О.П. Галкин, Н.К. Абакумова

СТРУКТУРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОТ ПОДВОДНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ В ОКЕАНЕ

*Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева
Россия, 117292, Москва, ул. Шверника, 4,
Тел.: (499)126-9835, E-mail: aba_nin@mail.ru*

Рассмотрены результаты исследования структуры гидроакустического поля, генерируемого при подводном землетрясении, на больших расстояниях от его очага. Проведена оценка возможности использования предложенного гидроакустического метода прогнозирования цунамигенности подводных землетрясений для некоторых районов океана.

Ключевые слова: гидроакустическое поле, океан, подводное землетрясение, цунами

При подводном землетрясении в океане помимо сейсмических волн в земной коре и гравитационных волн на поверхности океана возбуждаются акустические волны в воде [1]. Захват подводным звуковым каналом гидроакустических волн, генерируемых в глубоком океане, и оценка их интенсивности по отдельным лучам на больших расстояниях от очага землетрясения рассматривалась в работе [2].

Захват акустических волн происходит вследствие рассеяния акустических сигналов на взволнованной поверхности океана в районе землетрясения. В работе [2] использована поршневая модель подводного землетрясения. Захваченные акустические волны при дальнем распространении ослабевают из-за геометрического расхождения фронта волны, из-за отражений от взволнованной поверхности океана, из-за затухания звука в воде и из-за ослабления сигналов при донноповерхностных отражениях в мелководной части океанического волновода.

Для условий приповерхностного канала на рис. 1 приведена картина распространения звука от подводного землетрясения в глубоководной части океана (справа) до пространственно развитой приемной антенны (слева), расположенной в мелководной части трассы, из которой видно влияние поверхности и дна на изменение структуры принимаемо-

го сигнала. Максимальная глубина волновода равна 4700 м, глубина приема – 100 м.

Рис. 1.

Акустические волны, рассеянные вблизи очага землетрясения (в пределах вертикального столба воды, основанием которого является площадь S), при распространении в ПЗК будут многократно отражаться и рассеиваться на поверхности океана. На относительно низких частотах коэффициент рассеяния m_s является малой величиной, вследствие чего многократно рассеянные волны дают пренебрежимо малый вклад в акустическое поле на больших расстояниях от очага землетрясения.

Коэффициент рассеяния звука взволнованной поверхностью – $m_s(\mathbf{e}_p, \mathbf{e}_o)$, $\mathbf{e}_i$ и $\mathbf{e}_o$ – единичные векторы, характеризующие направления распространения падающей и рассеянной волн соответственно. Плотность воды и скорость звука в ней – ρ и c , $\beta_s = -\ln \times |V|^2 / D(\chi_0)$ – коэффициент потерь, обусловленный многократными отражениями от взволнованной поверхности океана, $V = V(\chi_0, \omega)$ – коэффициент когерентного отражения $|V(\chi_0)|^2 = 1 - \varepsilon$, где $\varepsilon = 2,23 \times 10^{-5} k^{3/2} v^4 \sin \chi_0$. При $\varepsilon < 1$ коэффициент потерь $\beta_1 = \varepsilon / D(\chi_0)$. β_1 – коэффициент затухания звука в морской воде, $D(\chi_0)$ – длина цикла луча, χ_0 и χ – углы скольжения у поверхности и на глубине приема z , r – горизонтальное расстояние от центра рассеивающего участка до точки приема, v – скорость ветра в м/с.

Многократные отражения, из-за утечки части акустической энергии в рассеянное поле, приводят к экспоненциальному спадаанию интенсивности распространяющейся волны. Приводим формулу (1) спектральной плотности интенсивности акустической волны в точке приема с учетом потерь при рассеянии на взволнованной поверхности океана и отражений от дна. Эта формула допускает оценку интенсивности звука

при любом профиле скорости звука и произвольных характеристиках ветрового волнения, а также подводного грунта при ровной границе вода–грунт.

$$I_s(r, z, \omega) = AFm_s(\chi_0, \omega) |\text{sinc}(\omega\tau/2)|^2 \exp(-\varepsilon N - \beta r) (r_0/r)^2, \quad (1)$$

где введены следующие обозначения:

$$A = \rho c \theta_0^2 \tau S_0; S_0 = r_1^2 / (2r_0^2); N = r/D(\chi_0), \quad (2)$$

N – число отражений от взволнованной поверхности, F – фактор фокусировки, r_1 – радиус возмущенного участка, а $r_0 = 1$ м.

Приведем результаты численных расчетов спектрально-энергетических характеристик акустического поля на больших расстояниях от очага землетрясения. При расчетах использовалась «билинейная» модель подводного звукового канала. Расчеты проводились при глубине приема 100 м и значениях скорости звука на верхней и нижней границах – 1500 и 1520 м соответственно. Глубина оси подводного звукового канала была выбрана равной 1 км. Скорость звука на оси была равна 1461 м/с, $a_1 = 2,6 \times 10^{-5}$ 1/м и $a_2 = 1,1 \times 10^{-5}$ 1/м.

Основная часть расчетов для этих гидрологических условий относится к изучению структуры звукового поля на дистанциях $z \approx 1000$ км и скорости ветра $v = 10$ м/с.

Угловой диапазон захваченных лучей в вертикальной плоскости при объемном рассеянии значительно шире, чем при поверхностном рассеянии. Так, например, при принятых значениях скорости звука c_0 (среднее значение), c_1 (скорость звука на оси канала) и c_n (скорость звука у дна) он составляет для поверхностного рассеяния 9° , в то время как для объемного рассеяния он равен $\pm 16^\circ$, т.е., в 3.3 раза больше, что может существенно сказаться на величине полной интенсивности мощности, захваченной подводным звуковым каналом. Углы скольжения лучей, рассеянных поверхностью и захваченных ПЗК, лежат в диапазоне $0^\circ < \chi_0 \leq 9.3^\circ$ [2].

Для оценки влияния конкретных акустико-океанологических условий (профиль скорости звука $c(z)$, скорость ветра v) и пространственного расположения приемной системы (расстояние r , глубина z) на структуру звукового поля в точке приема, целесообразно провести оценку нормированной интенсивности, которая не зависит от параметров землетрясения:

$$I_s/I_0 = F \sin^2 \chi_0 \times \exp(-0.06 N \sin \chi_0), \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность звукового поля в выбранной точке приема в предположении, что среда безгранична и однородна.

На рис. 2 показано изменение нормированной интенсивности звукового поля при ненаправленном приеме (с учетом всех лучей, приходящих в точку приема) (I_s/I_0) с расстоянием r на глубине приема для дистанций от 985 до 1041 км. Такая глубина приема близка к оптимальной глубине для размещения антенн стационарных береговых гидроакустических станций, предназначенных для приема сигналов от подводных землетрясений.

Детальное рассмотрение характеристик звукового поля показывает, что его структура изменчива также и по глубине. На рис. 3 для примера представлена зависимость нормированной интенсивности от глубины z для $r = 1011$ км. Кроме мало заметного увеличения нормированной интенсивности на горизонте $z = 100$ м, имеется четыре явно выраженных максимума на глубинах $z = 2900, 3500$ и 4000 м.

Высокочастотная часть спектра рассеянных сигналов содержит дополнительную информацию о характеристиках подводного землетрясения. В то же время именно для этого участка спектра потери при распространении оказываются наибольшими.

Рис. 2. Изменение нормированной интенсивности I_s/I_0 звукового поля при ненаправленном приеме с расстоянием r :

Рис. 3. Зависимость нормированной интенсивности I_s/I_0 от глубины z .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-52-40007 от 13.03.2020 г.).

Литература

1. Бреховских Л.М. О цунами и наблюдениях над сверхдальним распространением звука в океане // Бюллетень Совета сейсмологии АН СССР. 1956. № 2.
2. Абакумова Н.К., Галкин О.П., Лысанов Ю.П. Пространственная структура гидроакустического поля от подводного землетрясения на больших расстояниях в океане // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 6. С. 725–729.

O.P. Galkin, N.K. Abakumova

THE STRUCTURE OF THE HYDROACOUSTIC FIELD FROM AN UNDERWATER EARTHQUAKE OVER LONG DISTANCES IN THE OCEAN

*N.N. Andreev Institute of Acoustic of Russian Academy of Sciences
Russia, 117292, Moscow, Shvernica str., 4,
Tel.: +7(495)126-98-35, E-mail: aba_nin@mail.ru*

The results of examination the structure of a hydroacoustic field generated at underwater earthquake, on long distances from its centre were surveyed. The estimation of an opportunity of the methods of forecasting of a tsunami surveyed on the basis of hydroacoustic fields in the same areas ocean.

Keywords: hydroacoustic fields, ocean, underwater earthquake, tsunami

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 19-52-40007, 13.03.2020).

Reference

1. Brekhovskikh L.M. About a tsunami and observations above ultralong diffusion of a sound at ocean. The Report of Advice (council) of seismology AN USSR, 1956, No. 2.
2. Abakumova N.K., Galkin O.P., and Lysanov Yu.P. The Spatial Structure of a hydroacoustic field from distant underwater earthquake in the Ocean. J. Acoustics, 1997, Vol. 43, No. 6. pp. 725–729.