

УДК 534.2

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДЕЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В БЕРЕГОВОМ КЛИНЕ

© 2021 г. И. Б. Есипов^{1, 4, *}, Г. В. Кенигсбергер², О. Е. Попов³, В. Я. Поддубняк⁴, 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, Абхазия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

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

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

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 26.02.2021 г.

Представлены результаты экспериментального исследования горизонтальной рефракции при распространении акустических сигналов в береговом клине. Обнаружено, что в присутствии поверхностного волнения акустический сигнал модулируется по интенсивности и по времени прихода, а при отражении сигналов от дна и морской поверхности возникают дополнительные направления, по которым приходит сигнал от удаленного излучателя. Показано, что при определенных условиях возникает пространственное деление сигнала одного и того же типа прихода.

DOI: 10.31857/S0367676521060090

ВВЕДЕНИЕ

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 одна 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 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 [9]. Далее, были выполнены исследования фокусировки и дефокусировки звукового поля в горизонтальной плоскости в присутствии внутренних волн [10]; изменений интерференционной картины в горизонтальной плоскости в береговом клине [11], или в подводном каньоне [12]; многолучевое распространение в горизонтальной плоскости и другие. В работах [13, 14], обсуждается, также, важность горизонтальной рефракции для решения обратных задач. Наши исследования [15] показали возможность сильно выраженной горизонтальной рефракции в береговом клине Черного моря у побережья Абхазии на трассе мыс Сухумский — мыс Кодор.

В неоднородной среде возникает возможность ветвления распространяющегося направленного излучения. Это явление было экспериментально

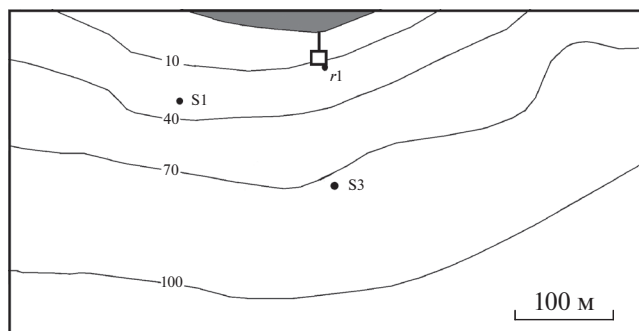


Рис. 1. Батиметрическая карта акватории работ. S1, S3 — источники акустических сигналов, r1 — приемная система.

продемонстрировано с помощью лазерного излучения. Моделирование указывает на то, что в акустике океана такое явление вполне возможно [16]. Ветвление излучения — это одно из проявлений горизонтальной рефракции возникающей при прохождении волны через горизонтальную неоднородную структуру. Другими словами, без оценки роли горизонтальной рефракции в современной акустике океана не рассматривается ни одна задача акустического зондирования берегового клина.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования особенностей распространения акустического сигнала на береговом склоне в присутствии регулярного волнения (зыби). Показано, что при отражении сигнала от взволнованной поверхности возникает пространственное деление сигнала одного и того же типа.

МОДУЛЯЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ РЕФРАКЦИИ НА БЕРЕГОВОМ СКЛОНЕ

Экспериментальные исследования выполнялись на акватории черноморского полигона Института экологии АН Абхазии, прилегающей к мысу Сухумский. Постановка эксперимента была схожа с предыдущей нашей работой на этом полигоне [17]. Наклон дна при удалении от берега составлял приблизительно 23° – 25° . Приемная система состояла из четырех гидрофонов, расположенных в вершинах тетраэдра с длиной стороны 1 м и погружалась вершиной тетраэдра вниз с океанографической платформы на металлической штанге на глубину 5 м при глубине места 12.5 м. Такая система позволяла определять по задержкам между приходами сигнала на разные приемники как азимут, так и, при известной скорости распространения звука, угол скольжения сигнала. В эксперименте использовались два излучателя (рис. 1). Излучатель S3 был размещен прямо на юг (в море) от платформы по азимуту 177.2° на глуби-

не 63 м на горизонтальном расстоянии от приемника около 113.5 м, излучатель S1 на расстоянии 155 м от приемной системы при глубине места около 40 м по азимуту примерно 242° . Излучатели находились в 0.75 м от дна. Основное отличие в расположении излучателей заключалось в том, что прямая, соединяющая излучатель S3 и приемную систему, шла практически поперек изобат, тогда как прямая, соединяющая излучатель S1 и приемную систему, шла под острым углом к изобатам. Такое положение излучателей позволяло сравнить основные особенности распространения сигналов 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 S1 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 S1, распространяющиеся с разными углами скольжения, должны приходить в точку приема с различных азимутов. Сигналы от источника S3, 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. Для контроля гидрофизического состояния полигона измерялся вертикальный профиль скорости звука и течение с помощью акустического доплеровского измерителя профиля течения. Перемешанный слой с практически постоянной скоростью звука достигал глубины приблизительно 25 м. Во время эксперимента было умеренное береговое течение с запада на восток со скоростями от 10 до 50 см/с. При волнении появлялась периодическая вертикальная компонента течения с пространственным периодом зыби величиной от 50 см/с у поверхности моря до 20 см/с на глубине 10 м.

При проведении измерений в течении 300 с периодом 0.2 с излучались 1500 линейно частотно модулированных импульсов длительностью 0.015 с в полосе 3–10 кГц. Ширина максимума функции корреляции излучаемого сигнала равна примерно удвоенному значению обратной величины полосы, т.е. примерно 0.0003 с. С учетом неравномерности частотной характеристики излучателей и влияния среды распространения можно было ожидать некоторого расширения корреляционного макси-

мума. В этих условиях мы определяем точность отдельных приходов сигнала не хуже 0.0005 с. Для повышения временного разрешения отдельных приходов при измерении азимутов и углов скольжения, в начале для каждого приемника определялись импульсные характеристики гидроакустического канала путем расчета функции взаимной корреляции принятых сигналов с излученным.

Выполненное моделирование лучевого пространства для условий эксперимента выявило, что лучевой расчет для трассы от излучателя S3 дает два основных прихода: первый — прямой сигнал без отражений от дна и поверхности и второй — с одним отражением от поверхности. Формально есть еще лучи парные к первым двум лучам, которые отличаются дополнительным отражением от дна рядом с излучателем. Время их распространения очень близко ко времени распространения прямого и, соответственно, отраженного от поверхности. Можно предположить, что отражение от дна, покрытого галькой среднего размера, сильно рассеивает эти сигналы и их амплитуда мала по сравнению с сигналами без отражения от дна.

Исследование особенностей распространения акустического сигнала на этом полигоне проходило как в условиях тихой погоды, так и в условиях волнения (зыбь с периодом волнения 5 с, что соответствует фазовой скорости около 8 м/с и длине волны 40 м). Зыбь шла примерно с ЮЮВ. Волнение приводило к модуляции, как времени распространения сигнала, так и его интенсивности. На рис. 2 показаны усредненные спектры флуктуаций времени распространения для первых двух приходов в условиях волнения. Видно, что сигналы модулированы частотой волнения, но спектр модуляции сигнала, отраженного от поверхности оказывается более широкий. Его высокочастотная часть более чем на 20 дБ превосходит модуляцию прямого сигнала в этом диапазоне, что, по-видимому, связано с присутствием высокочастотных гармоник.

На рис. 3 показан результат статистической обработки приходов сигналов от излучателя S3 в тихую погоду и в условиях волнения. В этом случае сигнал распространяется поперек изобат и не следует ожидать выраженной рефракции. Представлены распределения (гистограммы) приходов для выделенных прямого сигнала и сигнала с отражением от поверхности числа импульсов по азимуту и по углам скольжения с интервалом 0.5°. Если азимут и угол скольжения прихода прямого сигнала довольно стабилен, то в условиях волнения мы видим широкий пространственный спектр (порядка 20°) приходов по азимуту и по углу скольжения для сигнала, отраженного от поверхности.

Волнение приводит к смещению максимума гистограммы для азимута приходов сигнала, от-

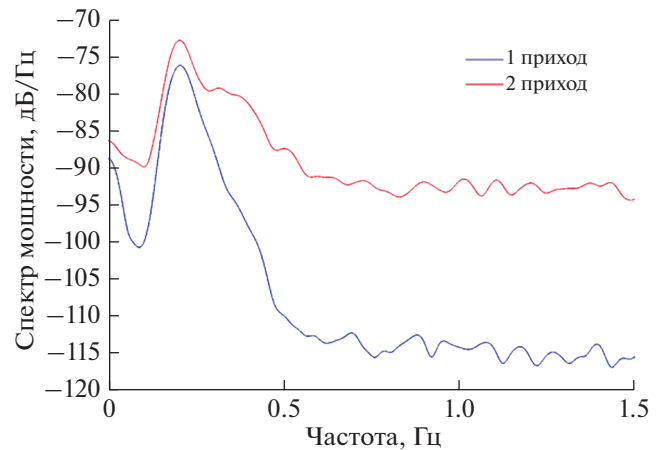


Рис. 2. Спектры флуктуаций времени распространения акустических сигналов для первых двух приходов в условиях волнения: 1 — прямой сигнал, 2 — с отражением от поверхности.

раженного от поверхности, даже при малом волнении. При малом волнении пространственная модуляция приходов сигнала, отраженного от поверхности, становится более регулярной. Боковые составляющие существенно снижаются, но ширина спектра сохраняется, появляются дискретные направления приходов. Конечно, энергия сигнала, отражающаяся в количестве импульсов, пришедших не в основном направлении, при слабом волнении ничтожна. Тем не менее, можно говорить о пространственном делении даже в условиях одного и того же типа сигнала. Такое же заключение можно сделать и в отношении углов скольжения. В пространственном спектре углов скольжения с уменьшением волнения также обозначаются дискретные направления прихода сигнала, один раз отразившегося от морской поверхности.

На рис. 4 представлены гистограммы распределения приходов по азимуту и по углам скольжения для сигналов, распространяющихся под острым углом к линиям изобат при слабом волнении. В этом случае моделирование лучевого распространения показывает четыре устойчивых прихода сигнала: прямой, отраженный от поверхности моря, отраженный от дна и поверхности моря и отраженный от поверхности, дна и снова от поверхности моря. При отражении от наклонного дна возникает батиметрическая рефракция. У третьего и четвертого приходов азимут увеличивается (уходит в сторону берега), а углы скольжения растут.

Важно отметить, что в условиях стабильного прихода прямого сигнала при малом волнении, когда его пространственный спектр азимутальных углов прихода дискретен, пространственный спектр для приходов высоких номеров указывает на про-

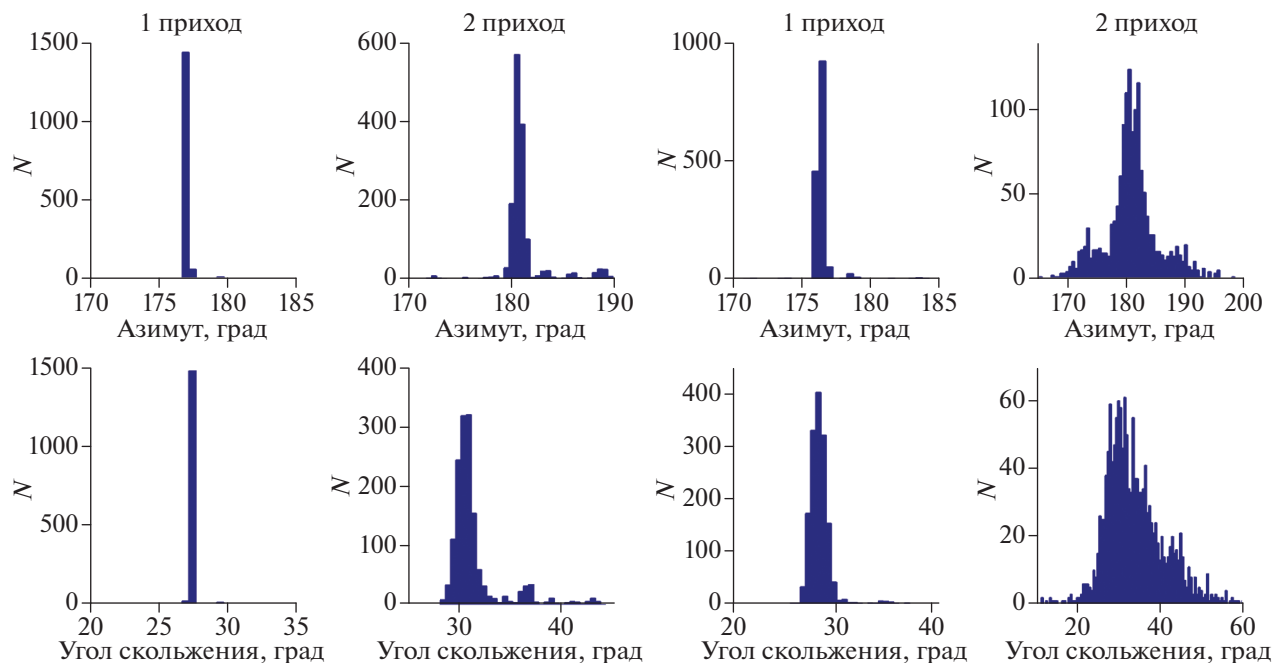


Рис. 3. Гистограммы (шаг 0.5°) первых двух приходов сигналов от излучателя S3 в тихую погоду (левые 4 рисунка) и в условиях волнения (правые 4 рисунка). Верхний ряд — азимутальные распределения числа зарегистрированных импульсов N , нижний ряд — распределения N по углам скольжения. Для прямого сигнала в отсутствии волнения, среднее значение азимута 177.2° , среднеквадратичное отклонение 0.2° , среднее значение угла скольжения 27.4° , среднеквадратичное отклонение 0.2° ; для сигнала с отражением от поверхности (второй приход) в отсутствии волнения, среднее значение азимута 181.2° , среднеквадратичное отклонение 2.2° , среднее значение угла скольжения 31.6° , среднеквадратичное отклонение 2.7° ; для прямого сигнала при волнении, среднее значение азимута 176.5° , среднеквадратичное отклонение 1.6° , среднее значение угла скольжения 28.7° , среднеквадратичное отклонение 1.2° ; для сигнала с отражением от поверхности при волнении, среднее значение азимута 180.9° , среднеквадратичное отклонение 11.7° .

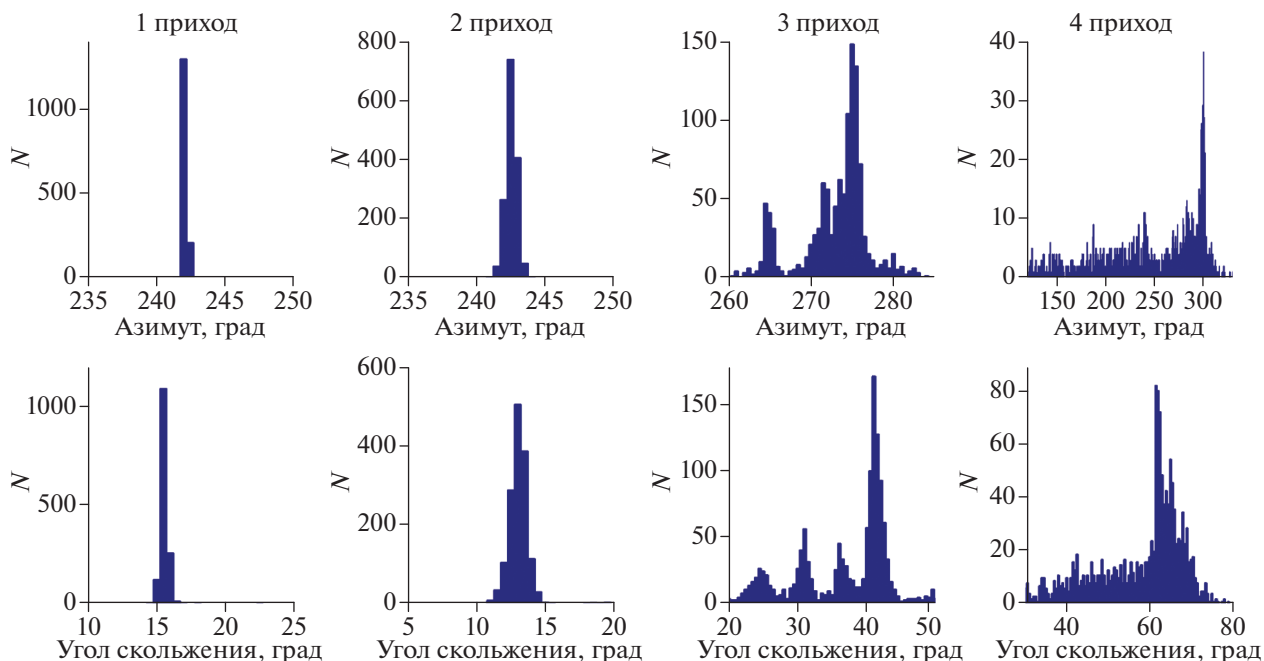


Рис. 4. Гистограммы первых четырех приходов сигналов от излучателя S1 при отсутствии волнения. Верхний ряд — азимутальные распределения N , нижний ряд — распределения N по углам скольжения. Для прямого сигнала среднее значение азимута 242.2° , среднее значение угла скольжения 15.3° ; для сигнала с отражением от поверхности (второй приход) среднее значение азимута 242.6° , среднее значение угла скольжения 13.3° , для сигнала с отражением от дна и поверхности (третий приход) максимум гистограммы достигается при азимуте 275° и угле скольжения 41.5° , для сигнала с отражением от поверхности, дна и поверхности (четвертый приход) максимум гистограммы достигается при азимуте 300.5° и угле скольжения 62.5° .

пространственную модуляцию этих сигналов. Интересно отметить, что пространственный спектр сигнала, отраженного от поверхности (второй приход, без батиметрической рефракции), слегка расширяется на 1–2 градуса. Далее, если третий приход сигнала достаточно слабо модулирован, в его модуляции можно выделить три основных азимутальных направлений этого прихода, то пространственный спектр четвертого прихода оказывается уже сплошным. Пространственный спектр четвертого прихода состоит из нескольких модулированных азимутальных направлений, отличающихся друг от друга приблизительно на 40°. Основная энергия этих сигналов приходит с направлений, отличающихся от прихода прямого сигнала приблизительно на 50° в сторону берега, что и определяет батиметрическую рефракцию.

Подобная картина наблюдается и для углов скольжения. Правда здесь уже второй приход сигнала, отраженного от поверхности, испытывает гармоническую пространственную модуляцию, и мы можем говорить о пространственном делении сигнала этого типа. Спектр углов скольжения для четвертого прихода сигнала, дважды отраженного от поверхности, уже оказывается сплошным и занимает сектор более 70°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты исследования особенностей распространения акустического сигнала в береговом клине. Исследование проходило как в условиях тихой погоды, так и в условиях регулярного поверхностного волнения. Волнение приводило к модуляции, как времени распространения сигнала, так и его интенсивности. Оказалось, что спектр модуляции сигнала, отраженного от поверхности, оказывается более широкий, чем спектр сигнала, пришедшего прямо на приемную систему. Его высокочастотная часть более чем на 20 дБ превосходит модуляцию прямого сигнала в этом диапазоне, что, по-видимому, связано с нерегулярным характером отражения сигнала от взволнованной поверхности и, соответственно, образованием высокочастотных гармоник в спектре интенсивности модуляции.

С помощью направленной приемной системы определялся азимут и угол скольжения приходов акустического сигнала. Волнение приводит к смещению максимума гистограммы для азимута приходов сигнала, отраженного от поверхности, даже при малом волнении. При малом волнении пространственная модуляция приходов сигнала, отраженного от поверхности, становится более регулярной. Боковые составляющие существенно снижаются, но ширина спектра сохраняется, появляются дискретные направления приходов. Конечно, энергия сигнала, отражающаяся в количестве импульсов, пришедших не в основном направлении, при

слабом волнении ничтожна. Тем не менее, можно говорить о пространственном делении даже в условиях одного и того же типа прихода сигнала. Такое же заключение можно сделать и в отношении углов скольжения. В пространственном спектре углов скольжения с уменьшением волнения также обозначаются дискретные направления прихода сигнала, один раз отразившегося от морской поверхности.

Пространственное деление или разветвление сигнала реализуется в неоднородных средах с пространственным масштабом корреляции, существенно превышающим длину волны ветвящегося сигнала [16]. Регулярное поверхностное волнение в условиях нашего опыта было такой неоднородностью. Интересно отметить, что пространственный спектр сигнала, отраженного от поверхности (второй приход, без батиметрической рефракции), слегка расширяется на 1–2 градуса. Далее, если третий приход сигнала достаточно слабо модулирован, в его модуляции можно выделить три основных азимутальных направлений этого прихода, то пространственный спектр четвертого прихода оказывается уже сплошным. Пространственный спектр четвертого прихода состоит из нескольких модулированных азимутальных направлений, отличающихся друг от друга приблизительно на 40°. То есть пространственное деление или разветвление сигнала оказывается весьма сильным эффектом, проявляющимся в нашем случае в условиях поверхностного волнения. Основная энергия этих сигналов при распространении вдоль батиметрической линии приходит с направлений, отличающихся от прихода прямого сигнала приблизительно на 50° в сторону берега, что и определяет батиметрическую рефракцию.

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. *Reeder D.B., Chiu L.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. No. 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., Heane 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. No. 3. P. 1394.
8. *Katsnel'son B.G., Badiyev M., Lynch J.F.* // Acoust. Phys. 2007. V. 53. No. 3. P. 313.
9. *Doolittle R., Tolstoy A., Buckingham M.J.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 83. No. 6. P. 2117.

10. *Badiey M., Katsnelson B.G., Lynch J.F. et al.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 117. No. 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. No. 2. P. 1782.
13. *Bender C.M., Ballard M.S., Wilson P.S.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2014. V. 135. No. 6. P. 3295.
14. *Ballard M., Lin Y.-T., Lynch J.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2012. V. 131. No. 4. P. 2587.
15. *Есипов И.Б., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В., Сизов 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. No. 10. P. 1209.
16. *Wolfson M.F., Tappet F.D.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2000. V. 107. No. 1. P. 154.
17. *Есипов И.Б., Кенигсбергер Г.В., Попов О.Е. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 6. С. 833; *Esipov I.B., Kenigsberger G.V., Popov O.E. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 6. P. 687.

Spatial split of an acoustic signal in a coastal wedge

I. B. Esipov^{a, d, *}, G. V. Kenigsberger^b, O. E. Popov^c, V. Ya. Poddubnyak^d, V. I. Mikheyev^b

^a*National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow 119991 Russia*

^b*Institute of Ecology, Academy of Sciences of the Republic of Abkhazia, Sukhumi, 384900 Abkhazia*

^c*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^d*Andreyev Acoustics Institute, Moscow, 117036 Russia*

^{*}*e-mail: igor.esipov@mail.ru*

The results of an experimental research of horizontal refraction in the propagation of acoustic signals in a coastal wedge are presented. It is found that in the presence of surface waves, the acoustic signal is modulated in intensity and time of arrival, and when signals are reflected from the bottom and sea surface, additional directions arise along which the signal comes from a remote emitter. It is shown that under certain conditions there is a spatial splitting of the signal of the same type of arrival.