Б.Г. Кацнельсон¹, А.А. Луньков², Э.М. Ужанский³

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОД
В ОБЛАСТИ БЕРЕГОВОГО СКЛОНА В ПРИСУТСТВИИ
ВНУТРЕННИХ ВОЛН КЕЛЬВИНА
(ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ)**

¹*Воронежский государственный университет
Россия, 394006, Воронеж, Университетская пл., 1,
Тел.: 8(473)224-87-48, E-mail: katz@phys.vsu.ru*

²*Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 113000, Москва, ул. Вавилова, 38,
Тел.: +7(499)503-87-34, E-mail: landr2004@mail.ru*

³*University of Haifa, Department of Marine Geosciences
Israel, Haifa, Abba Khoushyave, 199,
E-mail: ernstuzhansky@gmail.com*

В работе рассматривается распространение звукового сигнала в области берегового склона от источника, расположенного в окрестности касания термоклина дном в направлении глубокого моря. Внутренние волны Кельвина (ВБК) вызывают периодические изменения угла наклона термоклина с дном в вертикальной плоскости, что, в свою очередь, инициирует флуктуации звука на приемнике, в частности, вертикальной антенне. В работе анализируются причины и свойства флуктуаций интенсивности, показано, что основной вклад во флуктуации дает взаимодействие мод, также меняющееся во времени. Теоретическое моделирование проводится в рамках параболического уравнения и уравнений взаимодействия мод. Работа поддержана РФФИ 20-05-00119.

Ключевые слова: внутренние волны Кельвина, прибрежный клин, мелкое море

Внутренние волны Кельвина играют важную роль в динамике прилегающих к материковому склону областей океана. Они принадлежат к типу волн в стратифицированной жидкости, захваченных вращением Земли у береговой линии. В простейшем случае для модели двухслойной воды, когда верхний однородный слой определяет поверхность термоклина, как правило, на глубине ~ 20 м, в замкнутом водоеме, например, озере, распространение ВБК происходит против часовой стрелки с максимальной амплитудой вблизи береговой линии.

В «радиальном» сечении волновода колебания термоклина представляют собой периодические изменения угла наклона плоскости термоклина с горизонтальной плоскостью (рис. 1), при этом в условном центре отклонения от положения равновесия малы.

Ранее [1] было показано, что при распространении звука в клине при наличии термоклина имеет место взаимодействие мод в области сближения собственных значений волноводных мод. В области клина, по мере увеличения его глубины, такое сближение происходит последовательно между парами, начиная с нижних мод. Качественно область сближения соответствует переходу моды с меньшим номером из пары из донно-поверхностной в придонную. Взаимодействие мод в этой области аналогично известному явлению в теории рассеяния: неадиабатические переходы при квазипересечении термов [2]. В присутствии ВВК наклон термоклина меняется и, соответственно, меняется взаимодействие, характер взаимодействия мод, что, в свою очередь, приводит к временным флуктуациям звукового поля на приемнике.

Рис. 1. Модель внутренней волны Кельвина в прибрежном клине. Положения термоклина показаны пунктирной и точечной линиями.

В данной работе предлагается анализ звукового поля, распространяющегося вдоль акустической трассы, перпендикулярной береговой линии, от источника, расположенного на глубине 5 м, на расстоянии 1200 м от береговой линии (рис. 1). Положение термоклина в таком волноводе меняется от горизонтального, на глубине 20 м, до составляющего углы с горизонтальной плоскостью 0.24° (одно из крайних положений показано на рис. 1). Уравнения для собственных функций, зависящих от r как от параметра, имеют вид, где глубина меняется линейно с расстоянием $H = H(r)$:

$$\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial z^2} + [k^2(r, z) - q_n^2] \psi_n = 0, \quad \psi_n|_{z=0} = 0, \quad \psi_n|_{z=H-} = \psi_n|_{z=H+},$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi_n}{\partial z} \Big|_{z=H-} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi_n}{\partial z} \Big|_{z=H+}, \quad \int_0^\infty \psi_n \psi_m \frac{\rho}{\rho(z)} dz = \delta_{mn}. \quad (1)$$

На рис. 2 показано поведение собственных значений $q_n(r)$ для двух разных положений термоклина, соответствующих разным фазам ВВК для звукового поля на частоте 600 Гц. Параметры волновода следующие. Угол наклона дна $\beta = 0.5^\circ$, соответственные скорости звука, плотности и затухание в воде и дне: $c_b = 1520$ м с⁻¹ выше термоклина и 1470 м с⁻¹ ниже термоклина, $\rho_b = 1000$ кг м⁻³, $\alpha_b = 0$, $c_d = 1600$ м с⁻¹, $\rho_d = 1700$ кг м⁻³, $\alpha_d = 0.4$ дБ на длину волны.

Рис. 2. Изменение 4-х собственных значений для первых 4-х мод в зависимости от расстояния, а) термоклин параллелен поверхности, б) термоклин под углом из-за ВВК.

Для случая, показанного на рис. 2а, источник находится в верхнем слое, возбуждаются моды, которые можно назвать донно-поверхностными, и по мере распространения сигнала в сторону глубокого моря, моды последовательно превращаются в придонные, при этом имеет место взаимодействие мод и последовательно происходит взаимодействие между первой и второй, далее между второй и третьей и т.д. На рис. 3 показаны результаты расчетов амплитуд первых 4-х мод, определяемых стандартным условием, где $P(r, z)$ поле без учета цилиндрического расхождения:

$$P(r, z) = \sum_n a_n(r) \psi_n(z; r), \quad a_n(r) = \int_0^{H(r)} \frac{P(r, z) \psi_n(z; r)}{\rho(z)} dz. \quad (2)$$

Полное поле в рамках параболического уравнения (ПУ) имеет вид [3]:

$$p(r + \Delta r, z) = \exp\left(ik_0 \Delta r \sqrt{1 + X}\right) p(r, z), \quad (3)$$

$$X = k_0^{-2} \left(\rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 + k_0^2 \right), \quad k = (1 + i\eta\alpha) \frac{\omega}{c}, \quad \eta = (40\pi \log_{10} e)^{-1},$$

где ρ – плотность, α – затухание в дБ на длину волны, ω – циклическая частота, c_0 – типичная фазовая скорость, $k_0 = \omega/c$ – волновое число.

Видно, что при достижении сечения, соответствующего переходу моды из донно-поверхностной в придонную, имеет место взаимодействие мод. В частности, на расстоянии ~ 1200 м амплитуда первой моды резко падает и возрастает амплитуда второй моды, далее, в сечении на расстоянии ~ 1800 м меняется амплитуда второй и третьей моды и т.д. В результате, поле на возможном приемнике на расстоянии 4800 м представляет собой иную, чем на источнике, комбинацию нормальных мод. На рис. 3б показано изменение амплитуд мод при распространении для наклонного положения термоклина, соответствующего отклонению от горизонтального положения (рис. 1). Здесь ситуация практически соответствует адиабатическому изменению поля, и амплитуда мод остается практически неизменной. Таким образом, поле на приемнике (в частности вертикальной антенне) меняется в зависимости от положения термоклина (фазы ВВК) или времени. Данную временную зависимость можно построить, используя аналогичные расчеты для различных моментов времени.

Рис. 3. Модальные амплитуды в зависимости от расстояния от источника, а) термоклин параллелен поверхности, б) термоклин под углом с поверхностью из-за ВВК. Сплошная линия – амплитуды, полученные разложением по модам решения ПУ, пунктир – адиабатика.

Литература

1. Кацнельсон Б.Г., Zhongtao Hu. Звуковое поле в прибрежном клине в области касания термоклина дном // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2018. Т. 82. № 5. С. 1–4.
2. Заславский Г.М., Мейтлис В.П., Филоненко Н.Н. Взаимодействие волн в неоднородных средах. Наука, 1982. 177 с.
3. Collins M.D. User's Guide for RAM.

B.G. Katsnelson¹, A.A. Lunkov², E.M. Uzhansky³

**SOUND PROPAGATION AND INTERACTION OF MODES IN
THE REGION OF THE COASTAL SLOPE IN THE PRESENCE OF
INTERNAL KELVIN WAVES (EXPERIMENT AND THEORY)**

¹Voronezh State University

*Russia, 394006, Voronezh, Universitetskaya sq., 1,
Tel. : 8 (473) 224-87-48, E-mail: katz@phys.vsu.ru*

*²Institute of General Physics, A.M. Prokhorov RAS
Russia, 113000, st. Vavilova, 38,*

Tel. : +7 (499) 503-87-34, E-mail: landr2004@mail.ru

*³University of Haifa, Department of Marine Geosciences
Israel, Haifa, Abba Khoushyave, 199, E-mail: ernstuzhansky@gmail.com*

The paper considers the propagation of a sound signal in the area of the coastal slope from a source located in the vicinity of the thermocline's bottom in the direction of the deep sea. Internal Kelvin waves (IWC) cause periodic changes in the angle of inclination of the thermocline with the bottom in the vertical plane, which, in turn, initiates sound fluctuations at the receiver, in particular, the vertical antenna. The paper analyzes the causes and properties of intensity fluctuations, it is shown that the main contribution to fluctuations is made by the interaction of modes, which also changes with time. Theoretical modeling is carried out within the framework of the parabolic equation and the equations of interaction of modes. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research 20-05-00119.

Keywords: internal Kelvin waves, coastal wedge, shallow sea

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research 20-05-00119.

References

1. Katsnelson B.G. and Zhongtao Hu. Sound field in the coastal wedge in the area of contact of the thermocline with the bottom. *Izv. RAS, Ser. Physical*, 2018, Vol. 82, No. 5, pp. 1–4.
2. Zaslavsky G.M., Meitlis V.P., and Filonenko N.N. Interaction of waves in inhomogeneous media. Moscow: Nauka, 1982, 177 p.
3. Collins M.D. User's Guide for RAM.