

УДК 534.2

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ РЕФРАКЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ШЕЛЬФЕ И В БЕРЕГОВОМ КЛИНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2020 г. И. Б. Есипов^{1, 4, *}, Г. В. Кенигсбергер², О. Е. Попов³,
В. Я. Поддубняк⁴, Г. В. Солдатов⁵, В. И. Михеев²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина”, Москва, Россия

²Институт экологии Академии наук Абхазии, Сухум, Республика Абхазия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы
имени А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Акционерное общество “Акустический институт имени Н.Н. Андреева”, Москва, Россия

⁵Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Южный федеральный университет”, Институт нанотехнологий,
электроники и приборостроения, Таганрог, Россия

*E-mail: igor.esipov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 17.02.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования распространения акустических импульсов на мелководном черноморском шельфе и в береговом клине. Анализируются особенности сигналов, связанные с батиметрической рефракцией. Исследованы короткопериодные флюктуации сигналов в прибрежном клине Черного моря на стационарных трассах при среднем уклоне дна около 25 градусов. Определены спектры и характерные периоды флюктуаций амплитуды, азимутальных углов, углов скольжения и времени приходов импульсных сигналов. Обсуждаются основные причины, вызывающие флюктуации характеристик сигналов в условиях выраженной горизонтальной рефракции при меняющихся батиметрических характеристиках.

DOI: 10.31857/S0367676520060101

ВВЕДЕНИЕ

Морской шельф характеризуется небольшим средним уклоном дна, как правило не более 1°. Однако на некоторых прибрежных участках уклон дна может достигать значительных величин, в единицы и десятки градусов. В акустике океана изучение особенностей распространения звука в относительно мелководных акваториях с наклонным дном, при распространении звука с многократными отражениями от дна, проводят в рамках модели так называемого берегового клина. Возможность горизонтальной рефракции звука в береговом клине стала понятной сразу же после открытия подводного звукового канала и создания теории распространения волн в слоистой среде [1]. Однако систематические исследования этого явления стали актуальными сравнительно недавно в связи с развитием новых методов акустического зондирования берегового шельфа. Без оценки роли горизонтальной рефракции в современной гидроакустике не рассматривается ни од-

на задача акустического зондирования берегового клина. Проблема исследования горизонтальной рефракции акустического излучения при распространении в неоднородном океане относится к классу задач акустического изображения структуры океана, его исследования и мониторинга [2]. Основное внимание исследователей этого явления уделяется шельфовой зоне [3], где существенны приливы и внутренние волны [4, 5]. Изменчивость параметров океанического волновода в горизонтальной плоскости из-за изменчивой батиметрии или скорости распространения звука приводят к горизонтальной рефракции акустических волн. Эти эффекты изучены теоретически и экспериментально как для глубокого океана [6], так и для мелкого моря [7, 8]. Было показано, что существуют многочисленные акустические проявления горизонтальной рефракции в береговом клине. Первые измерения горизонтальных углов прихода в береговом клине были выполнены в [9]. Далее исследовали фокусировку и дефокусировку звукового поля в горизонтальной плоскости

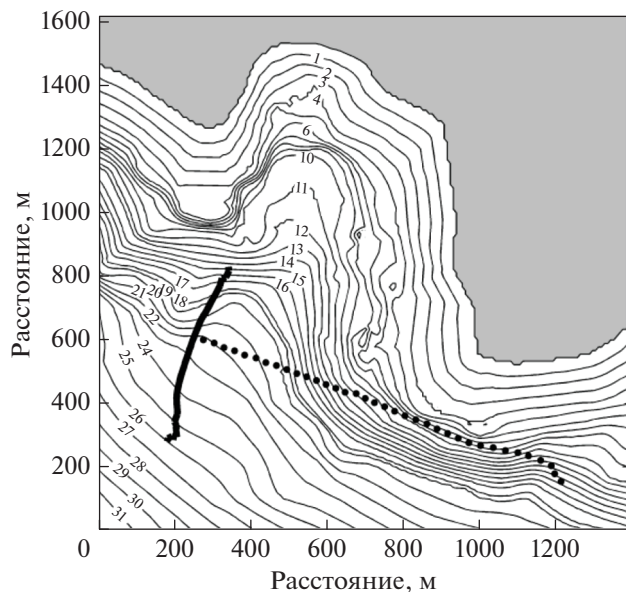


Рис. 1. Батиметрия акватории работ. Жирная линия – положение антенны. Точками показаны места излучения сигналов на одном из галсов.

в присутствии внутренних волн [10]; изменения интерференционной картины в горизонтальной плоскости в береговом клине [11], или в подводном каньоне [12]; многолучевое распространение в горизонтальной плоскости и другие явления. В работах [13, 14] обсуждается также важность горизонтальной рефракции для решения обратных задач. Наши недавние исследования [15] показали возможность сильно выраженной горизонтальной рефракции в береговом клине Черного моря у побережья Абхазии на трассе мыс Сухумский – мыс Кодор. Другими словами, без оценки роли горизонтальной рефракции в современной гидроакустике не рассматривается ни одна задача акустического зондирования берегового клина.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования особенностей регистрации акустических импульсов на шельфе Черного моря, как в мелководном береговом клине в районе г. Геленджик, так и на крутом береговом склоне на акватории морского полигона в районе Сухумского мыса. Анализируются особенности сигналов, связанные с батиметрической рефракцией. Обсуждаются основные причины, вызывающие флуктуации характеристик сигналов в условиях выраженной горизонтальной рефракции.

РЕФРАКЦИЯ ЗВУКА В МЕЛКОВОДНОМ БЕРЕГОВОМ КЛИНЕ

Экспериментальное исследование особенностей регистрации акустических импульсов протяженной донной антенной в мелководном берего-

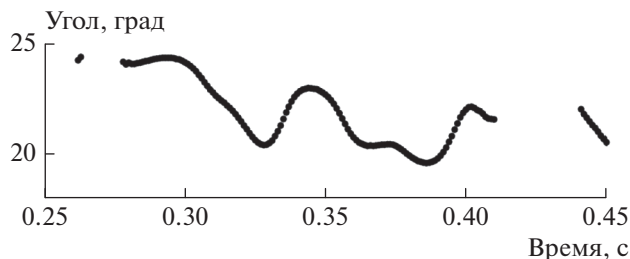


Рис. 2. Изменение угла прихода для пары приемников донной антенны №№ 42, 43.

вом клине на шельфе Черного моря проводился в районе Геленджика на акватории Голубой бухты. Для приема звуковых сигналов использовалась донная антенна в виде цепочки из 50 приемников, установленная примерно поперек изобат (рис. 1). Приемник № 1 находился на глубине около 14, № 25 – 23, № 50 – 26 м. Расстояние между приемниками было фиксированным и составляло 12.5 м. В результате позиционирования приемников антенны по специальной методике, были определены их координаты. Для излучения акустических сигналов использовали пневмопушку, буксируемую на глубине 2.5–3 м галсами параллельно и перпендикулярно антенне. В процессе буксирования пневмопушка излучала короткие акустические импульсы каждые 20 с.

Максимальное удаление источника сигналов от антенны составляло 1037 м. Положение источника во время излучения определяли по GPS. Основная энергия излучения пневмопушки была в диапазоне 10–500 Гц. Профиль скорости звука с минимумом у дна приводил к распространению звука с многочисленными отражениями от дна. Длительность зарегистрированных сигналов на расстоянии более 300–400 м достигала 0.15 с и более (много больше чем у излученного сигнала), что соответствовало многолучевому распространению. Угол прихода волны в горизонтальной плоскости (азимут) определяли по корреляции сигналов, принятых парой соседних приёмников. Для этого с помощью взаимно-корреляционного анализа определяли задержку времени прихода сигнала между парами приемников, затем в рамках модели однородной среды и для малых углов скольжения определяли азимут прихода волны (рис. 2).

На рис. 2 видно, что угол прихода меняется на длительности сигнала на величину около 5° , при расстоянии до излучателя 390 м. Таким образом, отдельные приходы, из которых состоит сигнал, распространяются в горизонтальной плоскости не по прямой линии соединяющей источник звука с приемником, а по дугам разной длины. Немонотонный характер такого изменения связан, по-видимому, с тем, что на угол прихода влияет

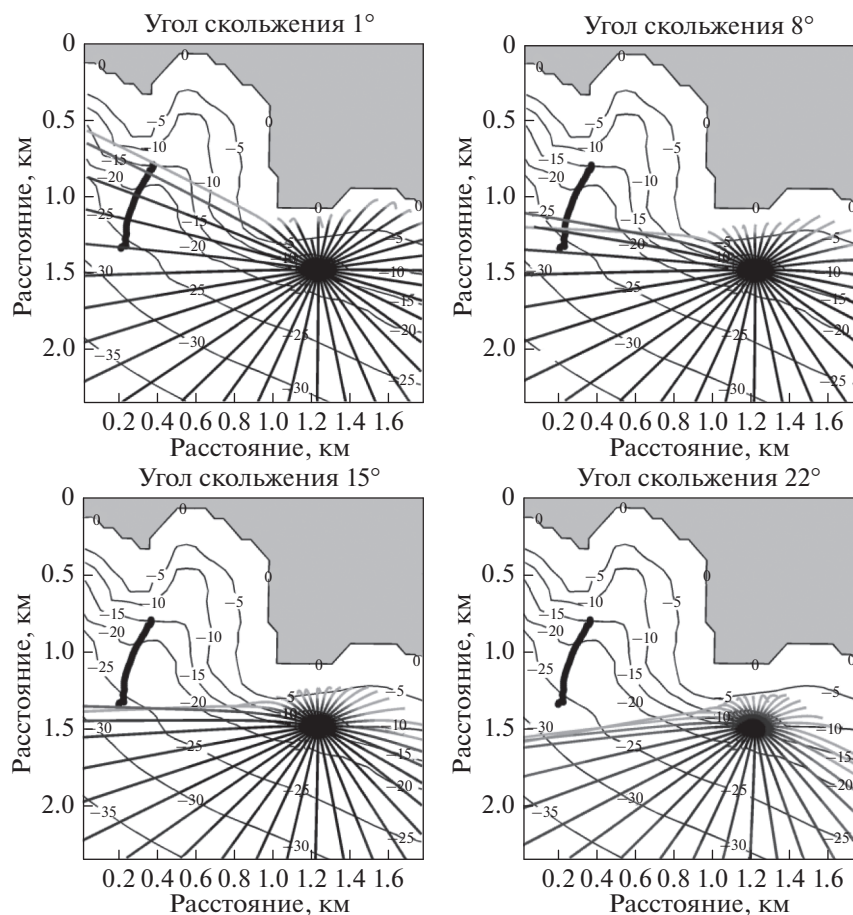


Рис. 3. Проекция лучевых траекторий на горизонтальную плоскость для разных углов скольжения. Переход от черного цвета траекторий к серому соответствует уменьшению интенсивности звука.

не только горизонтальная рефракция, но и изменение угла скольжения, что было невозможно контролировать в нашем эксперименте. Такие особенности распространения акустических сигналов объясняются результатами расчета лучевых траекторий по программе [16] для цифровой модели рельефа и профиля скорости звука, соответствующих условиям эксперимента (рис. 3). Видно, что на расстоянии около 1 км уже при углах скольжения больше 8° , антенна почти не пересекается прямыми лучами от источника, что соответствует очень низким уровням сигналов, наблюдаемым в эксперименте на расстояниях от 500 до 1000 м.

РЕФРАКЦИЯ НА КРУТОМ БЕРЕГОВОМ СКЛОНЕ

В этом случае эксперименты выполнялись на акватории черноморского полигона Института экологии АН Абхазии, прилегающей к мысу Сухумский. Наклон дна при удалении от берега составлял приблизительно 23° – 25° . Приемную систему опускали с океанографической платформы

на металлической штанге на глубину 6 м при глубине места 12.6 м. Приемная система состояла из трех гидрофонов, расположенных в горизонтальной плоскости в сторонах равностороннего треугольника с длиной стороны 1 м. Такая система позволяла определять при известной скорости распространения звука по задержке между приходами сигнала на разные приемники как азимут, так и угол скольжения сигнала. В эксперименте использовали два излучателя (см. рис. 1), которые устанавливали в 0.4 м от дна. Первый излучатель (И1) был расположен на расстоянии 133 м от приемной системы при глубине места около 72 м по азимуту примерно 176° . Второй излучатель (И2) находился на расстоянии 81 м от приемной системы при глубине места около 10 м по азимуту примерно 71° . Основное отличие в расположении излучателей заключалось в том, что прямая, соединяющая И1 и ПР шла практически поперек изобат, тогда как прямая, соединяющая И2 и ПР шла примерно вдоль изобат параллельно берегу. Такое положение излучателей позволяло сравнить основные особенности распространения сигнала

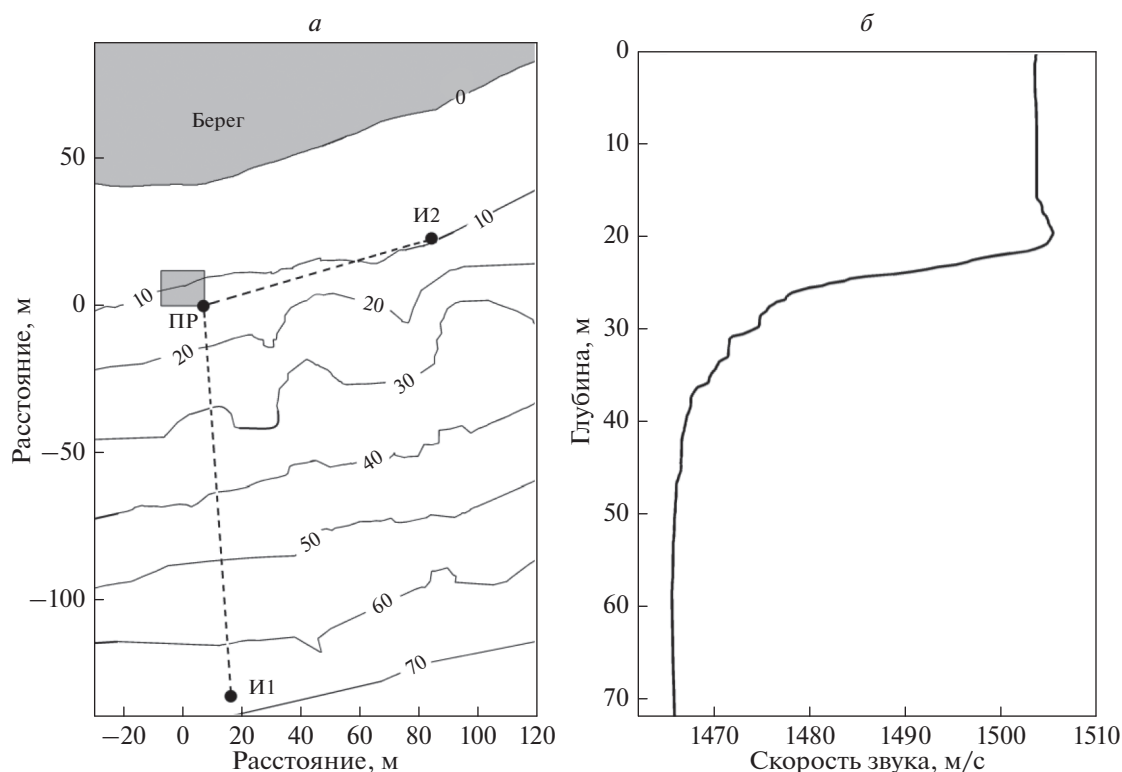


Рис. 4. Батиметрическая карта (а). ПР – трехэлементная приемная система, И1 и И2 – излучатели. Профиль скорости звука (б).

лов в случае сильного и незначительного влияния батиметрической рефракции. Для обоих случаев прямые сигналы, без отражений от дна и поверхности, должны быть сравнительно стабильными по своим параметрам. Сигналы от источника И2 с отражениями от наклонного дна должны быть сильно подвержены батиметрической рефракции, поскольку при такой ориентации акустической трассы при отражении от дна изменяется не только угол скольжения, но и направление распространения в горизонтальной плоскости. Причем, чем больше угол скольжения, тем больше число отражений от дна, и тем больше, как правило, изменение направления распространения в горизонтальной плоскости. Таким образом, сигналы от источника И2, распространяющиеся с разными углами скольжения, должны приходить в точку приема с различных азимутов. Сигналы от источника И1, распространяющиеся с разными углами скольжения перпендикулярно изобатам с отражениями от наклонного дна должны быть мало подвержены батиметрической рефракции и будут приходить в точку приема примерно с одного азимута близкого к истинному азимуту на источник. На рис. 3б представлен профиль скорости звука.

Излучались линейно частотно модулированные сигналы в полосе 3–8 кГц и длительностью

0.004 с. Ширина максимума функции корреляции излучаемого сигнала равна примерно удвоенному значению обратной величины полосы, т.е. примерно 0.0004 с. С учетом неравномерности частотной характеристики излучателей и влияния среды распространения можно было ожидать некоторого расширения корреляционного максимума, но отдельные приходы сигнала с интервалом более 0.001 с должны были разрешаться. Для повышения временного разрешения отдельных приходов при измерении азимутов и углов скольжения, в начале для каждого приемника определяли импульсные характеристики гидроакустического канала путем расчета функции взаимной корреляции принятых сигналов с излученным. Каждая серия измерений состояла из 100 импульсов, следовавших с интервалом 1 с.

На рис. 4 представлено в виде двумерной картины изменение во времени огибающей функции взаимной корреляции принятых сигналов с излученным. Можно отметить, что сигнал от второго излучателя более продолжительный и имеет значительно больше приходов.

На рис. 5 представлены результаты измерения азимутов и углов скольжения для сигналов от источников И1 и И2. Можно отметить, что сигнал от источника И1 состоит из двух приходов (импульсов), с азимутами 176.5° и 178.5° , близкими к

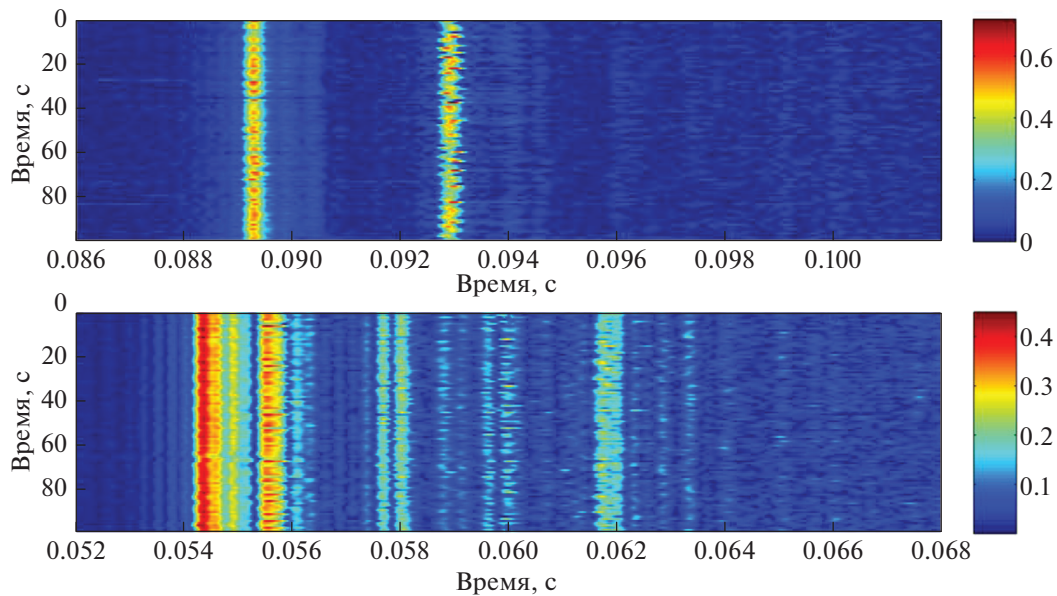


Рис. 5. Изменение во времени огибающей функции взаимной корреляции принятых сигналов с излученным для И1 – вверху и для И2 – внизу. По оси ординат – время излучения, по оси абсцисс время прихода сигнала. Цветные шкалы – величина коэффициента взаимной корреляции.

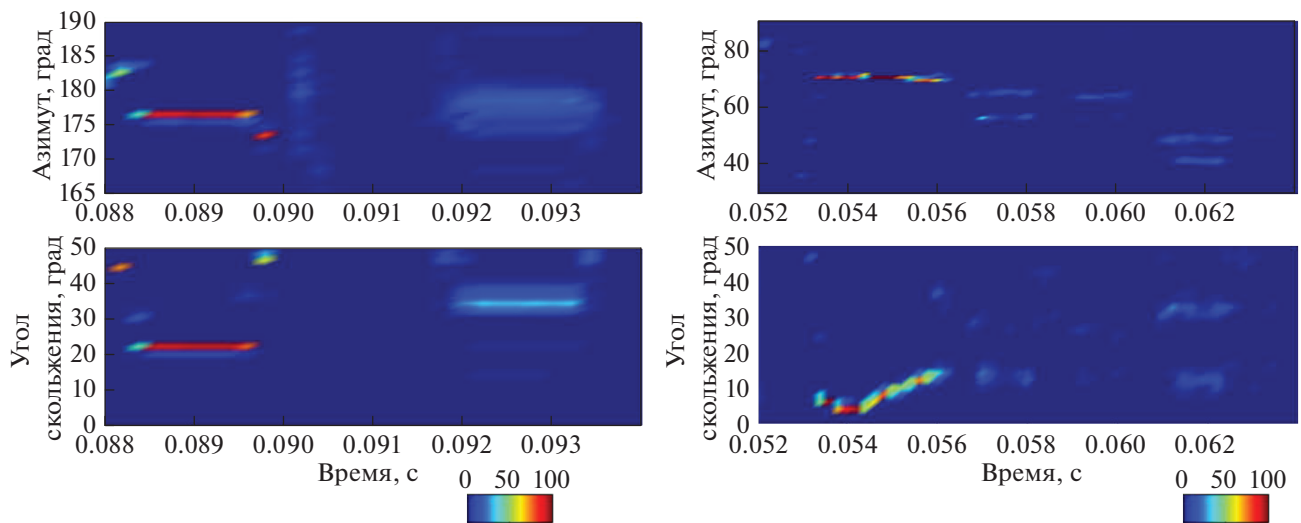


Рис. 6. Результаты измерения азимутов и углов скольжения для сигналов от двух источников: слева для И1, справа для И2. Цветные шкалы – число импульсов из 100 в серии, попавших в интервал 1° по азимуту и 2° по углу скольжения для данного времени сигнала (шаг по времени 0.00001 с).

истинному азимуту на источник И1 и сильно отличающимися углами скольжения 22.5° и 34.5° . А вот сигнал от источника И2 имеет характерный признак батиметрической рефракции: по мере увеличения угла скольжения азимут прихода сигнала сильно уменьшается, т.е. смещается в сторону берега. Уменьшение азимута прихода значительное. Для первого, прямого сигнала, распространяющегося без отражений от дна и поверхности, поскольку до глубины 15 м скорость распространения звука практически постоянна (рис. 1), азимут 70.5° близкий к истинному азимуту на источник И2. Для

последующих приходов азимут последовательно уменьшается до 69.5° , затем до 65.5° – 56.5° , затем до 63.5° – 57.5° и, наконец, до 49.5° – 41.5° . Таким образом, наблюдаемое максимальное отклонение азимута от истинного азимута на источник близко к 29° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблему распространения акустических волн в мелком море в зонах со сложным рельефом дна нужно рассматривать в рамках трехмерной задачи подводного распространения звука. Если морская

поверхность и дно образуют сужающийся клин, то акустические лучи, поднимаясь по такому клину, многократно отражаются от поверхности моря и наклонного дна и, при каждом таком отражении от наклонного дна, луч слегка отклоняется в сторону наибольшего наклона дна. То есть, наблюдая за процессом сверху, можно заметить, что путь луча искривляется, то есть происходит рефракция в горизонтальной плоскости. Этот процесс нами исследовался для двух типичных случаев: как в условиях мелководного шельфа в районе г. Геленджик, так и на крутом береговом склоне в районе мыса Сухумский.

Исследования условиях мелководного шельфа выполнялись с использованием протяженной донной антенны. В этом случае удавалось с высокой точностью определять азимут прихода акустического сигнала. Исследования рефракции на крутом береговом склоне в районе Сухумского мыса выполнялись с помощью трехэлементной приемной системы. При достаточном соотношении “сигнал/шум” эта система при известной скорости звука могла определять, как азимут, так и угол скольжения приходящего сигнала.

Оказалось, что азимут прихода меняется на длительности зарегистрированного антенной сигнала. Таким образом, окончание сигнала формируется лучами, приходящими в результате батиметрической рефракции с другого направления по сравнению с началом сигнала. Сигнал распространяется по дуге от излучателя к приемникам антенны. Такое поведение акустического сигнала соответствует результатам расчета лучевых траекторий для условий эксперимента. В условиях эксперимента на расстоянии источника от антенны около 1 км уже при углах скольжения больше 8° антенна почти не пересекается прямыми лучами от источника. Это соответствует очень низким уровням сигналов, наблюдаемым в эксперименте на расстояниях от 500 до 1000 м.

Связь изменения азимута и угла скольжения акустического сигнала, приходящего на приемную систему, удалось проследить с помощью трехэлементной приемной системы в экспериментах на крутом береговом склоне в районе мыса Сухумский. В этих условиях наблюдаемое отклонение азимута от истинного азимута на источник достигало 29° при увеличении угла скольжения до 30° .

Особо стоит отметить, что для решения практических задач гидроакустики и надежной интерпретации результатов экспериментов в прибрежных акваториях требуется развитие методов и программ вычисления распространения звука в трехмерно неоднородных средах. Это позволит проводить моделирование для сложного рельефа дна и меняющихся полей скорости звука и поля течений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 19-52-40004 и 20-02-00676).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
2. *Wille P.C.* Sound images of the ocean in research and monitoring. Springer. 2005, 470 p.
3. *Benjamin D., Linus R. Chiu Y.S., Chen C.-F.* // J. Comp. Acoust. 2010. V. 18. P. 267.
4. *Katsnel'son B.G., Pereselkov S.A.* // Acoust. Phys. 2000. V. 46. № 6. P. 684.
5. *Shmelev A. Yu., Migulin A.A., Petnikov V.G.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1992. V. 92. P. 1003.
6. *Collins M.D., McDonald B.E., Heaney K.D., Kuperman W.A.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1995. V. 97. P. 1567.
7. *Heaney K.D., Murray J.J.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2009. V. 125. № 3. P. 1394.
8. *Katsnel'son B.G., Badiey M., Lynch J.* // Acoust. Phys. 2007. V. 53. № 3. P. 313.
9. *Doolittle R., Tolstoy A., Buckingham M.J.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 83. № 6. P. 2117.
10. *Badiey M., Katsnel'son B.G., Lynch J.F. et al.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 117. № 2. P. 613.
11. *Deane G.B., Buckingham M.J.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1993. V. 93. P. 1319.
12. *Duda T., Collis J., Lin Y.-T. et al.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2012. V. 131. № 2. P. 1782.
13. *Bender C.M., Ballard M.S., Wilson P.S.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2014. V. 135. № 6. P. 3295.
14. *Ballard M., Lin Y.-T., Lynch J.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2012. V. 131. № 4. P. 2587.
15. *Есипов И.Б., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В., Сузов И.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 10. С. 1340; *Esipov I.B., Popov O.E., Kenigsberger G.V., Sizov I.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. № 10. P. 1209.
16. *Комиссарова Н.Н.* // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 801; *Komissarova N.N.* // Acoust. Phys. 1998. V. 44. № 6. P. 688.