В.А. Григорьев¹, А.А. Луньков^{2,3}, В.Г. Петников², Д.Д. Сидоров³

**ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ РЕФРАКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ С НЕОДНОРОДНЫМ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СКОРОСТИ ЗВУКА В ДНЕ**

¹Воронежский государственный университет

Россия, 394018 Воронеж, Университетская пл., д.1

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, д.38

Тел.: (499) 503-8777 (доб. 384); E-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

³Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5

С использованием подхода «горизонтальные лучи–вертикальные моды», а также метода модовых параболических уравнений, рассмотрена задача о горизонтальной рефракции нормальных волн (мод) в мелководной акватории постоянной глубины в области, где происходит плавный переход от акустически мягкого дна к жесткому. Показано, что в такой области может наблюдаться не только рефракция, но и фокусировка звука в горизонтальной плоскости. Фокусировка происходит при расположении источника звука примерно в центре переходной области, где фазовые скорости мод достигают своего минимума. Наиболее сильно этот эффект проявляется на низких частотах и для первой волноводной моды.

Ключевые слова: мелководный волновод, неоднородное дно, горизонтальная рефракция

Перераспределение энергии акустических волн в горизонтальной плоскости – горизонтальная рефракция – в мелководных акваториях может быть обусловлена различными факторами: наличием наклона дна, присутствием температурного фронта, движением интенсивных внутренних волн [1]. Во всех этих ситуациях водный слой в той или иной степени является неоднородным (изменение температуры, изменение глубины волновода и т.д.). В то же время представляет интерес изучение горизонтальной рефракции в условиях однородного водного слоя фиксированной толщины, когда меняются только акустические характеристики дна. Отметим, что в мелководных акваториях при примерно постоянной глубине могут наблюдаться достаточно протяженные участки длиной до 10 км, где происходит плавный переход от акусти-

чески мягкого дна (здесь скорость звука в дне c_b меньше, чем скорость звука в воде c ($c_b < c$)), к акустически жесткому (имеет место обратное неравенство) [2]. Ширина таких участков может достигать нескольких километров. Целью настоящей работы является исследование в рамках модельных экспериментов возможности наблюдения горизонтальной рефракции в подобных условиях. Здесь следует упомянуть работу [3], где рассмотрено перераспределение энергии волноводных мод в горизонтальной плоскости, связанное с неоднородностями верхнего слоя донных осадков и наклоном дна. Однако в этой работе рассмотрен случай только жесткого дна, когда горизонтальная рефракция, связанная с неоднородностью дна, практически незаметна.

Схема модельного волновода, выбранного для настоящего исследования, показана на рис. 1 в двух проекциях. Задача решалась в декартовой системе координат (x, y, z) . Предполагалось, что водный слой является однородным и имеет постоянную толщину H . Скорость звука в дне не зависела от глубины и менялась только вдоль оси y , причем область $y < -L/2$ отвечала мягкому дну со скоростью звука c_{b1} , $y > L/2$ – жесткому дну со скоростью c_{b2} , а $-L/2 < y < L/2$ – переходной области. В переходной области скорость звука в дне изменялась по линейному закону $c_b = c_{b1} + (c_{b2} - c_{b1})(y + L/2)/L$. При этом плотность дна ρ_b и коэффициент поглощения в дне β_b выбирались постоянными по всему району. Рассматривалось три точки расположения источника звука: над акустически мягким дном (положение 1 на рис. 1), в центре переходной области (положение 2) и над акустически жестким дном (положение 3).

Рис. 1. Схема модельного волновода.

Анализ горизонтальной рефракции в мелководном волноводе проводился с использованием подхода «горизонтальные лучи – вертикальные моды» [1], а также метода модовых параболических уравнений [1, 4]. Для реализации этих подходов рассчитывались зависимости постоянных распространения $\xi_m(y) = q_m(y) + i\gamma_m(y)/2$ и фазовых скоростей мод $V_{\phi m}(y) = 2\pi f/q_m(y)$ от координаты y , которые затем преобразовывались в

зависимости показателя преломления $n_m(y) = q_m(y)/q_m(y_s) = V_{\text{фм}}(y_s)/V_{\text{фм}}(y)$, y_s – координата источника звука, f – частота излучаемого звука. Параболическое уравнение решалось в параксиальном приближении.

Параметры волновода выбирались близкими к параметрам мелководной акватории в одном из районов Карского моря. Толщина водного слоя составляла $H = 28$ м. Скорость звука в воде предполагалась постоянной $c = 1470$ м/с. Плотность дна принималась равной $\rho_b = 1600$ кг/м³, а коэффициент поглощения – $\beta_b = 0.33$ дБ/λ. Скорость звука в акустически мягком дне и в акустически жестком дне составляла $c_{b1} = 1400$ и $c_{b2} = 1600$ м/с, соответственно. Ширина переходной области $L = 2$ км. Источник звука имел декартовы координаты $(0, -1500, 14)$, $(0, 0, 14)$ или $(0, 1500, 14)$. (Здесь приведены значения в метрах).

Результаты расчета лучевых траекторий для трех положений источника, профиль скорости звука в дне и профиль фазовой скорости первой моды приведены на рис. 2 для частоты 55 Гц. На данной частоте звуковое поле в рассматриваемом волноводе формируется эффективно только одной первой модой – одномодовый режим распространения. Заметим, что, несмотря на линейное изменение скорости звука в дне (рис. 2г), фазовая скорость моды ведет себя немонотонным образом (рис. 2д). Более того, фазовая скорость в переходной области имеет глобальный минимум. Таким образом, если расположить источник вблизи этого минимума, то в горизонтальной плоскости будет наблюдаться захват части лучей в канал, который будет сопровождаться фокусировкой звука (рис. 2б). Угол захвата лучей составляет около $\pm 10^\circ$. Когда же источник находится вне переходной области, может наблюдаться лишь небольшая рефракция в виде слабой дефокусировки звука (рис. 2а и 2в).

Рис. 2. Лучевые картины звукового поля в горизонтальной плоскости при трех положениях излучателя (а-в), зависимость скорости звука в дне (г) и фазовой скорости моды (д) от координаты y . Показаны результаты для первой волноводной моды на частоте 55 Гц.

Рис. 3. Зависимости фазовых скоростей первых трех мод от координаты y (верхний ряд) и соответствующие распределения модальных амплитуд в горизонтальной плоскости. Показаны результаты для частоты 134 Гц.

Обратимся теперь к случаю, когда в волноводе распространяется несколько мод. На рис. 3 приведены зависимости фазовых скоростей для первых трех мод на частоте 134 Гц и соответствующие распределения модальных амплитуд в горизонтальной плоскости, рассчитанные с помощью узкоугольного параболического уравнения. Можно видеть, что глубина минимума фазовой скорости первой моды становится меньше по сравнению с минимумом на рис. 2д, однако фокусировка звука все еще наблюдается и угол захвата составляет $\pm 5^\circ$. (Источник звука здесь помещен в точку минимума фазовой скорости первой моды). Выраженный глобальный минимум фазовой скорости имеется и у второй моды, однако малый контраст скоростей не приводит к заметной горизонтальной рефракции на расстояниях до 10 км от источника. Для третьей моды минимум почти исчезает – рефракция не проявляется.

Таким образом, в работе продемонстрировано, что в мелководной акватории с постоянной глубиной и однородным водным слоем может наблюдаться горизонтальная рефракция акустических волн, обусловленная изменением скорости звука в дне. Этот эффект заметен в области перехода от акустически мягкого к акустически жесткому дну. При расположении низкочастотного источника звука вблизи центра переходной области проявляется фокусировка звука в горизонтальной плоскости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-02-00127.

Литература

1. Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А. Горизонтальная рефракция низкочастотного звукового поля, вызванная солитонами внутренних волн в мелководном волноводе // Акустический журнал. 2000. Т. 46. № 6. С. 779–788.
2. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 3. С. 342–358.
3. Ballard M. S., Lin Y. T., Lynch J. F. Horizontal refraction of propagating sound due to seafloor scours over a range-dependent layered bottom on the New Jersey shelf // The Journal of the Acoustical Society of America. 2012. Vol. 131. No. 4. P. 2587–2598.
4. Trofimov M.Yu., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // Wave Motion. 2015. Vol. 58. P. 42–52.

V.A. Grigor'ev¹, A.A. Lunkov^{2,3}, V.G Petnikov², D.D. Sidorov³

HORIZONTAL REFRACTION OF ACOUSTIC WAVES IN SHALLOW WATER WITH INHOMOGENEOUS SOUND SPEED DISTRIBUTION IN THE SEABED

¹Voronezh State University

1 Universitetskaya Sq., Voronezh, 394018, Russia

²Prokhorov General Physics Institute RAS

38 Vavilov St., Moscow, 119991, Russia

Tel.: (499) 503-8777 (ext. 384); E-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

³Bauman Moscow State Technical University

5 2ndBaumanskaya St., Moscow, 105005, Russia

Using the “horizontal rays and vertical modes” approach, as well as the method of mode parabolic equations, the problem of horizontal refraction of normal modes in shallow water with constant depth in the region where a smooth transition from an acoustically soft bottom to hard one occurs. Numerical simulations show that in this region not only refraction can be observed, but also the sound focusing in the horizontal plane. Focusing occurs when a sound source is located approximately in the center of the transition region, where the phase velocities of the modes reach their minima. The effect is substantial at low frequencies for the first normal mode.

Keywords: shallow-water waveguide, inhomogeneous bottom, horizontal refraction

Acknowledgment: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-02-00127.

References

1. Katsnel'son B.G. and Pereselkov S.A. Low-frequency horizontal acoustic refraction caused by internal wave solitons in a shallow sea. Acoustical physics, 2000, Vol. 46, No. 6, pp. 684–691.
2. Grigor'ev V.A., Petnikov V.G., Roslyakov A.G., and Terekhina Y.E. Sound Propagation in Shallow Water with an Inhomogeneous GAS-Saturated Bottom. Acoustical Physics, 2018, Vol. 64, No. 3, pp. 331–346.
3. Ballard M.S., Lin Y.T., and Lynch J.F. Horizontal refraction of propagating sound due to seafloor scours over a range-dependent layered bottom on the New Jersey shelf. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, Vol. 131, No. 4, pp. 2587–2598.
4. Trofimov M.Yu., Kozitskiy S.B., and Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction. Wave Motion, 2015, Vol. 58, pp. 42–52.