

БИОТУРБАЦИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ДНА МЕЛКОГО МОРЯ

Лисютин В.А., Ластовенко О.Р.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, РФ; e-mail: vlisiutin@mail.ru

Поступила в редакцию: 10.07.2019

Аннотация. Морское дно имеет сложную слоистую структуру, в которой можно выделить граничащий с водным переходный слой неконсолидированных морских осадков. Переходный слой, в отличие от заглубленных слоев является «деятельным». Биотурбация бентических животных оказывает глубокое воздействие на физические и акустические свойства морских осадков. Инфауна – разновидность бентоса, организмы которого обитают непосредственно внутри донных осадков рек, озер, прудов, морей. Закапывание, проглатывание, переваривание, дефекация, строительство труб, нор изменяют пористость, размер зерна, и как следствие, объемные и сдвиговые свойства осадков. В статье рассматривается воздействие некоторых видов инфауны на физические свойства осадков. В рамках GSEC теории распространения упругих волн в морских осадках по измеренным частотным зависимостям скорости звука и коэффициента затухания восстанавливаются физические свойства среды. Физические свойства среды связываются с биотурбацией. Показывается, что биотурбация по-разному влияет на физические характеристики среды, определяющие акустические свойства продольной и поперечной волн. Показывается, что выявление биотурбации в бентическом пограничном слое на фоне его общей гидродинамической изменчивости является сложной задачей.

Ключевые слова: морские осадки, дисперсия фазовой скорости, межгранулярное трение, коэффициент затухания, инфауна, биотурбация.

ВВЕДЕНИЕ

Морское дно имеет сложную слоистую структуру, в которой можно выделить непосредственно граничащий с водным, переходный слой неконсолидированных морских осадков. Переходный слой, в отличие от заглубленных является «деятельным». Приливы, морские течения, штормы, движение донных рыб, биотурбация и другие факторы могут нарушать покой частичек песка, ила, глины, слагающих переходный слой.

В работе приводятся и анализируются результаты ряда экспериментальных исследований касающихся влияния биологических факторов на физические и акустические характеристики переходного слоя. Акустические характеристики – это скорость звука, коэффициент затухания и их частотные зависимости [1, 2]. Акустические характеристики зависят от микромеханических характеристик трения между частичками и физических характеристик среды: пористости, гидравлической проницаемости и микрохарактеристик пор – эффективного размера и извилистости [1, 2]. Извилистость может быть измерена по «фактору формирования» или «параметру пористости», $FF = \rho_s/\rho_w$ – отношению электрического сопротивления насыщенного элемента среды к сопротивлению такого же элемента, заполненного морской водой. Фактор формы зависит только от пористости и извилистости.

Термин «биотурбация» часто используется для описания того, как живые организмы влияют на субстрат, в котором они живут. Инфауна – разновидность бентоса, организмы которого обитают непосредственно внутри донных осадков рек, озер, прудов, морей. Включает многие виды моллюсков, иглокожих, кольчатых и круглых червей, личинок насекомых, некоторых рыб, камнеточцев и древоточцев. В зависимости от грунта выделяют пелофильную (в иле), псаммофильную (в песке), литофильную (в камнях), аргиллофильную (в глине) инфауну [3]. Биотурбация бентических животных в осадках оказывает глубокое воздействие на их свойства. Биотурбация – т.е. взбалтывание, перемешивание, закапывание, проглатывание, переваривание, дефекация, строительство труб, биоосаждение, цементацию и метаболические действия изменяют пористость, размер зерна, плотность, жесткость и сжимаемость осадков. Большинство организмов инфауны найдено в верхних 25 см осадка, известного как бентический пограничный слой [4].

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

На рисунке 1 показаны места обитания трех видов инфауны, влияющих на геоакустические свойства дна. *Arenicola marina* (морской пескожил – червь) и *Corophium arenarium* (мелкие ракообразные) уменьшают жесткость осадков. *Arenicola Marina* создает большие норы в верхнем слое (10-15 см), вследствие дыхания и прокачки воды разжижает и рыхлит поверхность слоя, что приводит к увеличению пористости. *Arenicola Marina* предпочитает субстрат в виде среднего песка, крупный слишком велик для проглатывания, в мелком неловко строить норы. Фекальные отложения *A. Marina* могут влиять на межзеренное трение [5].

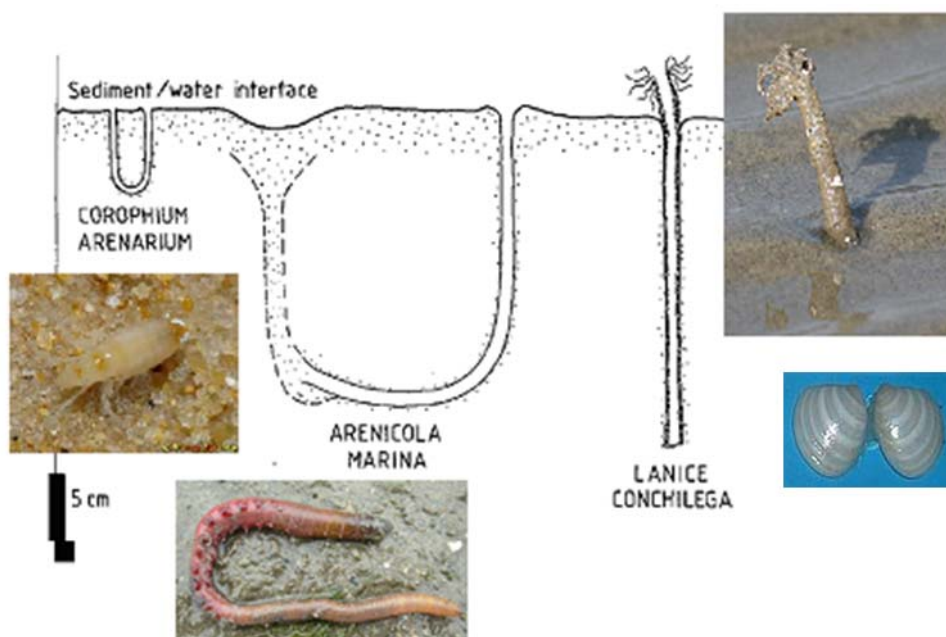


Рисунок 1. Морская инфауна (адаптировано с использованием [5])

Роющие *Corophium arenarium* строит в песке полые U-образные норы, размером от 30 до 50 мм, открытые с обоих концов. Другой вид, *Corophium volutator* очень похож, но выбирает морскую грязь. Создание открытых нор уменьшает скорость сдвиговых волн при увеличении численности организма [5].

Наоборот, *Lanice conchilega* (песчаный каменный червь), имеет характерную выступающую бахромчатую трубу. Трубка внедряется в осадки и покрыта прочным, эластичным, однородным слизистым слоем. Трубка связывает окружающие зерна, увеличивает жесткость среды, на что указывает увеличение скорости поперечной волны, когда появляется больше организмов. Все три вида вызывают снижение удельного электрического сопротивления, что свидетельствует об изменениях в объемной пористости, извилистости, и, следовательно, о изменении скорости звука. Процесс строительства нор, включающий отбор зерна по размеру и форме приводит к изменению структуры и свойств осадков между норами [5].

Многие организмы инфауны производят слизистый материал, называемый внеклеточным полимерным материалом. У некоторых морских беспозвоночных 80% общего расхода энергии животным составляет производство слизи. Мягкая органическая цементация (склеивание) частиц образующейся инфузионной слизью закупоривает поры и снижает проницаемость отложений. Лабораторные исследования показали, что гетеротрофные микроорганизмы могут уменьшать проницаемость отложений на порядок, что может оказывать сложное влияние на скорость звука и затухание из-за изменений в подвижности поровой жидкости. Полевые измерения показали, что объемная плотность отложений уменьшается в результате увеличения доли воды и содержания фекальных гранул. Грязи с высокой степенью биотурбации могут достигать 92% пористости. Верхние несколько сантиметров абиссальных отложений, которые интенсивно перерабатываются глубоководными бентическими животными, имеют пористость от 60 до 90% [4]. Это приводит к уменьшению скорости звука.

На рисунке 2 приведены результаты измерений скорости поперечной волны в зависимости от концентрации *Arenicola Marina*, *Corophium arenarium*, *Lanice conchilega* [5].

В работе [4] приводится результат воздействия биотурбации *Nucula annulata* (мелкая ракушка – рис. 1): изменение пористости 70/86 %, объемного модуля упругости 3,4e9/2,8e9 Па, сдвигового модуля 1,6e8/0,4e8 Па, объемной плотности 1510/1250 кг/м³, что меняет скорость компрессионной волны с 1547/1514 м/с, сдвиговой 325/179 м/с, затухание на частоте 3,5 кГц 0,35/0,2 дБ/м. Для расчета были использованы простые эмпирические формулы: $c_p = 2455.9 - 21.716P + 0.126P^2$, м/с; $\alpha = 0.7602 - 0.01487P + 0.000078P^2f$, дБ/м, где P – пористость, %, f – частота, кГц.

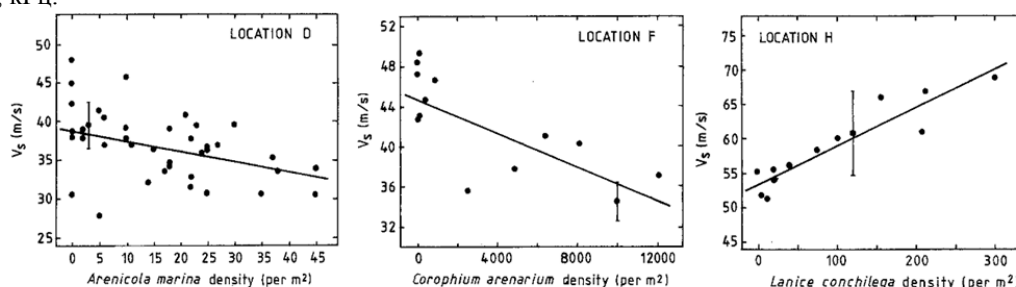


Рисунок 2. Скорость сдвиговой волны в зависимости от концентрации инфауны. Воспроизведено из [5]

ПРИЛОЖЕНИЕ GS+EC ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МОРСКИХ ОСАДКАХ

В простейшем случае, пренебрегая межгранулярным трением и дисперсией скорость звука в осадках можно определить по формуле Вуда

$$c_0 = \sqrt{\frac{K_m}{\rho_m}},$$

где $\frac{1}{K_{m(ean)}} = \frac{P}{K_f} + \frac{1-P}{K_g}$, $\rho_m = P\rho_f + (1-P)\rho_g$, $\rho_{f,g}$, $K_{f,g}$ – плотности и модули упругости флюида и твердой фазы соответственно.

Согласно теории GS+EC [1,2] комплексная фазовая скорость продольной волны определяется уравнением

$$\tilde{c}_p^2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (1)$$

где $a = \rho_m$; $b = -(K_m(1 + 0.33\phi\rho_m A F_C) + \gamma D)$; $c = 0.33\phi K_m \gamma D A F_C$; $A = \frac{(\rho_g - \rho_f)}{\rho_g \rho_f}$; $D = (i\omega)^n$; γ – жесткость среды с межгранулярным взаимодействием, Па; n – показатель стресс-релаксации; ϕ – перколяционная пористость – внутренний параметр теории;

$$F_C(w) = 1 - \frac{2J_1(i^{3/2}w)}{i^{3/2}wJ_0(i^{3/2}w)};$$

$w = \sqrt{\frac{a^2 \rho_f}{\eta}} \omega$; $J_{0,1}$ – функции Бесселя; a – радиус пор; η – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Комплексная фазовая скорость сдвиговой волны может быть определена по формуле

$$\tilde{c}_s = \sqrt{\frac{\gamma_s (i\omega)^m}{\rho_{eff}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{eff} = \rho_m - \phi \rho_f F_C(w)$ – эффективная плотность; γ_s – сдвиговая жесткость, Па; m – сдвиговый показатель стресс-релаксации.

Вещественные скорости продольной и поперечной волн $c_{p,s}$ и коэффициенты затухания $\alpha_{p,s}$ могут быть получены из комплексных фазовых скоростей: $c_{p,s} = (\text{Re}(\tilde{c}_{p,s}^{-1}))^{-1}$, $\alpha_{p,s} = -\omega \text{Im}(\tilde{c}_{p,s}^{-1})$, Нп/м.

Рассмотрим данные [5], приведенные на рис.2. Инвертируя формулу (2), предполагая отсутствие дисперсии, определив равновесную плотность из статистических корреляций с диаметром гранул (рис. 3) можно вычислить изменение межгранулярной жесткости за счет влияния биотурбации:

$$\gamma_s = c_s^2 \rho_m, \quad (3)$$

что дает: точка D ($d = 2,29$, $\rho_m = 1950$ кг/м³) $\gamma_s = 2,97$ МПа – нет биотурбации, $\gamma_s = 2,12$ МПа – максимальная битурбация; точка F ($d = 3,07$, $\rho_m = 1910$ кг/м³) $\gamma_s = 3,88$ МПа – нет биотурбации, $\gamma_s = 2,21$ МПа – максимальная битурбация; точка H ($d = 2,69$, $\rho_m = 1935$ кг/м³) $\gamma_s = 5,44$ МПа – нет биотурбации, $\gamma_s = 9,21$ МПа – максимальная битурбация. Как видно из расчетов, в первых двух случаях биотурбация снижает межгранулярное трение, в последнем – увеличивает.

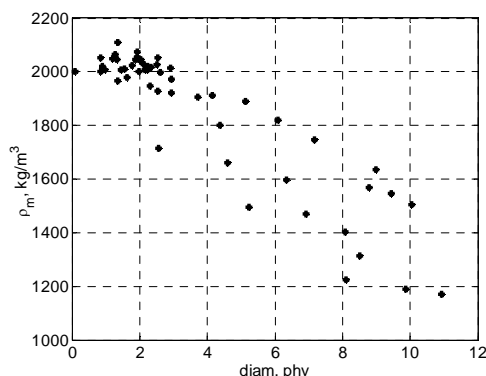


Рисунок 3. Статистические корреляции между объемной плотностью и диаметром гранул (фи единиц)

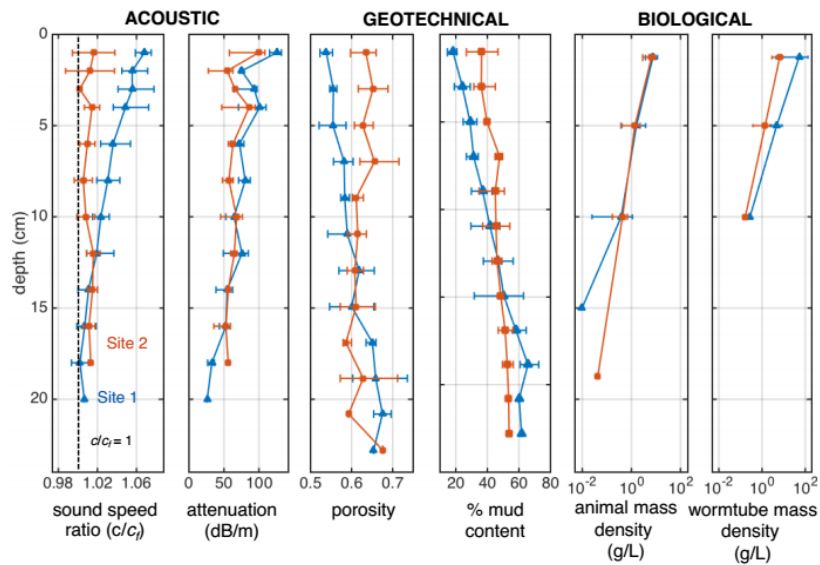


Рисунок 4. Зависимость скорости звука, затухания, пористости, процента содержания грязи от глубины, затухание, пористость, процент грязи, массовая плотность инфавны и массовая плотность твердых червячных труб. Частота 100 кГц. Взято из [6]

Рассмотрим данные, приведенные в [6]. Здесь измерялась вертикальное распределение акустических, физических и биологических характеристик в переходном слое на глубину до 18 см. Данные приведены на рисунке 3. Кроме того, в двух точках были измерены частотные зависимости фазовой скорости звука и затухания на двух глубинах: 2 см - приповерхностный слой с наибольшей плотностью биотурбации и глубина 18 см – с наименьшей плотностью.

В обеих точках глубина воды 5 – 7 м. Входные данные для применения GSEC теории следующие. Точка 1 (синий): $\rho_g = 2560 \text{ кг/м}^3$, $K_g = 3,8 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $\rho_f = 1020 \text{ кг/м}^3$, $K_f = 2,37 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $P = 0,55$ для глубины 2 см и $P = 0,66$ для глубины 18 см. Точка 2: $P = 0,65$. Вначале проанализируем физические характеристики сред в двух точках на двух глубинах.

Локация 1 (синий). Эта точка удивительна тем, что пористость с ростом глубины возрастает (рис. 4). Увеличение пористости объясняется возрастанием доли мелкодисперсного «мусора». Несмотря на увеличение пористости, проницаемость среды должна уменьшаться. Скорость звука в полном соответствии с формулой Вуда с ростом глубины уменьшается и на частоте 100 кГц сравнивается с c_w – скоростью звука в воде. Следующая необычность в том, что большая скорость звука соответствует большему затуханию – в правильных, плотных морских осадках должно быть наоборот. Этот эффект существенно неоднородного дна конкурирует с уменьшением плотности биотурбации и затрудняет выявление ее последствий.

Локация 2 (оранжевый). Здесь дно более однородно, пористость, скорость звука и затухание практически постоянны (напомним, что пока речь идет о одной частоте).

Рассмотрим теперь вопрос о том, что можно сказать о биотурбации из дисперсионных кривых. Поиск наилучшего соответствия осуществлялся по совпадению дисперсионных кривых с экспериментальными точками тангенса потерь $\beta_p = \frac{\alpha_p c_p}{\omega}$, поскольку эта величина зависит и от скорости и от затухания. Результаты инверсии приведены в таблице 1, дисперсионные кривые на рисунке 5.

Таблица 1. Результаты инверсии

Параметр Точка, глубина	a , мкм	ϕ	γ , Па	n	K_m , Па	c_0 , м/с	P	κ , м ²
Локация 1, 2 см	3,68	0,3	$6,56 \cdot 10^5$	0,362	$4,10 \cdot 10^9$	1547	0,55	$5,09 \cdot 10^{-13}$
Локация 1, 18 см	3,68	0,08	$6,66 \cdot 10^5$	0,371	$3,48 \cdot 10^9$	1502	0,66	$1,36 \cdot 10^{-13}$
Локация 2 2 см	3,68	0,2	$2,72 \cdot 10^5$	0,414	$3,58 \cdot 10^9$	1508	0,64	$3,39 \cdot 10^{-13}$
Локация 2 18 см	3,68	0,2	$0,97 \cdot 10^5$	0,492	$3,58 \cdot 10^9$	1508	0,64	$3,39 \cdot 10^{-13}$

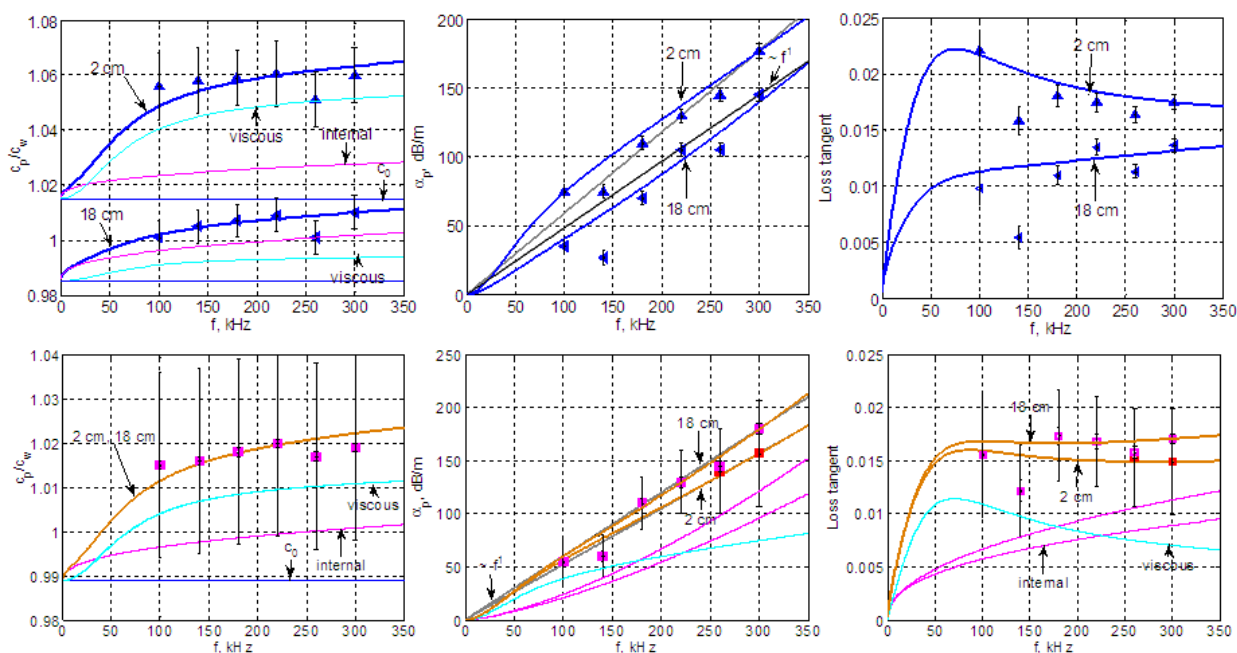


Рисунок 5. Дисперсионные кривые, восстановленные по экспериментальным точкам. Локация 1 – верхняя панель, локация 2 – нижняя панель

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В морских осадках дисперсия фазовой скорости и частотная зависимость затухания обусловлены двумя причинами: внутренним (между частицами) и вязким (при относительном движении воды) трением. Внутреннее трение показывает частотную зависимость затухания $\alpha \sim f^1$, в этом случае тангенс потерь постоянен, вязкое трение на высоких частотах дает $\alpha \sim f^{1/2}$. В реальной среде, где присутствует и вязкое и внутреннее трение в зависимости от баланса между силами показатель в степенном законе затухания будет больше $1/2$, но меньше 1. Уменьшение показателя соответствует пропорциональному увеличению доли вязкого трения и переходу среды в состояние суспензии. На рисунке 5 закон $\alpha \sim f$ выделен серой линией. Дисперсия скорости звука так же имеет две компоненты, обусловленные внутренним и вязким трением. Внутреннее трение дает слабую дисперсию во всем диапазоне частот, вязкое трение – значительную дисперсию в окрестности релаксационной частоты, где меняется характер течения в порах и вместо вязких сил на низких частотах (мягкая среда) начинают господствовать инерционные силы. Жидкость не успевает вытекать из щелей между гранулами, среда становится более жесткой и скорость звука возрастает.

Теория GSEC позволяет оценить компоненты дисперсии по раздельности.

Локация 1. В приповерхностном слое показатель в степенном законе затухания < 1 , основной вклад в дисперсию скорости вносит упругость флюида, перколяционная пористость 0,3. С ростом глубины и горного давления среда уплотняется, перколяционная пористость и проницаемость снижается (хотя объемная пористость растет – рис. 4), основной вклад в дисперсию скорости звука вносит уже внутреннее трение. Показатель в степенном законе затухания приближается к обычной единице. Тем не менее, среда «мягкая», показатель стресс-релаксации (показатель нелинейности среды) $n = 0,37$. Из таблицы 1 нетрудно видеть, что параметры межгранулярного трения вдоль вертикали меняются незначительно. Акустические характеристики среды существенно изменяются исключительно по причине конкурирующего увеличения объемной пористости (определяет c_0) и уменьшения перколяционной пористости (зависит от гидравлической проницаемости). На глубине 18 см тангенс потерь со слабой тенденцией к росту – следствие межгранулярного трения. Как следствие, можно представить, что рассмотренный здесь вид биотурбации не меняет микроскопические характеристики межгранулярного трения, но меняет макрохарактеристики среды, касающиеся относительного движения флюида. Насыщенность приповерхностного слоя трубками и норами червей разжижает слой, увеличивает гидравлическую проницаемость среды.

Локация 2. Здесь ситуация противоположная. Экспериментальные точки, соответствующие двум глубинам практически совпадают, за исключением единственной – коэффициент затухания на большей глубине оказывается больше на единственной частоте (хотя в пределах доверительного интервала различий нет). Для нормальной среды должно быть наоборот. Единственный вывод, который можно сделать – биотурбация здесь уменьшает внутреннее трение.

ВЫВОДЫ

Среди факторов гидродинамической изменчивости переходного слоя морских осадков биотурбация занимает не главное место. Надежно выявить и оценить вклад конкретной инфауны на изменчивость акустических характеристик неконсолидированным морских осадков возможно только после дополнительных трудоемких исследований. Важное место в этих исследованиях должно иметь измерение диссипативно-дисперсионных характеристик сред в максимально возможной широкой полосе частот.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-42-920001.

Список литературы / References:

1. Лисютин В.А. Простая акустическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним и вязким трением. *Экологический вестник научных центров ЧЭС*, 2018, т. 15, № 3, с. 39-51. DOI: 10.31429/vestnik-15-3-39-51. [Lisyutin V.A. A Simple Acoustic Model of Unconsolidated Marine Sediments with Internal Friction and Viscous Dissipation. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 39-51. DOI: 10.31429/vestnik-15-3-39-51. (In Russ.)]
2. Лисютин В.А. Обобщенная реологическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним трением и эффективной сжимаемостью. *Морской гидрофизический журнал*, 2019, т. 35, № 1, с. 85-100. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-1-85-100. [Lisyutin V.A. Generalized Rheological Model of the Unconsolidated Marine Sediments with Internal Friction and Effective Compressibility. *Physical Oceanography*, 2019, vol. 35, no. 1, pp. 77-91, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-1-77-91. (In Russ.)]
3. *Большая советская энциклопедия*. М.: Советская энциклопедия, 1969-1978. [*Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya*. M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1969-1978 (in Russ.)]
4. Richardson M.D., Young D.K. Geoacoustic models and bioturbation. *Marine Geology*, 1980, vol. 38, pp. 205-218.
5. Jones S.E., Jago C.E. In situ assessment of modification of sediment properties by burrowing invertebrates. *Marine Biology*, 1993, vol. 115, pp. 133-142.
6. Lee K.M., Venegas G.R., Ballard M.S., Wilson P.S. et al. Acoustics of biologically active marine sediments. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2018, vol. 33, iss. 1, p. 005003. DOI: 10.1121/2.0000875.

BIOTURBATION AND VARIABILITY ACOUSTIC PROPERTIES TRANSITIONAL LAYER OF THE BOTTOM OF THE SHALLOW SEA**Lisyutin V.A., Lastovenko O.R.**

Sevastopol State University

Universitetskaya Str., 33, Sevastopol, 299053, Russia; e-mail: vlisyutin@mail.ru

Abstract. The seabed has a complex layered structure in which one can distinguish a transitional layer of unconsolidated marine sediments bordering on the water. The transition layer, unlike the bury layers, is “active”. Bioturbation of benthic organisms has a profound effect on the physical and acoustic properties of marine sediments. Infauna is a type of benthos, whose organisms live directly inside the bottom sediments of rivers, lakes, ponds, seas. Burrowing, ingestion, digestion, defecation, tube building, change the porosity, grain size, bulk and shear properties of sediments. The article discusses the impact of certain types of infauna on the physical properties of precipitation. Within the framework of the GSEC theory of the propagation of elastic waves in marine sediments, the physical properties of the medium are restored from the measured frequency dependences of the speed of sound and the attenuation coefficient. The physical properties of the medium are associated with bioturbation. It is shown that bioturbation affects differently the physical properties of the medium, which determine the acoustic properties of the longitudinal and transverse waves. It is shown that the identification of bioturbation in the benthic boundary layer against the background of its general hydrodynamic variability is a difficult task.

Key words: *marine sediments, phase-velocity dispersion, intergranular friction, attenuation coefficient, infauna, bioturbation.*