровень изменения — 8—9 дБ (зеленая линия) и 3.5—6 дБ для ее низкочастотной составляющей (синяя линия). Сигналы нижнего гидрофона соответствуют нижней кривой; верхнего — верхней. Разрыв данных в районе 70 мин отображен вертикальными штриховыми линиями.

Для повышения достоверности оценки влияния внутренних волн на распространение гидроакустических сигналов и формирование гидроакустических полей при использовании просветного метода необходимо обеспечить стабильное расположение излучающей антенны и приемной системы (приемных систем). Важным моментом является необходимость экспериментальной оценки направления и скорости движения внутренних волн.

В заключение приведем основные итоги данной работы:

- впервые выявлено широкое распространение короткопериодных ВВ на акватории Белого моря, а также получены их статистические характеристики. За теплые месяцы 2009—2012 гг. зарегистрировано 476 пакетов внутренних волн со средней длиной волны 0.5 км;

- определены районы наиболее частых проявлений субмезомасштабных вихревых структур: Двинский залив и Бассейн, за рассмотренный период детектировано 162 вихря со средним диаметром 5 км;

— проведено моделирование оценки влияния внутренних волн на распространение гидроакустических сигналов показавшее, что на малых расстояниях, когда влияние дна и поверхности можно не учитывать, при расположении середины трассы распространения сигналов под подошвами внутренних волн на приемной антенне регистрируются максимальные значения уровней сигналов; в противном случае — минимальные значения. Размах вариаций уровней сигналов с каждого гидрофона в среднем составляет 5—7 дБ. На больших расстояниях, когда учитывается влияние дна и поверхности, пропадает выраженная регулярность положения максимумов; при этом размах вариаций уровней сигналов достигает 20 дБ;

— отработана методика оценки влияния внутренних волн на распространение гидроакустических импульсов просветным методом. Полученные результаты показывают, что величины изменения уровней дисперсий принятых гидроакустических сигналов для дистанций 150 м составили 6...10 дБ; 280 м — 8...9 дБ; 570 м — 5...9 дБ; 650 м — 10...12 дБ, а их периоды коррелируют с периодами внутренних волн.

*Данная работа была выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-05-04639\_a и гранта РФН («Мировой океан в XXI веке: климат, экосистемы, ресурсы, катастрофы») № 14-50-00095).*

### Литература

1. Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddy Regime, Geophys. Monogr. / Ed. by M. W. Hecht and H. Hasumi. 2008. Vol. 177. P. 17—38, AGU, Washington, D. C. DOI:10.1029/177GM04.
2. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
3. Özgökmen T. M., Poje A. C., Fischer P., Haza A. C. Large eddy simulations of mixed layer instabilities and sampling strategies // Ocean Modelling. 2011. 39. P. 311—331.
4. Лаврова О. Ю., Серебряный А. Н., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 4. С. 308—322.
5. Зацепин А. Г., Островский А. Г., Кременецкий В. В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // ФАО. 2014. Т. 50, № 1. С. 16—29.
6. Зимин А. В., Романенков Д. А., Козлов И. Е., Шапрон Б., Родионов А. А., Атаджанова О. А., Мясоедов А. Г., Коллар Ф. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 41—55.
7. Зимин А. В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология. 2012. Т. 52, № 1. С. 16—25.
8. Зимин А. В. Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение полусуточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 3. С. 293—303.
9. Зимин А. В., Родионов А. А., Жегулин Г. В. Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 3. С. 19—33.
10. Зимин А. В., Романенков Д. А., Родионов А. А., Жегулин Г. В., Родионов М. А. Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей Белого моря в августе 2013 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 1. С. 85—92.
11. Родионов А. А., Романенков Д. А., Зимин А. В., Козлов И. Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 29—41.
12. Зимин А. В. Методика выполнения натурных экспериментов по исследованию короткопериодных внутренних волн в морях Северо-Европейского бассейна. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621214 от 24.09.2013.
13. Зимин А. В., Никитин Д. А., Родионов А. А., Филлин К. Б. Моделирование прохождения узкополосных гидроакустических импульсов через внутренние волны, генерируемые приливными процессами в шельфовом районе Белого моря // Тр. 12 Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История, 2014. С. 202—205.
14. Зимин А. В., Никитин Д. А., Родионов А. А. Моделирование распространения широкополосных гидроакустических импульсов лучевым методом в шельфовом районе Белого моря в разные фазы полусуточного приливного цикла // Тр. 11 Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2012. С. 419—422.

Статья поступила в редакцию 05.10.2015 г.

К статье Родионов А. А. и др. «Комплексные исследования...»

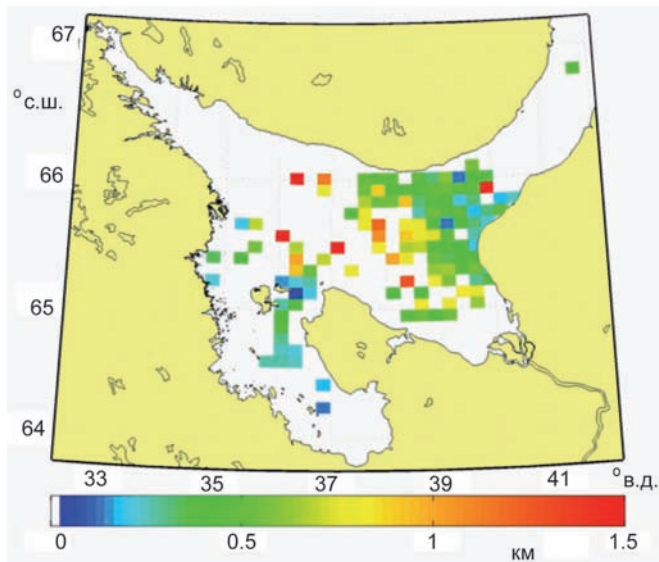


Рис. 1. Распределение максимальных длин волн в пакетах на акватории Белого моря.

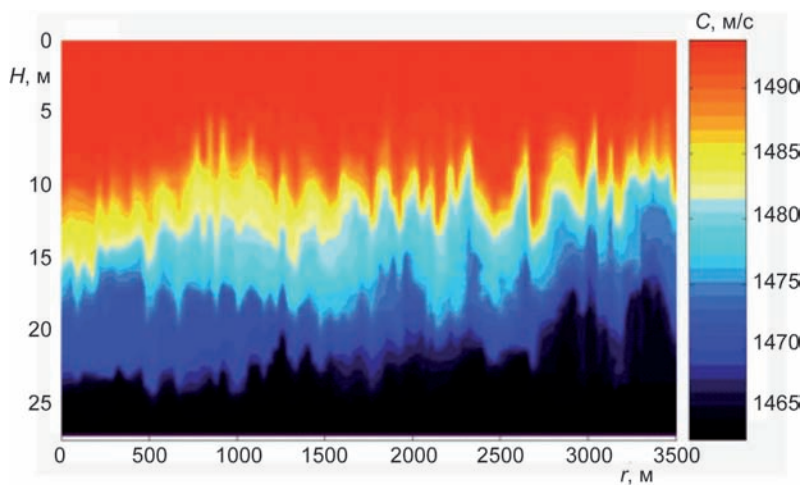


Рис. 3. Двухмерное распределение скорости звука в районе.  
 $H$  — глубина, м;  $C$  — скорость звука, м/с;  
 $r$  — расстояние, м.

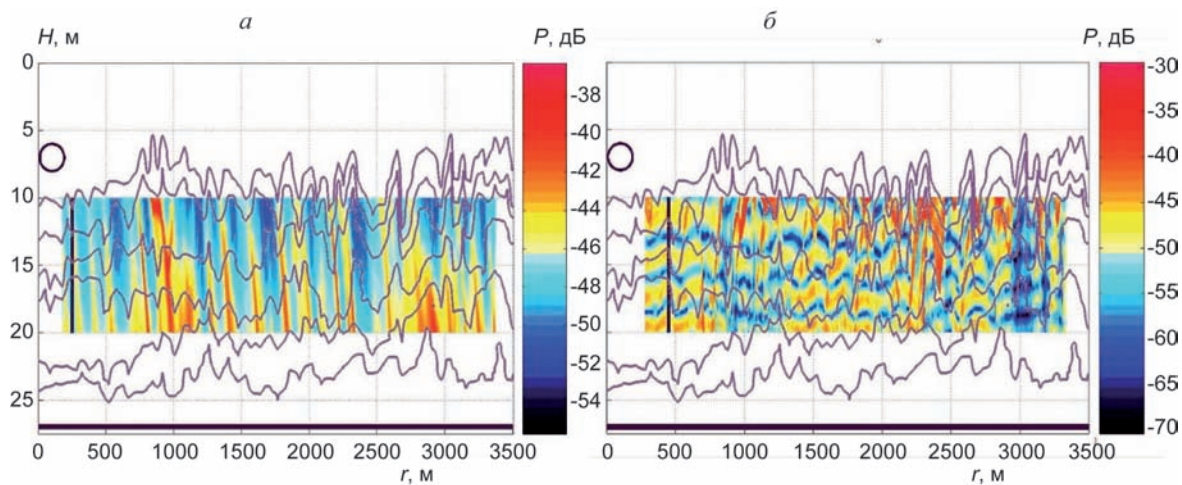


Рис. 5. Уровни сигналов с ближней приемной системы (а) и дальней антенны (б).  
 $H$  — глубина, м;  $P$  — уровень звукового давления, дБ;  $r$  — расстояние, м.



К статье Родионов А. А. и др. «Комплексные исследования...»

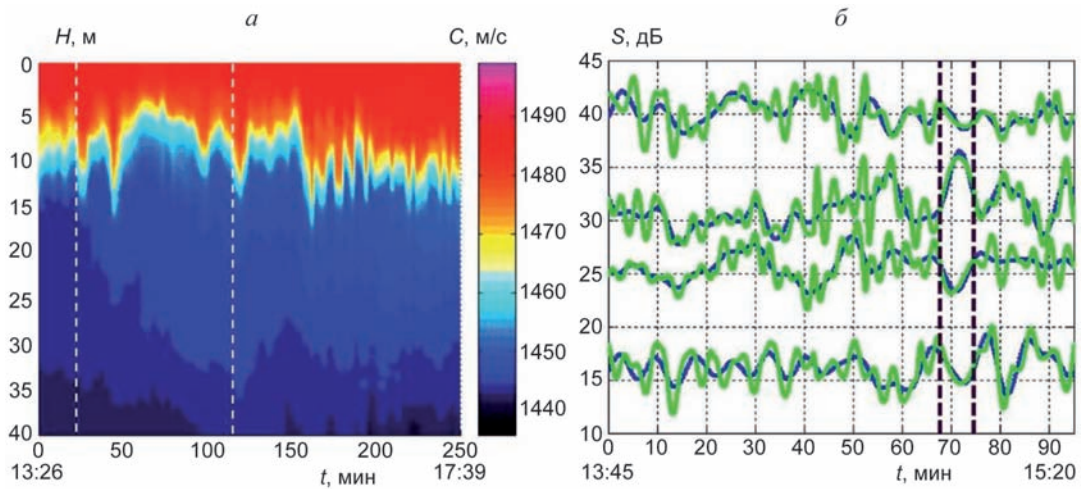


Рис. 6. Динамика вертикального распределения скорости звука (а) и дисперсии гидроакустических сигналов (б) в точке 3.

$H$  — глубина, м;  $C$  — скорость звука, м/с;  $t$  — время, мин;  $S$  — дисперсия сигнала, дБ.

К статье Носов В. Н. и др. «Совместный космический и морской эксперимент...»

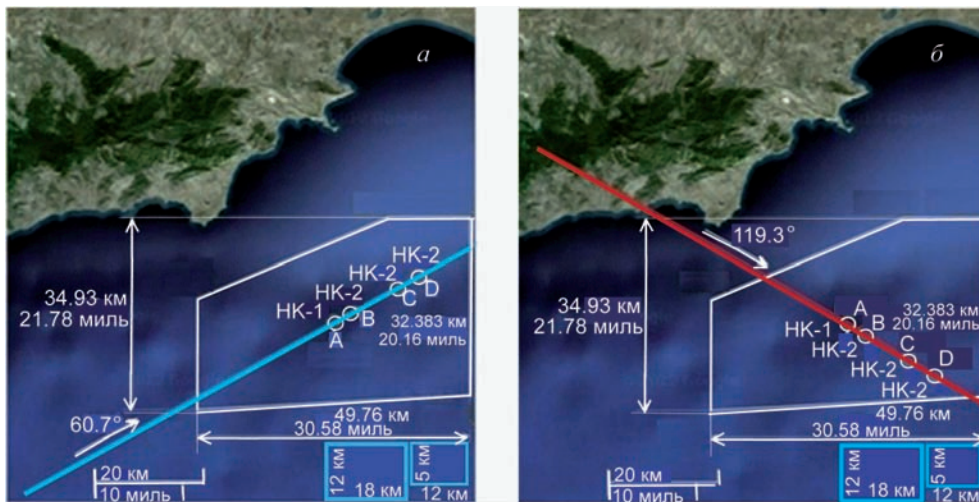


Рис. 1. Восходящая (а) и нисходящая (б) ветви траектории полета МКС.

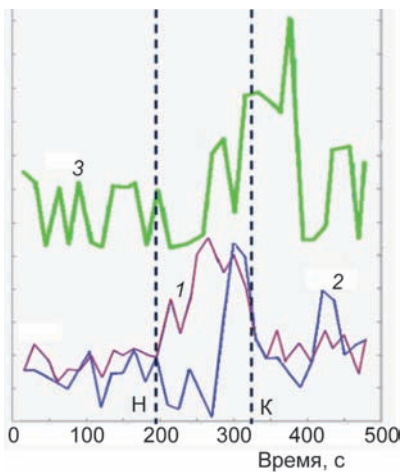


Рис. 8. Результаты обработки сигналов СЛЛ (1), ФЯМ (2) и АЛ (3) при пересечении собственного следа судна-постановщика с возрастом 20 мин.