

УДК 551.465

ИЗМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШЕЛЬФОВЫХ РАЙОНОВ ЧЕРНОГО МОРЯ ПОСТОЯННЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

М. М. ДИВИЗИНЮК

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

Получено 10.12.98 ◊ Пересмотрено 6.08.99

Рассмотрены результаты полигонных съемок скорости звука в шельфовых районах Черного моря в различные климатические сезоны, проанализированы параметры акустических полей с использованием методов лучевой теории, приведены результаты выполненных в море экспериментов по обнаружению различных подводных объектов, расположенных на морском дне. Показано, что постоянные течения в шельфовых районах вызывают образование аномалий скорости звука у дна в виде несимметричных узких волноводов, использование акустических свойств которых позволяет значительно увеличить дальность обнаружения объектов, расположенных на морском дне.

Розглянуто результати полігонних зйомок швидкості звуку в шельфових районах Чорного моря в різні кліматичні сезони, проаналізовано параметри акустичних полів з використанням методів променевої теорії, наведено результати виконаних у морі експериментів по виявленню різноманітних підводних об'єктів, розташованих на морському дні. Показано, що постійні течії у шельфових районах викликають утворення аномалій швидкості звуку біля дна у вигляді несиметричних вузьких хвилепроводів, використання акустичних властивостей яких дозволяє значно збільшити дальність виявлення об'єктів, розташованих на морському дні.

In the article the results of picking up of sound speed in shelf regions of the Black Sea during different climatic seasons are discussed. The parameters of acoustic fields are analyzed using techniques of beam theory. The results of seaborne experiments for detection of different underwater objects located on the sea bottom. It has been shown that the constant streams in shelf regions give rise to sound speed anomalies at the bottom in form of asymmetric narrow waveguides. When using the acoustic properties of mentioned waveguides it is possible to increase significantly the distance of detection of the objects located on the sea bottom.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение температуры, солености, замутненности морской воды вызывает перестройку распределения скорости звука по глубине, что, в свою очередь, сказывается на качестве обнаружения подводных объектов акустическими методами [1, 2]. При этом существенную роль играют морские и океанические течения, обеспечивающие перемещение и перемешивание значительных водных масс с разными физическими характеристиками. Кроме того, многочисленные наблюдения подтверждают, что акустические поля шельфовых и прибрежных районов в различных частях Мирового Океана существенным образом зависят от погодных, сезонных и климатических колебаний [3]. Установление подобных зависимостей невозможно без проведения широкомасштабных экспериментальных исследований.

Для Черного моря основными факторами, обуславливающими циркуляцию его вод, являются ветер, распределение плотности морской воды, речной сток, конфигурация береговой линии и рельеф дна. Схема общей циркуляции поверхностных вод Черного моря, характерная для среднего годового

поля плотности морской воды и ветра, представляет собой единую для всего моря систему постоянных замкнутых круговоротов [4], показанную на рис. 1.

Под влиянием конфигурации берегов и рельефа дна, а также особенностей ветрового поля над морем от основного потока течения отделяется ветвь, которая берет начало в районе мыса Сарыч и, огибая мыс Херсонес, заходит в северо-западную, мелководную часть моря, затем отклоняется на запад и юго-запад и, присоединяя Дунайские воды, сливается с основным течением в районе мыса Калиакра [5]. В шельфовых районах постоянные течения имеют ряд особенностей. Во-первых, по мере уменьшения глубины моря скорость течения заметно ослабевает [6]. Во-вторых, практически весь водный слой от поверхности до дна находится в поступательном движении [7].

Особенности циркуляции вод в придонных слоях шельфовых районов способствуют их значительной температурной стратификации. Кроме того, в ряде случаев имеет место замутнение придонных вод за счет поднятия илистых отложений. Указанные факторы являются основными причинами изменения конфигурации акустических полей

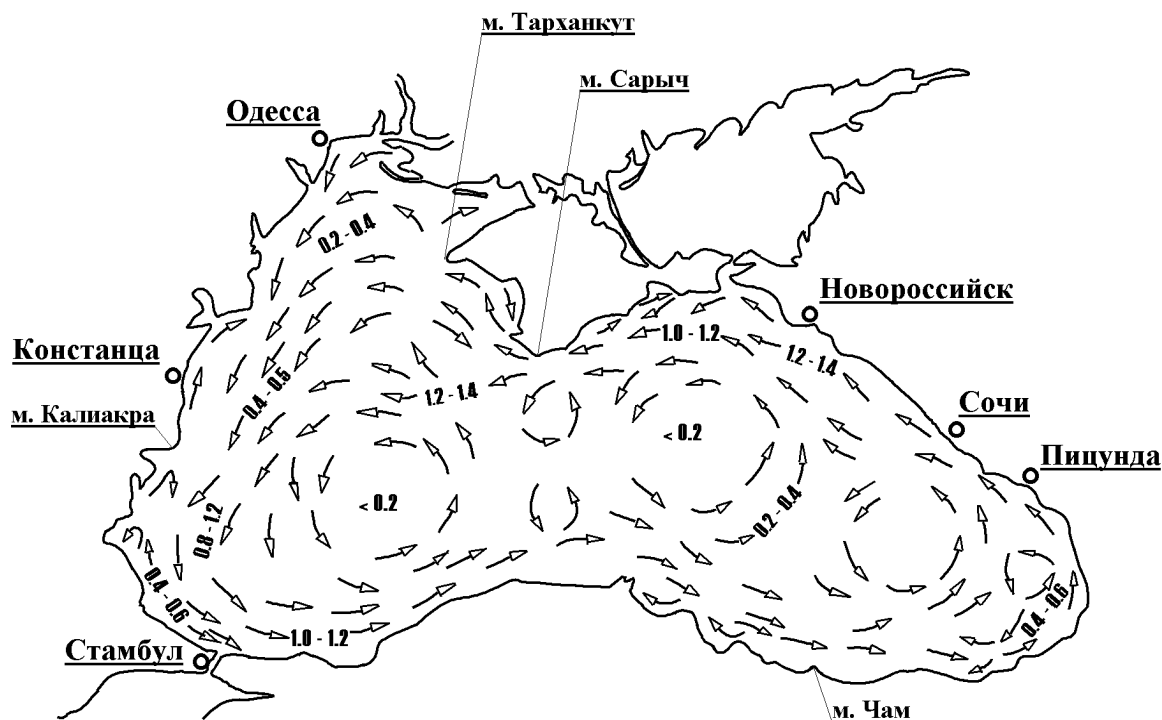


Рис. 1. Схема постоянных поверхностных течений в Черном море (скорость течений дана в узлах)

и появления так называемых придонных аномалий скорости звука, которые должны учитываться при решении задач локации подводных объектов в Черном море.

1. ЦЕЛЬ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная цель данного исследования состояла в определении масштабов придонных аномалий скорости звука, вызванных постоянными течениями, и их влияния на конфигурацию акустических полей и обнаружение подводных объектов. Масштабы придонных аномалий определялись по результатам полигонных съемок, выполненных поисковыми судами в северо-западной и центральной частях Черного моря, а также гидрологических разрезов, проведенных научно-исследовательскими судами в шельфовых районах моря в различные климатические сезоны. Математическое моделирование с использованием методов лучевой теории позволило:

- рассчитать конфигурацию акустических полей при различных глубинах погружения источника звука (акустической антенны) и те-

оретически определить дальность обнаружения подводных объектов;

- на основании расчетных данных спланировать и провести в море эксперименты по обнаружению подводных объектов и сопоставить полученные дальности обнаружения с расчетными.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛИГОННЫХ СЪЕМОК

Как уже отмечалось, движение вод в придонных слоях, с одной стороны, поднимает илистые и другие взвеси с морского дна, а с другой – создает аномалию более низкой температуры в слое шириной 5–15 м. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение скорости звука на 1.5–3.5 м/с и более. По этой причине в придонных слоях шельфовых районов образуются узковолноводные аномальные области. Ширина узких волноводов в них составляет от 5 до 15 м. Узкие волноводы несимметричны. Их нижняя часть касается дна и, как правило, в 2–4 раза меньше верхней.

Отрицательный экстремум скорости звука располагается в 2–5 м от морского дна, а его величина отличается от фона на 0.5–3.5 м/с. Указан-

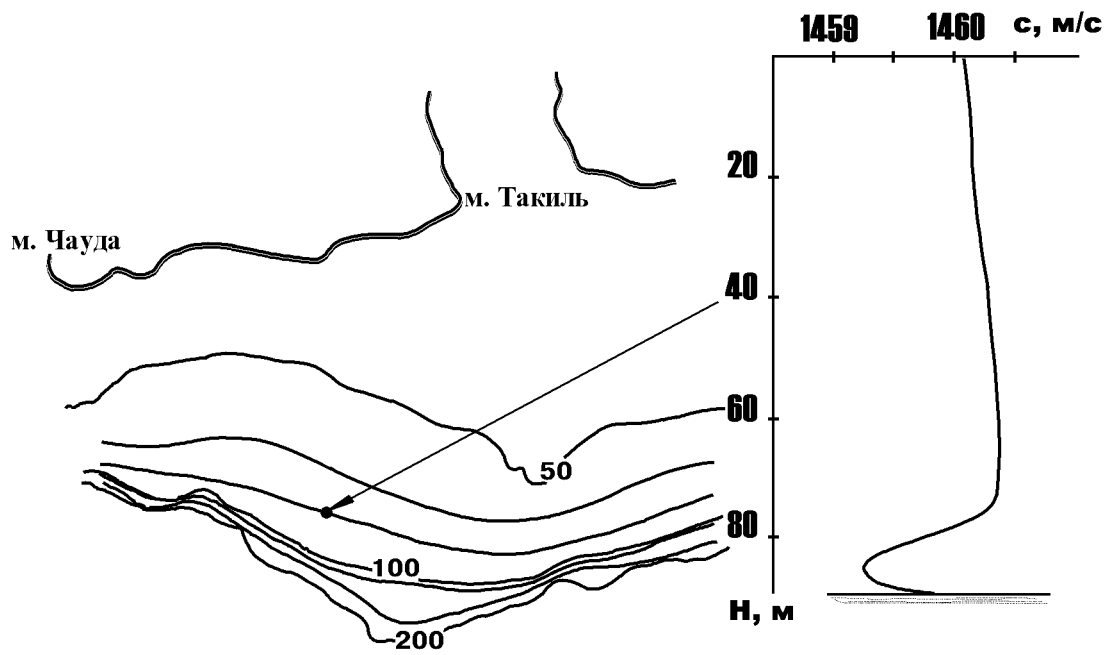


Рис. 2. Придонная узковолноводная аномалия скорости звука

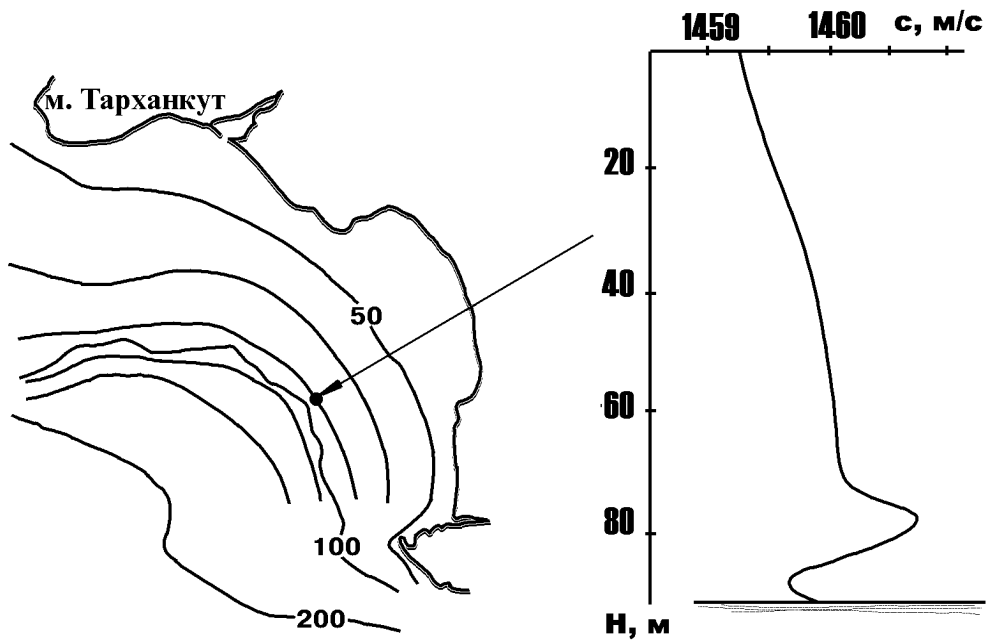


Рис. 3. Придонная антиволноводная аномалия скорости звука

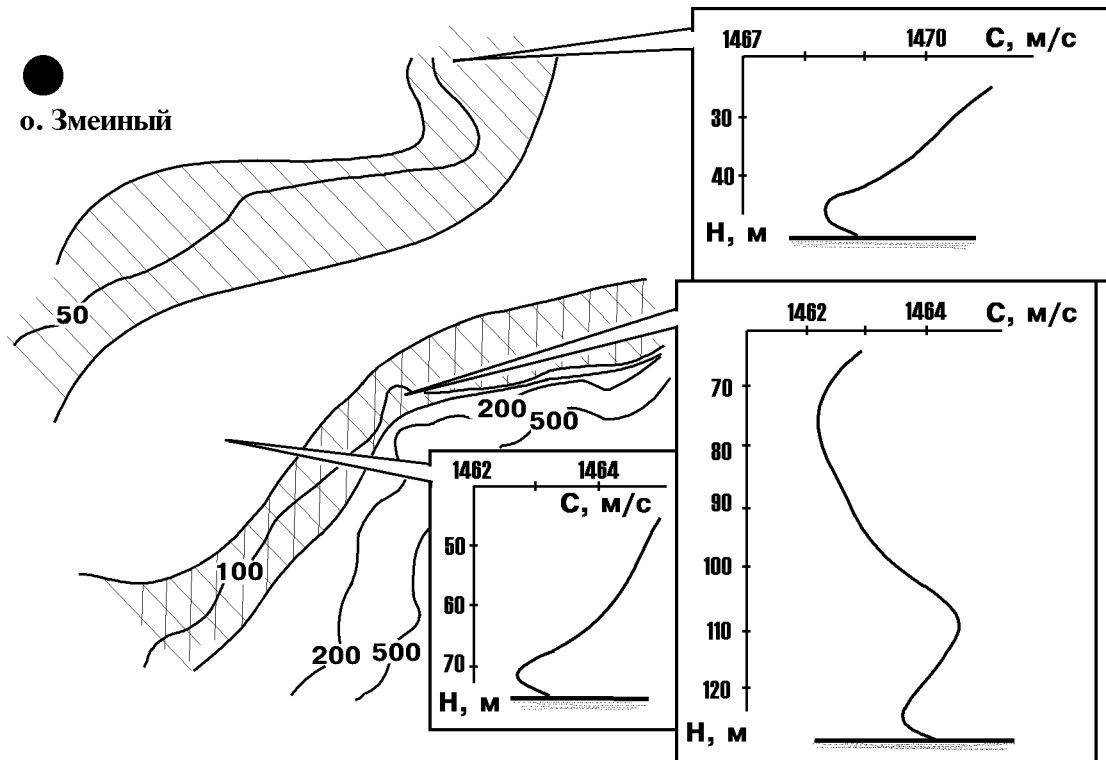


Рис. 4. Придонные аномалии скорости звука у острова Змеиный по результатам полигонной съемки в мае 1986 года

ные узковолноводные аномалии скорости звука достаточно устойчиво регистрируются в районах с глубиной 80–100 м. В районах с глубинами до 120–150 м контрастность узких волноводов с глубиной уменьшается до полного исчезновения. По всей видимости, это происходит вследствие ослабления скорости течения и интенсивности его воздействия на морское дно.

В районах с глубинами менее 80 м аномальные области обнаруживаются только эпизодически, так как интенсивные зимние шторма способствуют перемешиванию всей толщи вод этих районов. Как пример, на рис. 2 представлена придонная аномалия скорости звука по результатам полигонной съемки у Керченского пролива в декабре 1985 года. Эта аномальная область располагалась между изобатами 75 и 120 м. Ее ядро находилось на участке с глубинами 90–105 м, где ширина узкого несимметричного волновода была равна 10–12 м, а экстремум был меньше фона на 1.2–1.7 м/с. На участке 80 м и менее ширина узкого волновода сократилась до 7–8 м, а отличие экстремума от фона скорости звука уменьшилось до 0.3–0.8 м/с. На участках с глубинами 110 м и

более ширина узкого волновода оставалась без изменений, а контрастность уменьшалась в 2–3 раза.

Зимой в районах с преимущественно песчаным дном контрастность несимметричного узкого волновода подчеркивает антиволновод, который располагается в 10–15 м над дном. Его ширина достигает 5–10 м, а экстремум скорости звука на 0.5–1.5 м/с превышает фон. Появление таких антиволноводных областей вызвано инверсией температуры в придонном слое, составляющей 0.1–0.8 °С. Природа температурной инверсии в настоящее время еще не полностью изучена. Возможно, она является результатом особенностей взаимодействия движущихся придонных вод с песчаным дном, скоплением микроорганизмов и других факторов.

На рис. 3 изображено расположение антиволноводной области в Каламитском заливе и южнее мыса Тарханкут по данным полигонной съемки в январе 1984 года. Здесь антиволновод шириной 5–7 м располагается на горизонтах 85–90 м (в 8–12 м от дна). Его экстремум на 0.7–0.8 м/с превышает фон. Ниже антиволновода расположен

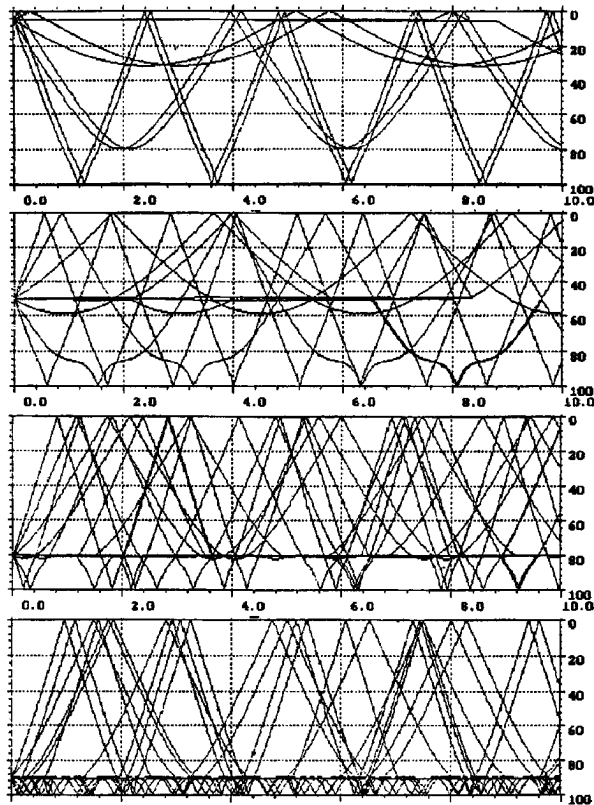


Рис. 5. Акустические поля шельфовых районов Черного моря зимой. Глубина источника (сверху вниз) 5, 50, 80 и 90 м соответственно

несимметричный узкий волновод шириной 5–8 м и с экстремумом на 0.5–0.6 м/с меньше фона скорости звука. При удалении от центра аномалии к периферии контрастность волноводов уменьшается до полного исчезновения.

Весеннее улучшение погоды, выражающееся в сокращении интенсивности штормов, с одной стороны, а также значительная стратификация приповерхностного слоя, с другой, вызывают появление аномалий на гораздо меньших глубинах. В этот период в штилевую погоду придонные аномалии возникают в районах с глубинами 50 м и менее. В шельфовой северо-западной части моря их протяженность с севера на юг может достигать 50–100 км, а с запада на восток – 70–150 км. На рис. 4 представлены границы придонных аномалий по результатам полигонной съемки в районе острова Змеиный в мае 1986 года.

Летом в указанных районах вследствие значительного прогрева приповерхностных слоев и увеличения в них скорости звука до 1490 м/с и выше придонные аномалии остаются различимыми только на участках с глубинами более 70–80 м.

Таким образом, наличие, глубины залегания и характер придонных аномалий скорости звука в шельфовых районах Черного моря демонстрируют существенную зависимость от сезонных изменений температурных и погодных условий.

3. МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ В МОРЕ

На первый взгляд, придонные аномалии скорости звука должны лишь незначительно искажать акустические поля. Однако полное представление о локальных особенностях акустических характеристик шельфового района, связанных с сезонными изменениями, может быть получено лишь при исследовании распространения звукового сигнала во всем диапазоне возможных заглублений источника звука (гидролокатора).

Зимой в шельфовых районах акустические лучи, вышедшие из источника звука, расположенного на пятиметровой глубине, пронизывают восьмидесятиметровый слой воды и концентрируются у поверхности. Морского дна достигают только предельные акустические лучи, вышедшие под углами +5 и –5 градусов к горизонту. Однако, несмотря на то, что зона акустической освещенности охватывает всю толщу вод от дна до поверхности, обнаружение подводных объектов в придонном слое затруднено. Даже большие подводные объекты, лежащие на дне (например, затонувшее судно с радиусом эквивалентной отражающей поверхности более 50 м), неустойчиво обнаруживаются уже на дистанциях 2.5–3.5 км. При заглублении источника на горизонты, равные половине глубины моря, акустические лучи также концентрируются у поверхности, но их распределение по всей толще вод становится более равномерным, в том числе и у дна (рис. 5). Это должно, с одной стороны, способствовать увеличению дальности обнаружения затонувших судов, а с другой – увеличению донной реверберации и, как следствие, к уменьшению дистанции обнаружения. На практике при указанных заглублениях акустических антенн в зимний период затонувшие суда обнаруживаются примерно на одних и тех же расстояниях как опускаемые, так и подкильными гидролокаторами.

Заглубление источника звука на горизонт 80 м (верхнюю границу узкого волновода) приводит к значительному росту реверберационных помех. Измерение интенсивности этих помех и последующие расчеты показали, что при таком расположении источника звука выделение полезного сигнала от подводного объекта на фоне помех не представляется возможным. Однако уже при погру-

жении источника звука на глубину 90 м уровень реверберационных помех понижается в 1.5–3 раза. Здесь акустические лучи канализируются придонным узким волноводом и только часть крайних предельных лучей выходит к поверхности воды. По данным теоретических расчетов в таких условиях дальности обнаружения должны увеличиваться не менее, чем в два раза. Для проверки этих утверждений был спланирован эксперимент, проведенный зимой 1987 года в одном из районов Черного моря, в котором сглаженный профиль приповерхностного звукового канала с постоянным градиентом скорости звука на 0.025 м/с был искажен придонным узким волноводом. Ширина волновода не превышала 20 м, а величина экстремума скорости звука была меньше фона на 1.5 м/с. Наибольший вертикальный размер волновода не превышал 20 м. Научно-исследовательские суда с подкильными и опускаемыми гидролокаторами, энергетический потенциал которых не превышал 45–50 дБ, осуществляли последовательное обнаружение этого объекта при различных положениях гидроакустических антенн. Подкильными гидролокаторами объект обнаруживался на дистанциях 0.9–1.5 км. При погружении акустических антенн дальность обнаружения увеличивалась. Наибольшие дальности обнаружения 3.5–5 км были достигнуты при шестидесятиметровом заглублении антенн. В тех случаях, когда антенны гидролокаторов располагались на горизонте 80 м, интенсивность реверберационных помех возрастала до таких пределов, что обнаружение подводного объекта, лежащего на дне, становилось невозможным. Тем не менее, при погружении антенны на глубину 90 м реверберационные помехи резко уменьшались, и дальность обнаружения подводного объекта возрастала. Теперь он устойчиво обнаруживался на дистанциях 6–8 км.

Конфигурация зимних акустических полей шельфовых районов с песчаным дном от конфигурации полей шельфовых районов с илистым дном отличается незначительно (рис. 6). Иначе обстоит дело с интенсивностью этих полей в придонном слое. Наличие антиволновода в районах с песчаным дном приводит к дополнительным потерям акустической энергии. Поэтому в этих районах интенсивность полей в 1.3–1.7 раза меньше, чем в районах с илистым дном. В то же время, при расположении источника звука ниже антиволновода интенсивность поля возрастает 1.5–1.7 раза. Для проверки расчетных данных был спланирован эксперимент, проведенный зимой в одном из шельфовых районов Черного моря с преимущественно песчаным дном. Здесь сглаженный профиль при-

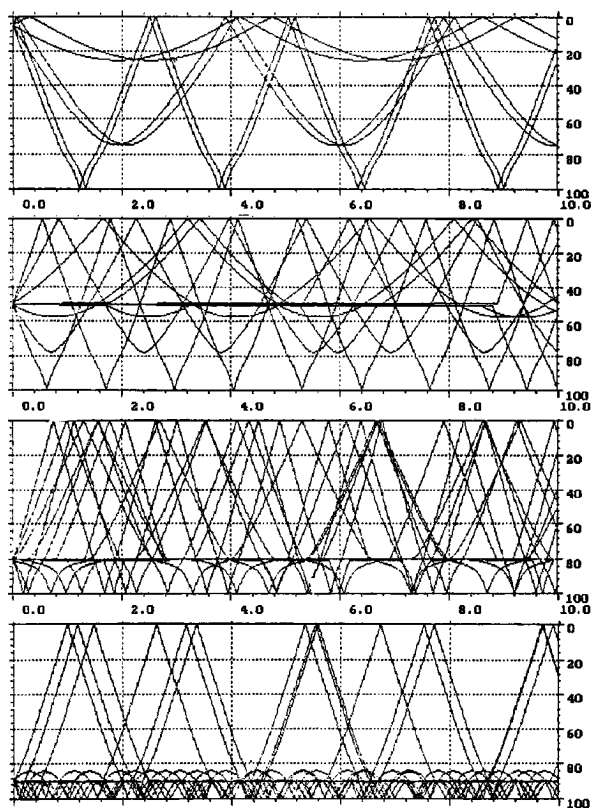


Рис. 6. Акустические поля шельфовых районов Черного моря с преимущественно песчаным дном. Глубина источника (сверху вниз) 5, 50, 80 и 90 м соответственно

поверхностного звукового канала с постоянным градиентом скорости звука 0.026 м/с искажался антиволноводом шириной 10 м, расположенным на глубине 80 м и придонным узким волноводом шириной 15 м. Экстремумы отличались от фона антиволновода на 1.2 м/с, а для узкого волновода – на 1.5 м/с. В ходе эксперимента исследовательские суда осуществляли последовательное обнаружение неподвижно находящегося на морском дне подводного объекта, наибольший вертикальный размер которого не превышал 20 м. Потенциал гидролокаторов, размещавшихся на исследовательских судах, был равен 40–45 дБ. Подкильными гидролокаторами объект обнаруживался на дистанциях 0.8–1.2 км лишь при таком наклоне систем гидролокаторов, когда крайние акустические лучи выходили под углами 0 и 10 градусов к горизонту. При погружении акустических антенн гидроакустический контакт улучшался, а наибольшие дистанции обнаружения с глубиной увеличивались. Их максимальные значения достигали 3.5–4 км при заглублении антенн на горизонты 60–65 м. В тех

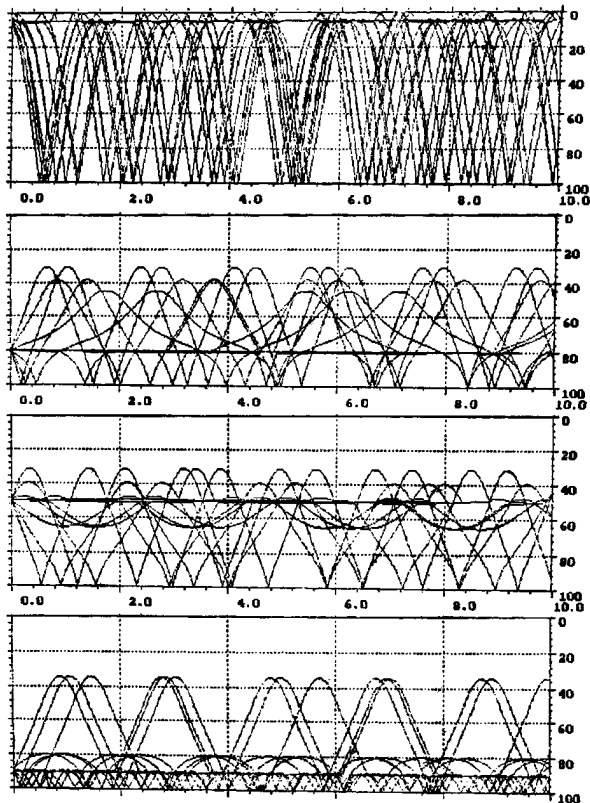


Рис. 7. Акустические поля шельфовых районов Черного моря летом. Глубина источника (сверху вниз) 5, 50, 80 и 90 м соответственно

случаях, когда антенны располагались на глубине, соответствующей местоположению антиволновоеда, интенсивная реверберация не позволяла обнаруживать объект, но при погружении их на горизонт 90 м интенсивность реверберации резко уменьшалась, и подводный объект устойчиво наблюдался на расстояниях 8–12 км.

Летом конфигурация акустических полей определяется параметрами подводного звукового канала в шельфовых районах. Придонный узкий волновод не изменяет форму полей, а только незначительно ухудшает их энергетические характеристики в придонном слое. В случае расположения источника звука в пределах узкого волновоеда акустические поля видоизменяются. Часть акустических лучей концентрируется придонным волноводом, что способствует обнаружению лежащих на грунте подводных объектов на больших дистанциях (рис. 7). Для проверки этих теоретических выводов в летний период был проведен ряд экспери-

ментов. Подводные объекты, вертикальные размеры которых не превышали 20 м, находились на морском дне и обнаруживались подкильными гидролокаторами различной мощности на дистанциях 0.7–1.1 км. Погружение акустических антенн на горизонт оси подводного звукового канала приводило к увеличению дальностей обнаружения до 3.5–4.5 км. Размещение антенн гидролокаторов с энергетическим потенциалом до 45 дБ в пределах узкого волновоеда позволяло обнаруживать неподвижные подводные объекты на морском дне на расстояниях 6–8.5 км.

ВЫВОДЫ

1. Постоянные течения в шельфовых районах вызывают образование аномалий скорости звука у дна в виде несимметричных узких волновоедов. Их ширина достигает 15 м, а перепад скорости звука 3.5 м/с. Они, как правило, располагаются между изобатами 80–150 м и устойчиво регистрируются в течение всего года.
2. Размещение акустической антенны в пределах узкого волновоеда позволяет обнаружить объекты, расположенные на морском дне, на расстояниях в 1.5–3.5 раза больших чем дальности обнаружения, полученные при любом другом заглублении источника звука.

1. Richards S. D. The effect of temperature, pressure, and salinity on sound attenuation in turbid seawater // J. Acoust. Soc. Amer.– 1998, **103**, N 1.– P. 205–211.
2. Дивизиюк М. М. Акустические поля Черного моря.– Севастополь: Госокеанариум, 1998.– 329 с.
3. Badley N., Simmen J., Forsythe S., Xin Tang Recent observations of high-frequency acoustic wave propagation in the Delaware Bay // Proc. 16-th Int. Congr. on Acoust. and 135-th ASA Meeting. 4.– Seattle, USA, 1998.– P. 3041–3042.
4. Атлас поверхностных течений Черного моря.– М.: ГУ навигации и океанографии, 1983.– С. 100.
5. Абрамов А. А., Блатов А. С., Ульянова В. И. Баротропно-бароклинная неустойчивость основного Черноморского потока и вихреобразование в Черном море // Изв. АН СССР. Физ. атмосферы и океана.– 1981.– **17**, N 9.– С. 981–984.
6. Блатов А. С. Гидрологическая структура и энергозапас вихрей основного Черноморского течения // Метеорология и гидрология.– 1981.– N 7.– С. 86–93.
7. Блатов А. С., Иванов В. А. О вихреобразовании в Черном море // Комплексные исследования Черного моря.– Севастополь: Изд. МГИ АН УССР, 1979.– С. 43–51.