**И.Б. Есипов^{1,2}, Г.В. Кенигсбергер³, О.Е. Попов⁴,
В.Я. Поддубняк², В.И. Михеев³**

**ФЛУКТУАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРО-
СТРАНЕНИИ ЗВУКА В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ С БОЛЬ-
ШИМ УКЛОНОМ ДНА**

¹*Российский государственный университет нефти и газа
им. И.М. Губкина, г. Москва*

²*Акустический институт им. Н.Н. Андреева, г. Москва*

³*Институт Экологии АН Абхазии, г. Сухум*

⁴*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва.*

Представлены результаты морских экспериментов по изучению короткопериодных флуктуаций сигналов в прибрежной акватории Черного моря на стационарных трассах при среднем уклоне дна около 25°. Рассчитаны спектры и определены характерные периоды флуктуаций энергии, азимутальных углов, углов скольжения и времени отдельных приходов импульсных сигналов. Рассмотрены основные причины, вызывающие флуктуации характеристик сигналов в условиях выраженной горизонтальной рефракции.

Ключевые слова: горизонтальная рефракция, флуктуации углов прихода сигналов.

Прибрежные акватории характеризуются сложными условиями распространения звука. В первую очередь, это относится к подводному береговому склону, находящемуся под непрерывным волновым воздействием, проникающем на глубины в несколько десятков метров. В результате микрорельеф берегового склона со временем заметно меняется и его трудно контролировать. В таких условиях могут возникать существенные ошибки в оценках азимутов при пеленговании подводных источников звука. Без оценки роли горизонтальной рефракции в современной гидроакустике не рассматривается ни одна задача акустического зондирования берегового клина [1, 2].

Для экспериментальной практики и при решении некоторых практических задач интерес представляет метод определения углов прихода сигналов в горизонтальной (азимутов) и вертикальной плоскостях (угол скольжения) в рамках модели плоских волновых фронтов, основанный на определении временных задержек приходов сигналов между парами

приемников, расположенными в углах треугольника. Задержки определяются расчетом взаимно корреляционных функции (КФ) между парами принятых сигналов. Этот метод удобен при хорошем отношении сигнал/шум, а также при условии прихода сигнала в каждый момент времени только с одного направления, он позволяет надежно определять азимуты и углы скольжения.

Для изучения возможностей этого метода пеленгования, а также для оценки с его помощью эффектов батиметрической рефракции, летом 2019 г. были выполнены экспериментальные работы в прибрежной акватории у мыса Сухумский в Черном море. Измерялись флюктуации сигналов на стационарных трассах при среднем уклоне дна около 25° .

Приемная система состояла из трех гидрофонов, расположенных в сторонах равностороннего треугольника с длиной стороны 1 м, и устанавливалась с океанографической платформы Института экологии АН Абхазии на металлической штанге на глубину 6 м при глубине места 12.6 м. В эксперименте использовался излучатель, установленный на расстоянии 81 м от приемной системы в 0.4 м от дна при глубине места около 10 м по азимуту примерно 71° . До глубин 15 м был однородный перемешанный слой воды и скорость звука менялась незначительно. Таким образом, распространение прямого сигнала, без отражений от дна и поверхности, шло примерно вдоль изобат, параллельно берегу. Постановка эксперимента детально описана в нашей ранней работе [3], поэтому здесь мы приведем только основные результаты.

Рис. 1. а – азимуты, б – углы скольжения, для а и б – цветная шкала – число импульсов из 100, попавших в интервалы по 10 мкс, в – КФ принятого и излученного сигнала, г – красные точки – расчетные времена приходов без учета влияния батиметрической рефракции. Пары цифр рядом с красными точками – число отражений от поверхности и дна.

Излучались линейно частотно модулированные сигналы в полосе 3–8 кГц и длительностью 0.004 с. Серия измерений состояла из 100 им-

пульсов, следовавших с интервалом 1 с. На рис. 1 представлен результат обработки сигналов одной такой серии. По мере увеличения угла скольжения, увеличивается, по сравнению с расчетным, время максимума КФ, которое обычно отождествляют с временем распространения сигнала, и уменьшается азимут прихода сигнала, т.е. азимут смещается в сторону берега. Уменьшение азимута прихода значительное. Для первого, прямого сигнала, распространяющегося без отражений от дна и поверхности, азимут 70.5° близок к истинному азимуту от источника на приемник. Для последующих приходов азимут по мере увеличения числа отражений от дна последовательно уменьшается до 69.5° , затем ($65.5\text{--}56.5^\circ$), ($63.5\text{--}57.5^\circ$) и наконец ($49.5\text{--}41.5^\circ$). При вычислении азимутов и углов скольжения близких по времени распространения приходов 3–4 и 5–6 получаем двойные линии азимутов и углов скольжения рис. 1. Кроме того, видно, что с увеличением горизонтальной рефракции возрастают флуктуации времени прихода.

В спектре флуктуаций времени распространения 1 и 3 приходов (рис. 2а) хорошо выражен спектральный максимум на частоте 0.148 Гц, соответствующий периоду зыби. Фронт волны зыби был практически параллелен трассе распространения звука. Стоит отметить, что флуктуации времени распространения первого прямого прихода не связаны с отражением от взволнованной поверхности. По-видимому, происходит модуляция пространственного распределения эффективной скорости звука при прохождении зыби. Спектр флуктуаций максимума КФ (рис. 2б) заметно отличается от спектра флуктуаций времени распространения (рис. 2а). Флуктуации максимума амплитуды оказываются более высокочастотны и не так однозначно связаны с прохождением зыби, как флуктуации времени распространения.

Рис. 2. Нормированные спектры флуктуаций 1 и 3 приходов: а – времени распространения, б – максимума КФ.

На рис. 3 в качестве оценки величины флуктуаций показана зависимость коэффициента вариации (отношения среднеквадратичного отклонения к среднему значению в процентах) времени распространения сигнала и собственно максимума КФ в серии из 100 сигналов в течении 100 с.

Рис. 3. Коэффициент вариации для: а – времени распространения, б – максимума КФ.

В целом можно отметить рост коэффициентов вариации с увеличением номера прихода сигнала. Это объясняется увеличением числа отражений от дна и поверхности. Так, скачок почти в 3 раза флуктуаций времени распространения на пятом приходе, скорее всего, связан с увеличением числа отражений от поверхности моря до двух раз (рис. 1г). Стоит отметить, что коэффициент вариации максимума КФ стремится к насыщению. В целом флуктуации азимутов и углов скольжения в присутствии зыби заметно усиливаются. Это можно объяснить усилением эффектов горизонтальной рефракции при поочередном отражении звука от дна и поверхности.

Работа поддержана РФФИ, проекты 19-52-40004 и 20-02-00676.

Литература

1. Collins M.D., McDonald B.E., Heaney K.D., Kuperman W.A. Three-dimensional effects in global acoustics // J. Acoust. Soc. Am. 1995. Vol. 97. P. 1567–1575.
2. Bender C.M., Ballard M.S., Wilson P.S. The effects of environmental variability and spatial sampling on the three-dimensional inversion problem // J. Acoust. Soc. Am. 2014. Vol. 135(6). P. 3295–3304.
3. Есипов И.Б., Кенигсбергер Г.В., Попов О.Е., Поддубняк В.Я., Михеев В.И. Флуктуации акустических сигналов при распространении звука в прибрежном клине. Труды 3-й Всероссийской акустической конференции. СПб 2020.

**I.B. Esipov^{1,2}, G.V. Kenigsberger³, O.E. Popov⁴,
V.Ya. Poddubnyak², V.I. Mikheyev³**

ACOUSTICAL ACOUSTIC SIGNAL FLUCTUATIONS IN SOUND PROPAGATION IN A COASTAL AREA WITH A LARGE BOTTOM SLOPE

¹Russian state university of oil and gas, Moscow

²N. Andreyev Acoustics institute, Moscow

³Institute of Ecology, Sukhum, Abkhazia

⁴Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow

The results of marine research of short-period signal fluctuations in the coastal area of the Black Sea on stationary paths with an average slope of the bottom of about 25° are presented. The spectra were calculated and the characteristic periods of fluctuations of energy, azimuthal angles, slip angles, and time of individual arrivals of pulsed signals were determined. The main reason causing fluctuations in the characteristics of signals under conditions of pronounced horizontal refraction are considered.

Keywords: horizontal refraction, angle fluctuations of sound signals arrivals.

Acknowledgment: The work is supported by RFBR, projects: 19-52-40004 and 20-02-00676.

References

1. Collins M.D., McDonald B.E., Heaney K.D., and Kuperman W.A. Three-dimensional effects in global acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, Vol. 97, pp. 1567–1575.
2. Bender C.M., Ballard M.S., and Wilson P.S. The effects of environmental variability and spatial sampling on the three-dimensional inversion problem. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2014, Vol. 135(6), pp. 3295–3304.
3. Esipov I.B., Kenigsberger G.V., Popov O.E., Poddubnyak V.Ya., and Mikheyev V.I. Acoustical acoustic signal fluctuations in sound propagation in a coastal wage. The Proceedings of the 3-d All Russian acoustical conference, St. Petersburg, 2020.