

*Keywords: a whirlwind, direct nozzle, dynamics characteristics, a stream, criterion, model.*

Д. І. Осовський, О. С. Шаратов

## МОДУЛЮВАННЯ СТРУМІННО-МЕХАНІЗОВАНОЇ ГВИНТОВОЇ НАСАДКИ ПО ВИХРОВОЙ ТЕОРІЇ

*Запропоновано спосіб підвищення гідродинамічних характеристик гвинтової направляючої насадки. Розглянута вихрова модель струмінно-механізованої насадки. Обраний єдиний критерій оцінки впливу струмінної механізації. Зроблена оцінка змін гідродинамічних характеристик за рахунок струмінної механізації. Приведені результати чисельного моделювання струмінно-механізованої гвинтової насадки по вихровій теорії.*

*Ключові слова: вихор, гвинтова насадка, гідродинамічні характеристики, струмінь, критерій, модель.*

УДК 551.463.2

*А.А. Ярошенко*

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

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

*Ключевые слова: профиль скорости звука, нормальные волны, акустические поля*

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].

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 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 градиентом 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 M.J. 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

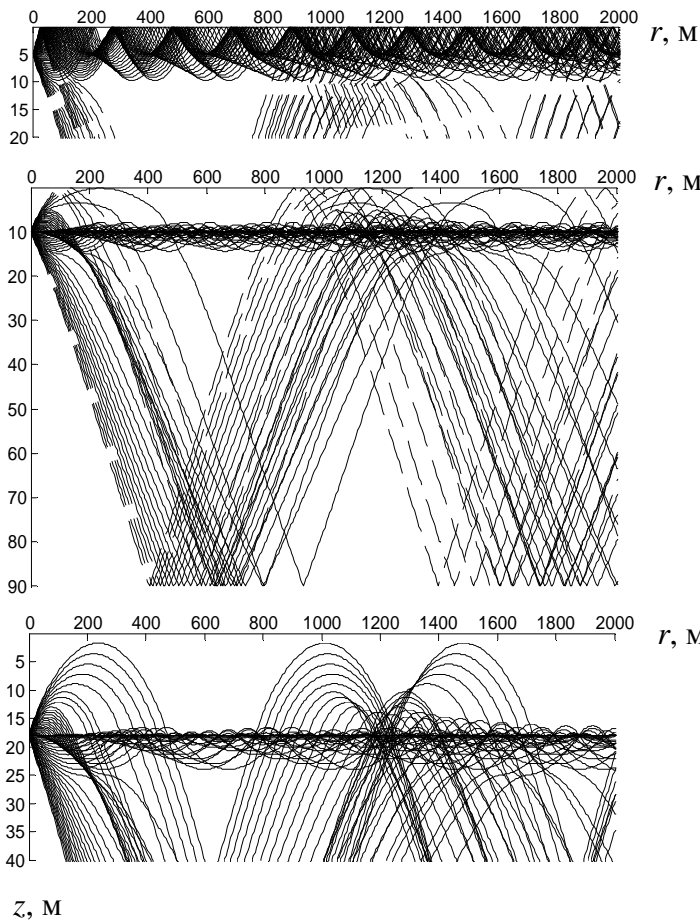


Рис. 2. Лучевые картины

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

$$\operatorname{Re}(\xi_l^2) > \frac{\omega^2}{c_{\max}^2(z)} \quad \text{аппроксимируют}$$

собственные значения  $\xi_l$  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.

На рис.1 показаны фоновый ПСЗ (толстая линия), и ПСЗ, соответствующие: непосредственно после дождя; через 4 часа; через 8 часов. Различить эти

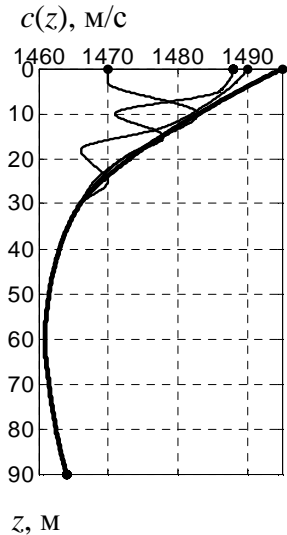


Рис. 1. Профили скорости звука

морському «шельфовому» ПЗК термического типа. Разница в скоростях звука у поверхності ( $c(z=0)=1495$  м/с) и на осі 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 «высвечиваются».

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.

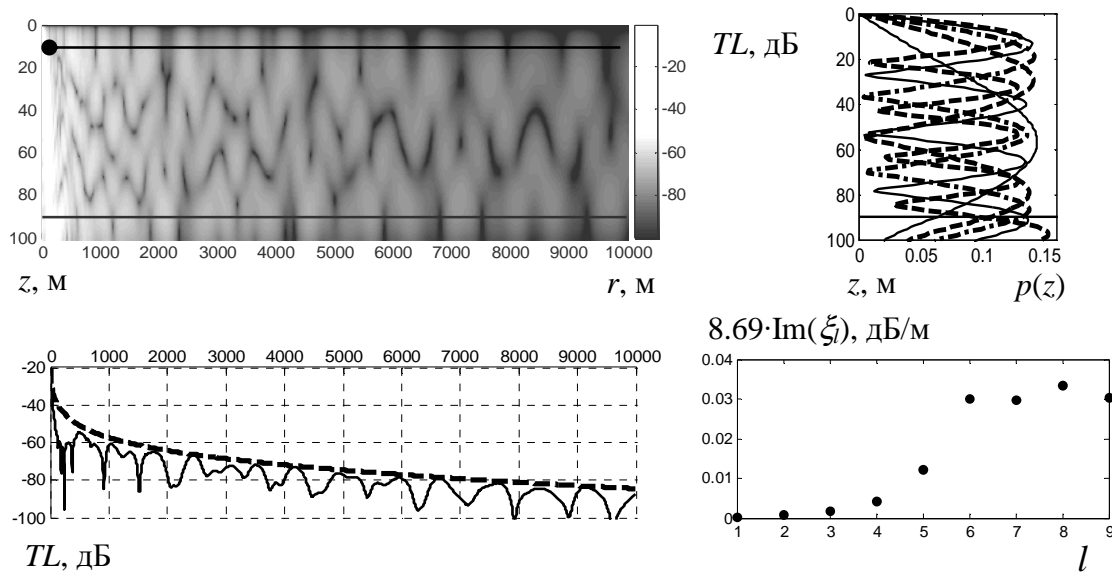
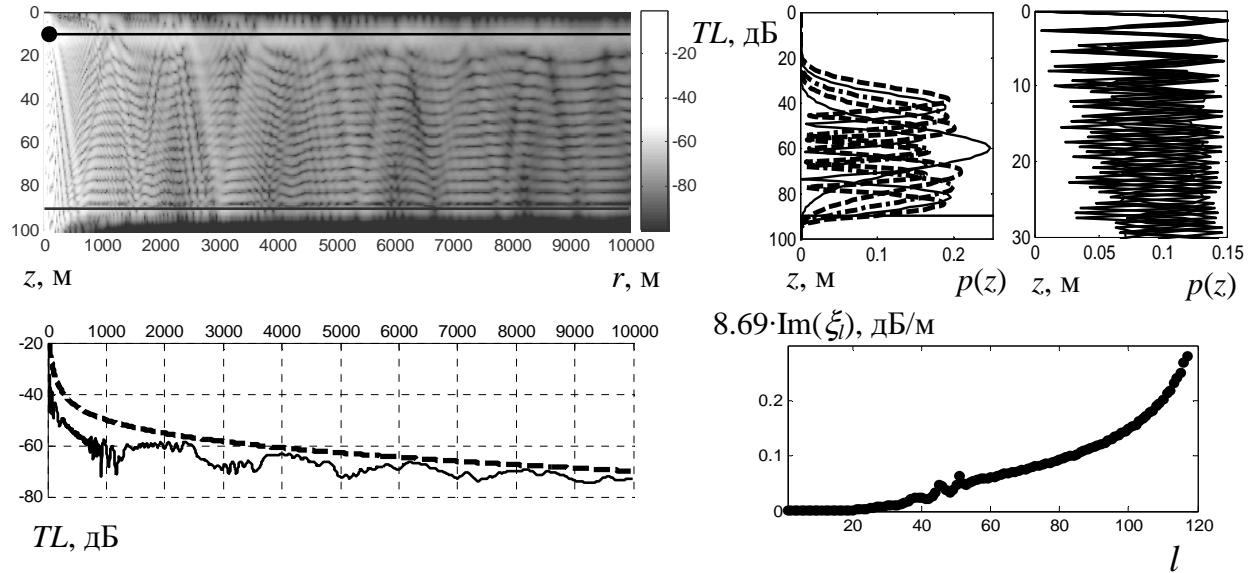


Рис. 3. Структура акустического поля, горизонтальный разрез, вертикальные профили мод и модальные коэффициенты поглощения. Частота 75 Гц

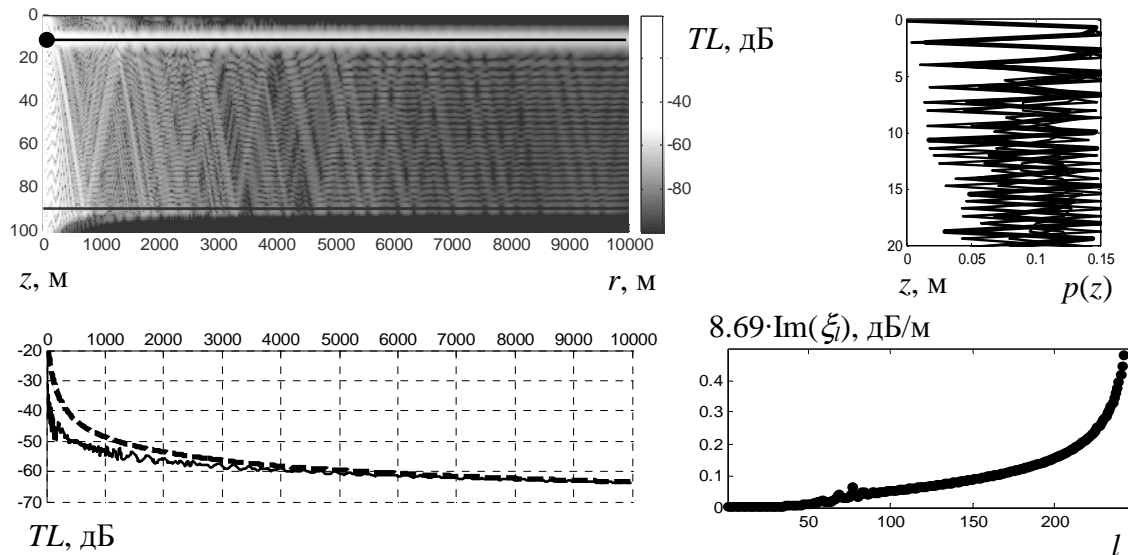
На яркостных картинах и разрезе  $TL$  (transmission loss) – ослабление при распространении, вычисленное как  $TL=20 \cdot \lg(p(r,z)/p(r=1))$ . Пунктирной линией показан уровень поля при некогерентном сложении мод. Частота 75 Гц, ПСЗ «через 4 часа» после дождя, распространяется 10 мод. Вертикальная 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 интерференции мод – возрастание уровня на 15-20 дБ в зонах конвергенции лучей. Модальные коэффици-

циенты поглощения с увеличением номера моды возрастают немонотонно, 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 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  $\approx 10$  дБ за счет «подсветки» в зонах конвергенции. Общее снижение уровня поля на дистанции 10 км становится меньше - 70 дБ.



*Рис. 4. Структура акустического поля, горизонтальный разрез, вертикальные профили мод и модальные коэффициенты поглощения. Частота 1000 Гц*



*Рис. 5. Структура акустического поля, горизонтальный разрез, вертикальные профили мод и модальные коэффициенты поглощения. Частота 2000 Гц*

На рис. 6 – картины поля для случая «после дождя», источник на глубине  $z_s=5$  м. 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 – ситуація «через 8 часів» после дождя. В расчетах акустических полей в 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.

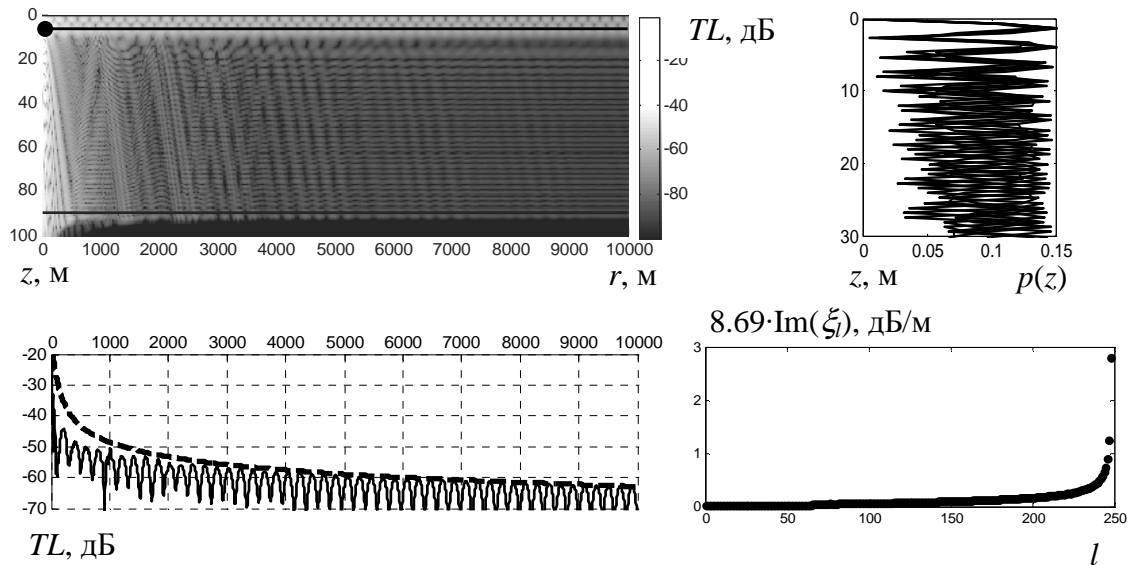


Рис. 6. Структура акустического поля, горизонтальный разрез, вертикальные профили мод и модальные коэффициенты поглощения. Частота 2000 Гц, ПСЗ «после дождя»

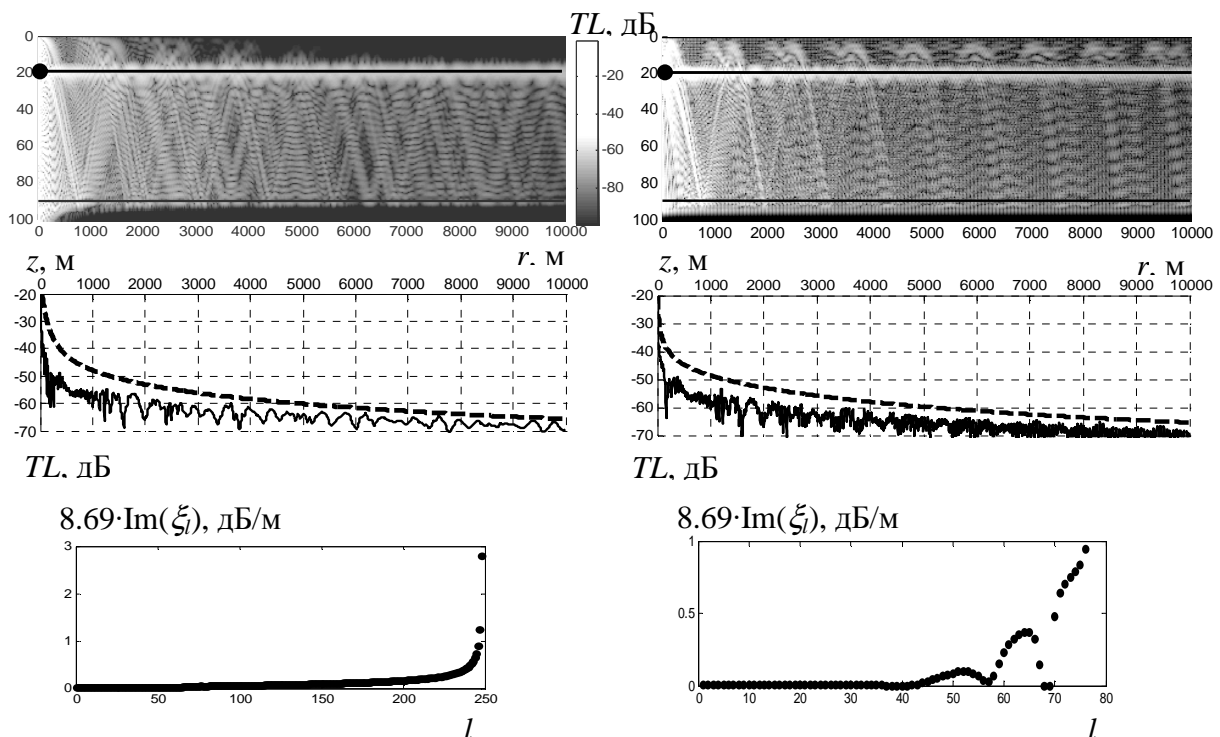


Рис. 7. Структура акустического поля, горизонтальный разрез, и модальные коэффициенты поглощения. Частота 75 Гц, ПСЗ «через 8 часов после дождя»

Расчеты выполнены на основе теории отражения от случайно-неровной поверхности Кирхгофа [5]. Видно, что некогерентный уровень поля на оси аномалии в случае наличия

волнения на поверхності и его отсутствия в данном случае (но не в других) сохраняется, однако интерференционная структура поля полностью разрушается, уже начиная с дистанции  $\approx 2$  км. Контраст «синоптической трубы» вследствие наличия волн снижается на  $\approx 10$  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.

Синоптическая приповерхностная аномалия ПСЗ узковолноводного типа, начиная с частот  $\approx 1000$  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. 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.

*При випаданні сильного дощу, граду, снігу, у приповерхневому водному шарі утворюються аномалії профілю швидкості звуку узкохвильового типу. Розглядається зміна просторової структури акустичного поля при трансформації з часом вузького приповерхневого хвильоводу, викликаного зливовим дощем.*

**Ключові слова:** *профіль швидкості звуку, нормальні хвилі, акустичні поля*

*At the fall of strong rain, hail, snow, the narrow waveguide anomalies of velocity sound profile is appeared in a surface water layer. The change of spatial structure of the acoustic field is considered during transformation in time of narrow surface waveguide, caused by a storm rain.*