

ВЛИЯНИЕ СИНОПТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ЗВУКА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ

О.Р. ЛАСТОВЕНКО, В.А. ЛИСЮТИН, А.А. ЯРОШЕНКО

*Севастопольский национальный технический университет,
Университетская 33, Севастополь 99053, Крым, Украина*

При выпадении сильного дождя, града, снега, в приповерхностном водном слое образуются аномалии профиля скорости звука узковолнового типа. Рассматривается изменение пространственной структуры акустического поля при трансформации с течением времени узкого приповерхностного волновода, вызванного ливневым дождем.

ВВЕДЕНИЕ

Мелким принято считать море с глубинами от 20 до 200 м, что для частоты 150 Гц составляет от 2 до 20 длин волн. С точки зрения акустики океана, мелкое море характеризуется рядом специфичных особенностей. Прежде всего, акустические волны здесь распространяются в естественном волноводе, снизу ограниченном слоистым поглощающим дном. Водный слой обладает выраженной динамикой по глубине, особенно проявляющейся эпизодически в приповерхностном слое, где воздействие метеорологических факторов приводит к формированию нестационарных приповерхностных аномалий профиля скорости звука (ПСЗ). Воздействие упомянутых факторов в сочетании с разнообразной структурой дна мелкого моря на акустические поля ранее практически не изучалось.

Стратификационные неоднородности, искажающие сглаженный, «фоновый» профиль скорости звука, в конечном итоге можно свести к двум типам: узковолноводные и антиволноводные. Типичным примером может служить «синоптическая» приповерхностная аномалия ПСЗ [1].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Синоптические приповерхностные аномалии ПСЗ в наибольшей степени проявляются в летний период при обильном выпадении на поверхность моря ливневого дождя, града. Совместное воздействие термического и халинного факторов приводит к значительному снижению скорости звука у поверхности – на 18 м/с [1]. Фоновый профиль скорости звука и его изменение с течением времени показаны на рис.1. С течением времени, прослойка охлажденной и распресненной воды заглубляется и через 4 часа после дождя аномалия фонового ПСЗ принимает вид хорошо выраженного локального волновода над основным шельфовым ПЗК, шириной 7 м и осью на глубине $z=10$ м. В дальнейшем локальный узкий волновод заглубляется и трансформируется. Трансформация с течением времени синоптического волновода, вызванного ливневым дождем, непременно сопровождается появлением сопутствующей антиволноводной аномалии шириной 1.5-2 м (через 8 часов), положительный экстремум скорости звука которой отличается от фонового значения на 1.0-1.5 м/с и дальнейшим постепенным переформированием волновода в антиволновод, завершающимся через 14-28 часов после ливня. Синоптический антиволновод через 8-29 часов прекращает существование, сливаясь с фоном [1].

С целью исследования влияния синоптической аномалии на акустическое поле, ПСЗ на рис.1 был «вписан» в шельфовый волновод глубиной $h=90$ м с дном со слоем с гради-

ентом фазовой скорости звука и тангенса угла потерь, лежащем на полупространстве. Толщина градиентного слоя принималась $d=20$ м. Акустические характеристики слоя, предполагающегося состоящим из двух типов неконсолидированных осадочных отложений – ила и песка вычислялись на основе G-S теории М.Д. Buckingham [2, 3], короткое изложение основ которой и расчетные формулы можно найти в [4]. Плотность осадков считалась не зависящей от глубины.

Для расчета акустического поля применялся численный алгоритм, реализующий метод нормальных волн [5], который можно разделить на три этапа: 1) преобразование дифференциальной спектральной задачи в конечно-разностную; 2) построение алгебраической спектральной задачи; 3) нахождение собственных чисел и собственных векторов полученной задачи. Если параметры волновода $\rho(z)$ и $c(z)$ кусочно-непрерывны и дважды непрерывно дифференцируемы, первые l_m собственных векторов алгебраической спектральной задачи, в которых $\text{Re}(\xi_l^2) > \frac{\omega^2}{c_{\max}^2(z)}$ аппроксимируют собственные значения ξ_l и

собственные функции $p_l(z, \xi)$ дифференциальной задачи со вторым порядком точности. Остальные собственные значения соответствуют диссипативным модам и дискретной аппроксимации поля с непрерывным спектром.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

На рис.1 показаны фоновый ПЗК (толстая линия), и ПЗК, соответствующие: непосредственно после дождя; через 4 часа; через 8 часов. Различить эти профили нетрудно, учитывая направление перемещения локального минимума – от поверхности вниз. Фоновый профиль имеет минимум на глубине $z=60$ м, что соответствует Черноморскому «шельфовому» ПЗК термического типа. Разница в скоростях звука у поверхности ($c(z=0)=1495$ м/с) и на оси основного ПЗК ($c(z=60)=1462$ м/с) составляет $\Delta c \approx 33$ м/с. Непосредственно после дождя скорость звука в тонком приповерхностном слое снижается на 25 м/с. Затем, прослойка холодной распресненной воды, мигрируя вниз, формирует локальную миниволноводную аномалию на фоновом профиле $c(z)$. Особенностью миниволновода является: 1) его несимметричность – градиент скорости звука $|\Delta c/\Delta z|$ в направлении поверхности существенно выше, чем в направлении дна; 2) скорость звука в минимуме фонового ПЗК оказывается ниже, чем в минимуме аномалии. Таким образом, с течением времени, миниволноводная аномалия, представляя потенциальную яму для акустической энергии, оказывается все более «открыта» в направлении поглощающего дна. Главным фактором, препятствующим удержанию энергии миниволноводом будет не потенциальный барьер – антиволновод, а меньшая, по сравнению с основным ПЗК глубина потенциальной ямы.

На рис.2 показаны лучевые картины для трех случаев: после дождя, источник на глубине $z_s=5$ м; через 4 часа, $z_s=10$ м, через 8 часов, $z_s=18$ м. Как видно из лучевых картин «после дождя», все лучи испытывают отражения от поверхности, предельный угол скольжения луча, выходящего «вниз» и испытывающего заворот $\chi_c \approx 5.62^\circ$. Предельный угол скольжения «через 4 часа»: вниз $\chi_c \approx 4.89^\circ$, вверх $\chi_c \approx 7.79^\circ$, однако лучи с углами скольжения большими $\chi_c \approx 4.48^\circ$ после одного заворота не удерживаются каналом и «вы-

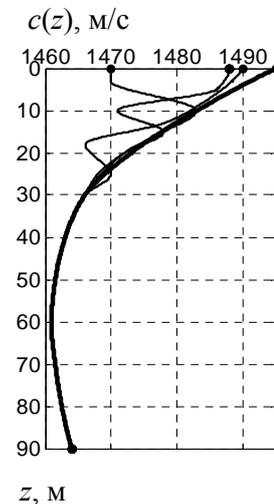


Рис. 1

свечиваются». На лучевой картине «через 8 часов» предельный угол «вниз» $\chi_c \approx 3.59^\circ$, «вверх» $\chi_c \approx 9.17^\circ$, но лучи с углами скольжения большими $\chi_c \approx 3.05^\circ$ после одного заворота «высвечиваются».

На рис. 3 – яркостная картина акустического поля, горизонтальный разрез на глубине источника ($z_s=10$ м), профили первых 5-ти мод, и величины модальных коэффициентов поглощения $8.69 \cdot \text{Im}(\xi_l)$ в зависимости от номера моды. На яркостных картинах и разрезе TL (transmission loss) – ослабление при распространении, вычисленное как $TL=20 \cdot \lg(p(r,z)/p(r=1))$. Пунктирной линией показан уровень поля при некогерентном сложении мод.

Частота 75 Гц, ПСЗ «через 4 часа» после дождя, распространяется 10 мод. Вертикальная структура профилей мод соответствует типичному случаю мелкого моря с почти постоянным ПСЗ, узковолноводная аномалия на этой частоте никакого влияния не оказывает. На горизонтальном разрезе поля наблюдается почти периодическая картина интер-

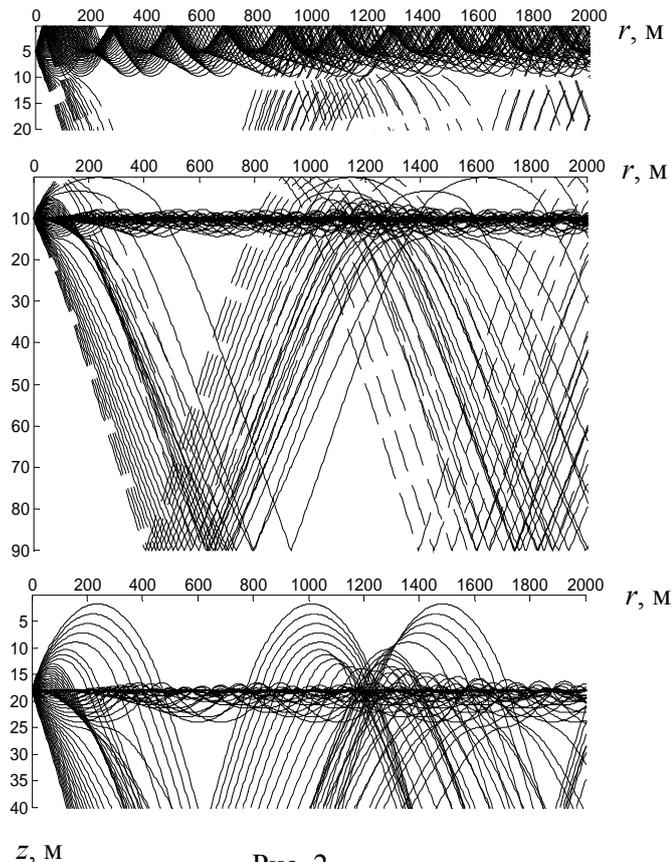


Рис. 2

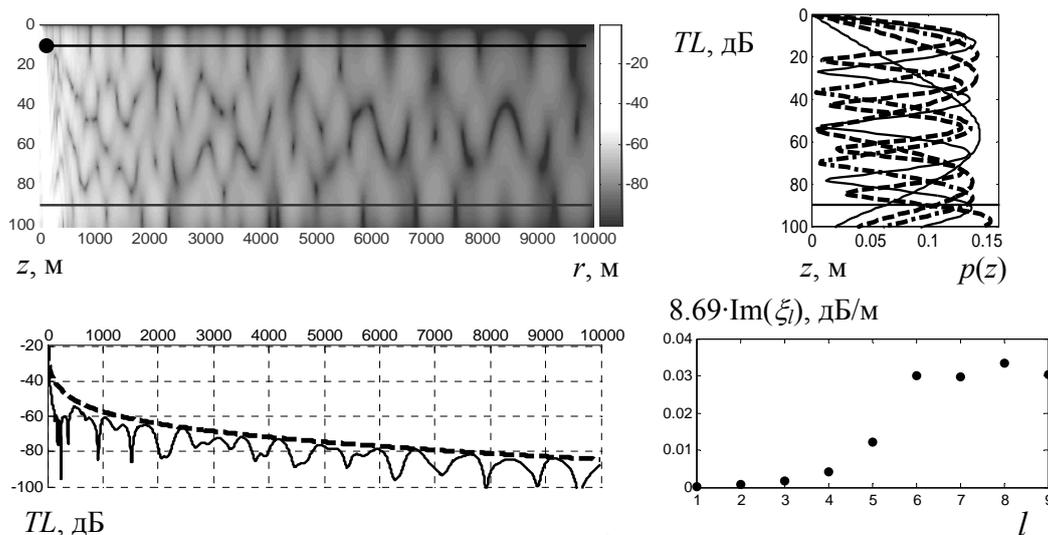


Рис. 3

ференции мод – возрастание уровня на 15-20 дБ в зонах конвергенции лучей.

Однако, модальные коэффициенты поглощения не возрастают монотонно с увеличением номера моды (в случае песчаного грунта коэффициенты поглощения монотонно возрастают, для 7-й моды 0.015 дБ/м, для 8-й моды 0.05 дБ/м). Снижение уровня поля достигает 85 дБ.

На рис.4 те же картины, но для частоты 1000 Гц. Распространяются 120 мод. Профили первых пяти мод (слева) начинают «втягиваться» в область с глобальным минимумом-

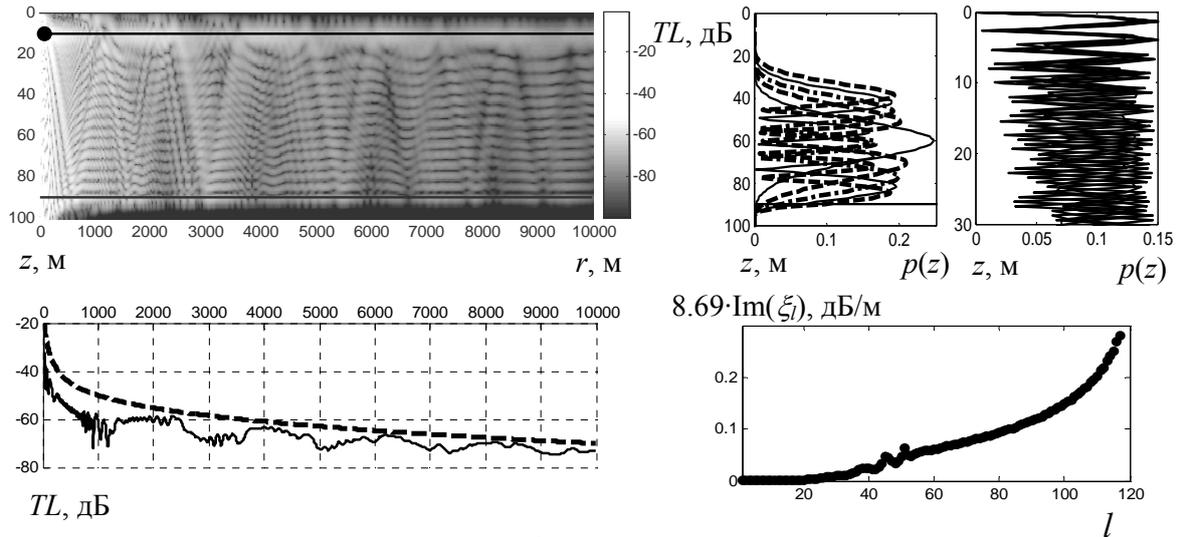


Рис. 4

мом на ПСЗ, а стабильно повышенный уровень давления на оси аномалии формируется за счет сложения высших мод (справа профили 40-й – 45-й мод). Уровень поля на оси аномалии флуктуирует на ≈ 10 дБ за счет «подсветки» в зонах конвергенции. Общее снижение уровня поля на дистанции 10 км становится меньше - 70 дБ.

На рис. 5 – уже сформировавшаяся на частоте 2000 Гц «синоптическая труба».

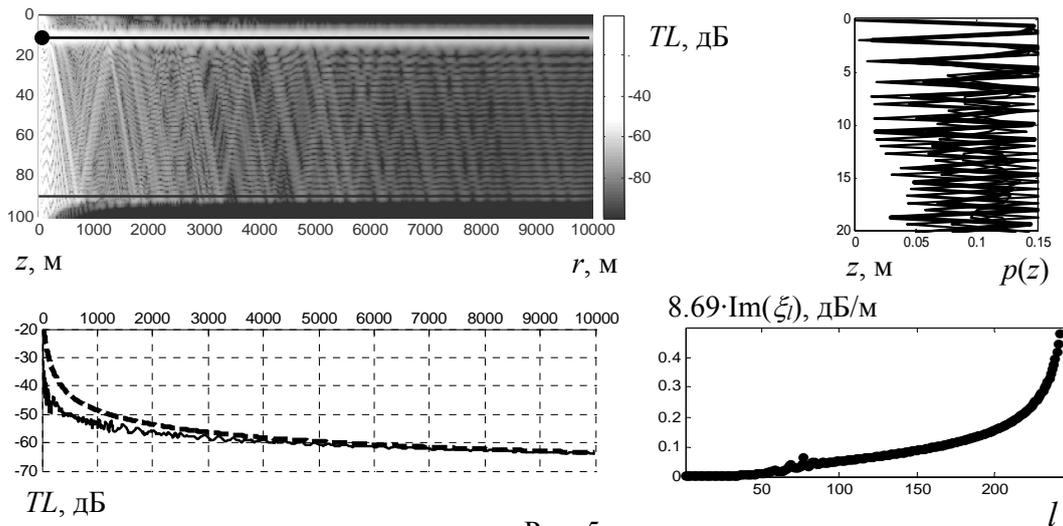


Рис. 5

Распространяется 248 мод, повышенный уровень поля формируется вследствие сложения высших мод с очень плотным спектром горизонтально-волновых чисел, поэтому интер-

ференционная картина вырождается на дистанции ≈ 2 км, и далее уровень поля практически постоянен и соответствует некогерентному сложению мод. Звуковое давление спадает с расстоянием достаточно медленно, основное снижение уровня поля происходит на дистанции ≈ 3 км (56 дБ), на следующих 7 км всего на 8 дБ.

На рис. 6 – картины поля для случая «после дождя», источник на глубине $z_5=5$ м.

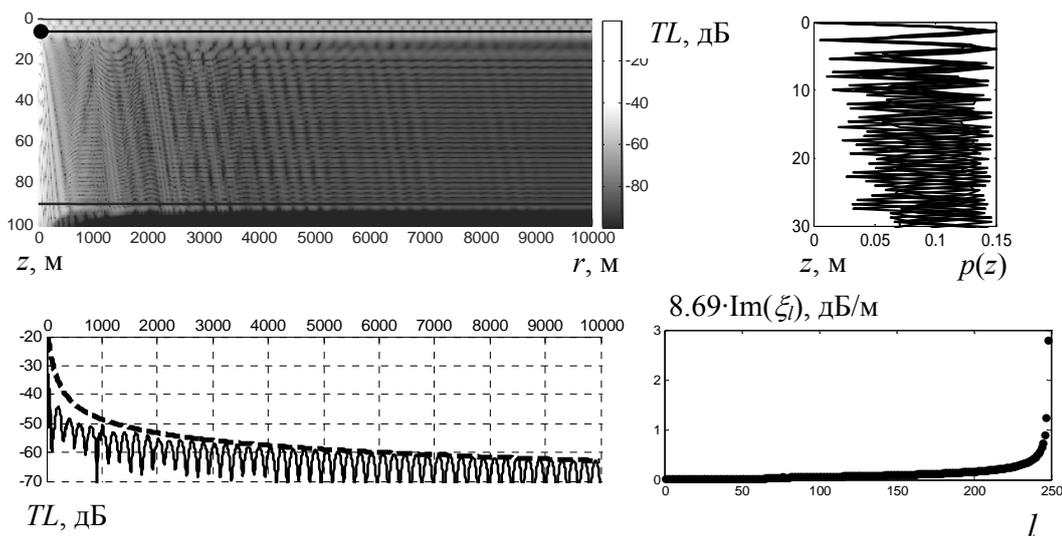


Рис. 6

Заметна строго периодическая интерференционная структура поля с периодом 205 м, что соответствует модам с разностью горизонтальных волновых чисел $\approx 0.0153 \text{ м}^{-1}$.

На рис.7 – ситуация «через 8 часов» после дождя. В расчетах акустических полей в

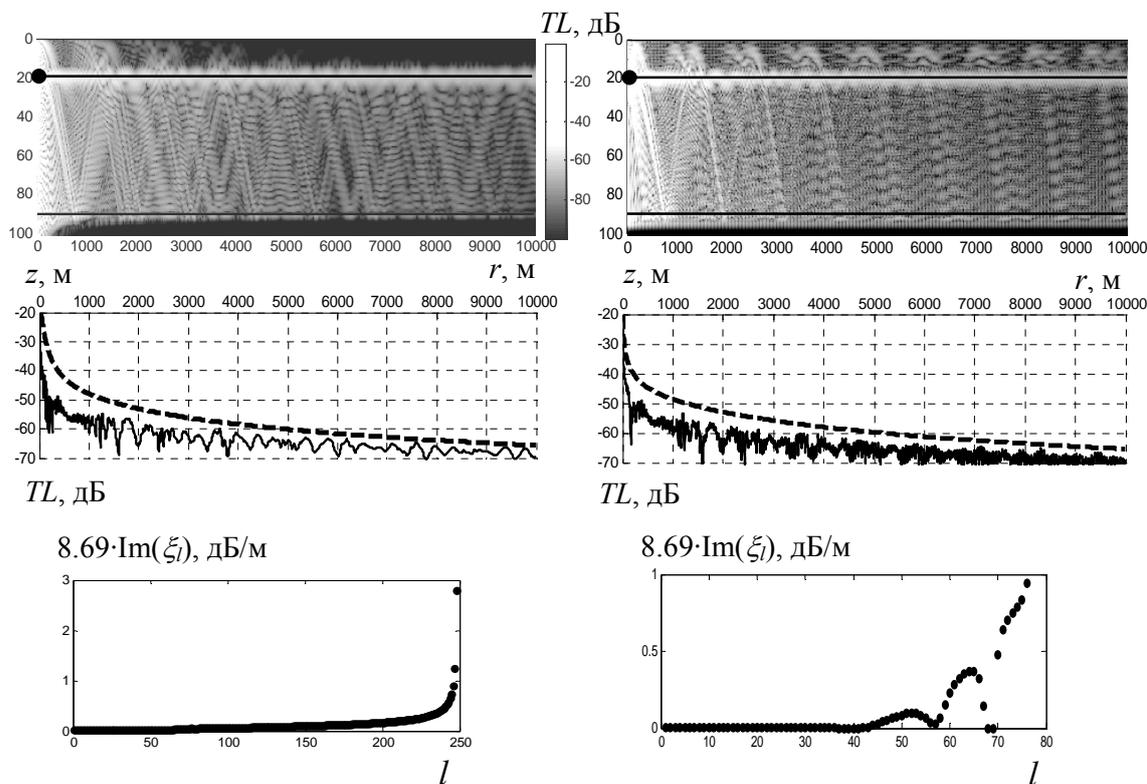


Рис. 7

случае приповерхностных аномалий ПСЗ в мелком море одним из принципиальных вопросов является учет воздействия ветрового волнения на поверхности моря на устойчивость и когерентность звукового поля. На рис.7 слева – полный штиль, справа – поверхностное волнение со среднеквадратичной высотой волн до $\sigma=2$ м. Расчеты выполнены на основе теории отражения от случайно-неровной поверхности Кирхгоффа [5]. Видно, что некогерентный уровень поля на оси аномалии в случае наличия волнения на поверхности и его отсутствия в данном случае (но не в других) сохраняется, однако интерференционная структура поля полностью разрушается, уже начиная с дистанции ≈ 2 км. Контраст «синоптической трубы» вследствие наличия волн снижается на ≈ 10 дБ, число распространяющихся мод снижается до 76, а модальные коэффициенты поглощения возрастают более чем на порядок.

Расчеты акустического поля с учетом ветрового волнения для случая «после дождя», даже для $\sigma=0.2$ м показали полное разрушение когерентности поля, и отсутствие канала, начиная с дистанций сотен метров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синоптическая приповерхностная аномалия ПСЗ узковолноводного типа, начиная с частот ≈ 1000 Гц способна концентрировать акустическую энергию так, что превышение уровня поля может составить до 20 и более дБ. Однако, приповерхностные аномалии оказываются критически чувствительны к величине поверхностного волнения. Даже при практически постоянно присутствующей в мелком море «ряби» (0 баллов) непосредственно после дождя в приповерхностном слое канал разрушается. По мере заглубления аномалии, ее устойчивость к ветровому волнению повышается, но не только не сохраняется когерентность поля, но и значительно увеличиваются модальные коэффициенты поглощения, что в конечном итоге приведет к исчезновению «синоптической трубы» на расстояниях десятки километров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря / М.М. Дивизинюк. - Севастополь: НИЦ «Государственный океанариум» МО Украины и НАН Украины, 1998. – 351 с.2. Акустика морских осадков: Пер.с англ. / Под ред. Л. Хэмптона.- М.: Мир, 1977.- 533с.
2. Buckingham M.J. Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments / M.J. Buckingham // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – **102**, N 5, Pt.1. – P. 2579 – 2596.
3. Buckingham M.J. On pore-fluid viscosity and the wave properties of saturated granular materials including marine sediments / M. J. Buckingham // J. Acoust. Soc. Am. – 2007. – **122**, N 3. – P. 1486 – 1501.
4. Ластовенко О.Р. Акустические характеристики неконсолидированных морских осадков при распространении компрессионной и сдвиговой волн / О.Р. Ластовенко, В.А. Лисютин, А.А. Ярошенко // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – 2010. – № 1(**33**). – С. 260 – 268.
5. Jensen F.B. Computational Ocean Acoustics / F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, H. Schmidt. – N. – Y.: AIP Press, 1994. – 578 p.