

О ВОЗДЕЙСТВИИ СКАЛЯРНЫХ И ВЕКТОРНЫХ КОМПОНЕНТ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ НА РЫБ И БЕСПОЗВОНОЧНЫХ

Завьялова О.С., Ластовенко О.Р., Лисютин В.А., Лучин В.Л., Петренко Н.В.,
Рогова О.В., Рыбакова К.А., Ярошенко А.А.

Севастопольский государственный университет

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

Поступила в редакцию: 10.09.2019

Аннотация. Подводный звук, генерируемый деятельностью человека потенциально может отрицательно повлиять на водную фауну, в том числе беспозвоночных. Кроме поля звукового давления воздействие может оказывать так же и поле колебательной скорости. Современные биолого-акустические исследования показывают, что рыбы и беспозвоночные чувствительны не только к давлению, но и к уровню колебательной скорости – векторным компонентам звукового поля. Приводится классификация рыб по их чувствительности к компонентам звукового поля. Приводятся принятые в настоящее время уровни звукового поля травматического воздействия на рыб. Приводятся результаты моделирования векторного поля потока мощности в многомодовом горизонтально-слоистом волноводе мелкого моря. Моделирование поля потока мощности осуществляется «по определению», как произведение полей давления и компонент поля вектора колебательной скорости. Поля давления и колебательной скорости вычисляются методом нормальных волн. Устанавливается качественная связь между физическими и акустическими характеристиками слоистого дна и осредненными законами спадания компонент полей колебательной скорости и поля потока мощности при многомодовом характере распространения звука.

Ключевые слова: поле давления, поле колебательной скорости, поле потока мощности.

ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Подводный звук, генерируемый деятельностью человека потенциально может отрицательно повлиять на водную фауну [1]. Обычно под морской фауной подразумевают в основном млекопитающих – дельфинов, китов, а воздействие звука на значительно большую биомассу рыб и беспозвоночных, которые дают пищу млекопитающим (в том числе и людям!) оставалось без внимания.

Многие из оценок акустического воздействия, проведенные на рыбах и беспозвоночных в прошлом, не могут считаться удовлетворительными, потому что оценивалось влияние только звукового давления. Однако, кроме поля звукового давления воздействие может оказывать так же и поле колебательной скорости – градиента давления. Современные биолого-акустические исследования показывают, что рыбы и беспозвоночные чувствительны скорее не к давлению, а к уровню колебательной скорости и колебательного ускорения [1].

Статья имеет проблемный характер и составлена из двух частей. В первой части дается обзор современной литературы, отражающей результаты исследований биологического действия звука на морскую фауну. Во второй части приводятся результаты собственных исследований – представляются методы и результаты расчетов относительных уровней колебательной скорости и потоков мощности в условиях волновода мелкого моря

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Звуковое давление – это гармонически меняющееся превышение давления над его равновесным гидростатическим значением. Звуковое давление измеряется гидрофонами и по абсолютной величине составляет сотни паскалей. Колебательная скорость является градиентом давления и отражает факт, что частички среды движутся от большего давления к меньшему. В гармонической волне колебательная скорость (КС) осциллирует вокруг среднего нулевого значения. КС – векторная величина. При наличии нескольких источников звука, или одного, но в волноводных условиях мелкого моря частички среды описывают сложные траектории, в среднем никуда не перемещаясь. КС измеряется особыми датчиками, представляющими собой взвешенные в жидкости соколеблющиеся с ней шары различного размера. Внутри шара располагается чувствительная часть датчика типа акселерометра. Размер шара определяет диапазон частот, на который реагирует датчик. Идеальный датчик КС должен представлять собой частичку среды.

Полная энергия, содержащаяся в звуковой волне, складывается из потенциальной (PE) и кинетической KE энергии. Потенциальная энергия возникает в результате сжатия и расширения жидкости, и связана со звуковым давлением, кинетическая энергия вызвана движением частиц среды, и связана с КС. В отсутствие акустических границ (в условиях свободного поля, на значительном расстоянии от поверхности и дна моря) звуковое давление, излучаемое простым точечным источником, спадает по закону $1/r$, где r – расстояние от источника. Далеко от источника (в акустическом «дальнем поле»), энергии, связанные с давлением и КС равны ($KE = PE$), вблизи источника (в акустическом «ближнем поле») кинетическая энергия превышает потенциальную ($KE > PE$).

Ранние исследования предполагали, что основные органы чувств, используемые для обнаружения звука (отолитовые органы в ушах рыб и различные органы, используемые беспозвоночными) на самом деле чувствительны к КС, а не к звуковому давлению.

Органы слуха и равновесия у рыб представлены внутренним ухом, наружное ухо у них отсутствует. Внутреннее ухо состоит из трех полукружных каналов с ампулами, овального мешочка и круглого мешочка с выступом (лагеной). Рыбы – единственные позвоночные с двумя или тремя парами отолитов, или ушных камешков, которые помогают поддерживать определенное положение в пространстве. У многих рыб имеется связь внутреннего уха с плавательным пузырем посредством цепи специальных косточек (веберов аппарат карповых, вьюновых и сомовых рыб) или с помощью доходящих до слуховой капсулы отростков плавательного пузыря (сельди, анчоусы, треска, многие морские караси, каменные окуни).

Тело рыбы очень близко по средней плотности и упругости к воде и, как следствие, колебания тела совпадают с колебаниями среды. Отолиты в ушах рыб функционируют как акселерометры типа «неподвижной массы», обнаруживающие это движение. При продольном, вертикальном, боковом и вращательном движениях тела рыбы происходит некоторое смещение отолитов и раздражение ими чувствительных волосков, что, в свою очередь, создает соответствующий афферентный поток. На отолиты ложатся и рецепция гравитационного поля, оценка степени ускорения рыбы при бросках. Внутреннее ухо способно воспринимать звуки частотой от десятков герц до 10 кГц. Боковая линия воспринимает сигналы только низкой частоты – от единиц до 600 герц. Но различия между двумя слуховыми системами – внутренним ухом и боковой линией не ограничиваются только расхождением в воспринимаемых частотах. Интереснее то, что эти две системы реагируют на различные составляющие звукового сигнала, и этим определяется и их разное значение в поведении рыбы. Плавательный пузырь служит хорошим резонатором, усиливая средне- и низкочастотные колебания. Звуковая волна колеблет стенки плавательного пузыря, которые, в свою очередь, приводят к смещению цепочки косточек Веберова аппарата. Таким образом, если проводить аналогию с высшими наземными животными, Веберов аппарат у рыб выполняет функцию среднего уха. Однако не у всех рыб есть плавательный пузырь и Веберов аппарат. В этом случае рыбы проявляют низкую чувствительность к звуку. У беспузырных рыб слуховую функцию плавательного пузыря частично компенсируют воздушные полости, связанные с лабиринтом, и высокая чувствительность органов боковой линии к компрессионной волне.

Таким образом, сформировалась представленная в таблице 1 классификация рыб, сообразная с их чувствительностью к компонентам звукового поля.

Таблица 1. Классификация рыб и беспозвоночных по их чувствительности к компонентам звукового поля

1	Рыбы без плавательного пузыря, которые чувствительны только к КС и проявляют чувствительность только к узкой полосе частот (например, плоские рыбы - <i>Pleuronectiformes</i> ; скаты и скаты-акулы – <i>Chondrichthyes</i>)
2	Рыбы с плавательным пузырем, у которых этот орган не играет роли в слухе. Эти рыбы чувствительны только к КС и показывают чувствительность только к узкой полосе частот. Эта группа включает лососевых (<i>Salmonidae</i>) и некоторых тунцов и скумбрии (<i>Scombridae</i>), но многие другие виды, вероятно, тоже вписываются в эту категорию.
3	Рыбы с плавательными пузырями, который близко, но не тесно связан внутренним ухом. Эти рыбы чувствительны как к КС, так и к звуковому давлению, и показывают более широкий диапазон частот по чувствительности, чем группы 1 или 2, распространяющийся примерно до 500 Гц. В эту группу входят трески (<i>Gadidae</i>), угри (<i>Anguillidae</i>), (<i>Sciaenidae</i>) и, возможно, другие рыбы.
4	Рыбы, имеющие специальные структуры, механически связывающие плавательный пузырь с ухом. Эти рыбы в первую очередь чувствительны к звуковому давлению, хотя они также обнаруживают движение частиц. У них шире частотный диапазон, простирающийся до нескольких кГц и обычно демонстрирующий более высокую чувствительность к звуковому давлению, чем рыбы в группах 1, 2 или 3. Группа включает в себя <i>Holocentridae</i> , <i>Sciaenidae</i> , сельдь (<i>Clupeidae</i>).
5	Яйца и личинки

Биологические метрики, используемые для описания звука и характеризующие источник должны относиться к потенциальному воздействию на биологические объекты. Звуки разных характеристик (например, импульсный источник против непрерывного, широкополосный или узкополосный) могут давать разные воздействия. Важно определить те характеристики, которые потенциально вредны для рыб. Например, при рассмотрении потенциальных воздействий критическим уровнем может быть среднеквадратичное (RMS) звуковое давление, измеренное за интервал времени, деленное на продолжительность интервала времени, для определенного частотного спектра.

В некоторых случаях среднеквадратичное звуковое давление может использоваться для описания энергии в импульсе. Для импульсов это квадратный корень из среднего квадрата давления за время, составляют ту часть формы волны, которая содержит 90% звуковой энергии импульса. В качестве альтернативы, полная энергия импульса сложной формы может описываться уровнем звукового воздействия (SEL). SEL является интегралом по времени от квадрата звукового давления. Единица звуковой экспозиции СИ является Па²·с. SEL можно указать

для одного импульса (SELss). Однако когда импульсные звуки повторяются, целесообразно оценить совокупный SEL (SELcum). SELcum – кумулятивная, накопительная шумовая энергия, которой подвергается животное в течение определенного периода времени.

Уровни звукового давления или КС часто приводят в логарифмической шкале. Уровень LF величины поля (например, следнеквадратичное (RMS) звуковое давление или КС: $LF = 20 \lg (p/p_0)$, дБ, где p_0 – контрольное значение поля. Аналогично, уровень LP величины мощности P (например, интенсивность звука): $LP = 10 \lg (P/P_0)$, дБ. Уровни звукового давления указываются относительно $p_0 = 1$ мкПа. Движение частиц может быть выражено в терминах смещения, скорости или ускорения. Смещение частиц указывают относительно 1 пикометра, КС относительно 1 нанометра в секунду (нм/с), ускорение частиц относительно 1 мкм/с². Другой важной характеристикой импульсного звука (как по давлению, так и по КС) является время нарастания, определяемое как время, в течение которого сигнал возрастает с 10% до 90% пикового значения. Импульсы с крутым фронтом особенно травматичны [1].

Важность движения частиц. В большинстве оценок потенциального воздействия звука не уделяется внимание чувствительности рыб к движению частиц, которое сопровождает распространение звука в воде. Отсутствуют научно обоснованные данные о пороге слуха и поведенческих реакциях на движение частиц рыбами. Кроме того, нет ни стандартов измерения КС, ни легко используемых и недорогих приборов для измерения КС [1].

Обратим внимание на следующий факт. Рыбы реагируют и на давление, и на колебательную скорость. Произведение звукового давления на КС – интенсивность звука или плотность потока мощности, Вт/м². КС, в отличие от звукового давления, векторная величина, которая может быть описана заданием трех компонент, и сильно различаться по осям x, y и z (рис. 1).

На рисунке 1 вначале видно вступление компрессионной части волны давления и КС, затем, позднее – поверхностной волны.

Halvorsen и др. (2011; 2012a) описал баротравмы у рыб, подвергшихся имитации звука забивания свай и представил физиологически обоснованный подход к классификации травм, называемый FIT, который позволяет количественно определить повреждения у рыб. Модель FIT применяется математическим взвешиванием каждой травмы в зависимости от ее тяжести (коэффициенты 5, 3, 1), затем все взвешенные травмы суммируются для получения единого общего значения травмы, называемого RWI. Вес травм был определен на основе серьезности. В качестве примера можно привести рыбу с тремя травмами, одной смертельной (весовой коэффициент 5) и две легких (1), в результате чего RWI составил 7. Общая величина травм устанавливается уравнением:

$$RWI = \sum (\text{травма} \times \text{весовой коэффициент}).$$

Поскольку различные травмы могут давать один и тот же RWI, модель FIT обеспечивает возможность свести сложные данные в единое значение. Были использованы три категории травм: смертельные, умеренные и легкие. Смертельные включают разрыв плавательного пузыря и кровоизлияние в органы, умеренные травмы – ушибы органов, легкие – ушибы плавников.

По итогам исследований [2] в настоящее время приняты следующие уровни звукового поля и уровни травматического воздействия на рыб.

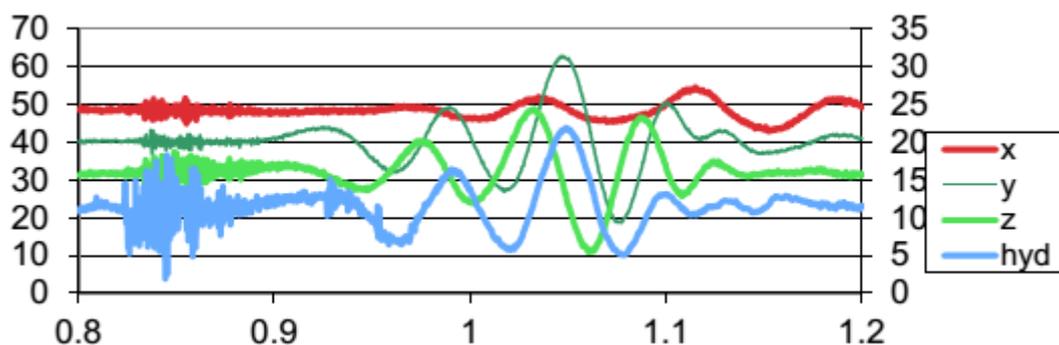


Рисунок 1. Волны звукового давления и КС. Данные записаны на расстоянии 25 метров от предмета, упавшего на дно. Три компоненты КС (x, y, z) измерены внутри донных осадков, звуковое давление (hid) – в воде чуть выше дна. Звуковое давление (правая ось) выражается в Па, а КС (левая ось) в мкм/с. Горизонтальная и вертикальная скорость составляет около 40 мкм/с при 16 Гц, в то время как амплитуда мгновенного давления составляет приблизительно 16 Па пик-пик. Источник – [2]

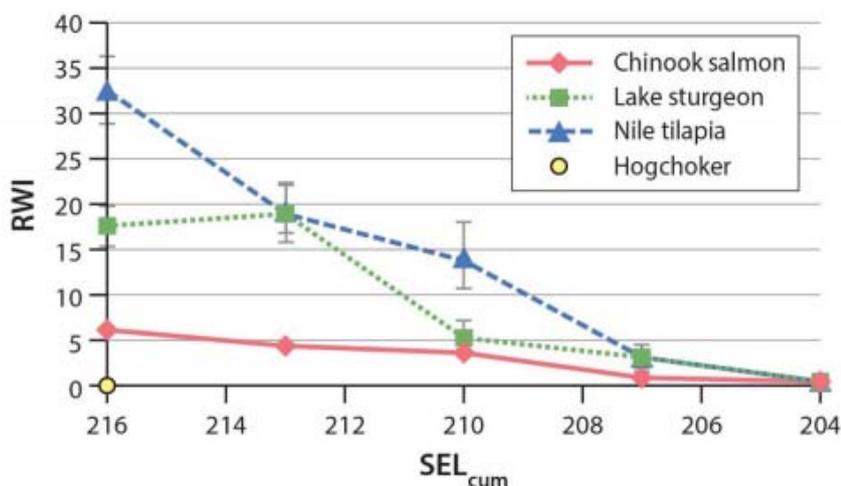


Рисунок 2. Значения RWI для четырех видов рыб. SELcum по оси X, значения RWI по оси Y. (Из Халворсена и др. 2012с)

Таблица 2. Травматическое воздействие и уровень звукового поля

Типы рыб	Смертельная и потенциально смертельная травма	Восстанавливаемая травма	Уровень стресса
1	>219 dB SELcum или > 213 dB пик	>216 dB SELcum или > 213 dB peak	>>186 dB SELcum
2	210 dB SELcum или >207 dB пик	203 dB SELcum или >207 dB пик	> 186 dB SELcum
3	207 dB SELcum или >207 dB пик	203 dB SELcum или >207 dB пик	186 dB SELcum
4	>210 dB SELcum или >207 dB пик		

2. СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ, КОМПОНЕНТ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ, ПОТОКА МОЩНОСТИ И ОСРЕДНЕННЫЕ ЗАКОНЫ СПАДАНИЯ

2.1. Методы расчета

В безграничном пространстве в случае единственного источника будет существовать только одна компонента КС – радиальная. Законы спадаения относительной (давление, измеренное на расстоянии r , деленное на давление на расстоянии $r = 1$ м от монополюсного источника) интенсивности давления и КС будут совпадать. Это тривиальный случай. Иначе обстоит дело в мелком море, где водный слой представляет собой волновод, ограниченный сверху полностью отражающей свободной поверхностью, снизу – частично отражающим дном. В волноводе акустическое поле «распадается» на отдельные нормальные волны или моды. Мода представляет собой волну, стоячую вдоль вертикали (в силу граничных условий на поверхности и дне) и бегущую вдоль горизонтали. Фазовая скорость различных мод неодинакова, и при интерференции мод вдоль горизонтали и вертикали образуется сложная картина чередования максимумов и минимумов поля. В плоско-слоистом волноводе будут существовать две компоненты КС – горизонтальная и вертикальная, спадающие с увеличением расстояния по различным законам.

Методы расчета полей давления в горизонтально-слоистых волноводах хорошо разработаны [2]. Полное поле КС может быть вычислено в виде суммы мод горизонтальной и вертикальной компонент. Поле КС отдельной моды можно получить, используя дифференциальную связь между горизонтальной u_r и вертикальной u_z компонентами КС и акустическим давлением $p(r,z)$ [3]:

$$u_z = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p(r,z)}{\partial z}, u_r = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p(r,z)}{\partial r}, \quad (1)$$

где p , u_r , u_z – комплексные амплитуды давления и соответствующей компоненты КС.

При многомодовом характере распространения звука, поле потока мощности $\mathbf{I}(r,z)$ в волноводе может быть вычислено «по определению», как произведение поля давления и компонент поля колебательной скорости [3]

$$I_{r,z} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(p^* u_{r,z}) = \frac{1}{2} |p u_{r,z}| \cos(\arg(p) - \arg(u_{r,z})), \quad (2)$$

где * – символ комплексного сопряжения.

Комплексная амплитуда поля акустического давления в водном слое в виде суммы мод может быть записана в виде

$$p = \sum_{l=1}^{l_m} p_l(r, z) = \sum_{l=1}^{l_m} Q_l p_l(z) H_0^{(1)}(\xi_l r), \quad (3)$$

где l_m – максимальный номер моды; $p_l(z)$ – вертикальные профили мод; ξ_l – горизонтальное волновое число, Q_l – коэффициенты возбуждения мод. Тогда с помощью (1) поля компонент КС могут быть представлены в виде

$$u_r(r, z) = \frac{-i}{\omega \rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} u_{rl}(r, z) = \frac{-i}{\omega \rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} Q_l p_l(z) \xi_l H_1^{(1)}(\xi_l r), \quad (4)$$

$$u_z(r, z) = \frac{-i}{\omega \rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} u_{zl}(r, z) = \frac{-i}{\omega \rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} Q_l \frac{\partial p_l(z)}{\partial z} H_0^{(1)}(\xi_l r). \quad (5)$$

Вычисляя горизонтальные волновые числа и вертикальные профили мод, например, с помощью программы «KRAKENC», осуществляя численное дифференцирование, нетрудно получить поле отдельной моды и полные поля давления и компонент КС при различных моделях слоистого дна. Перемножая затем в соответствии с (2) получаем поле вектора интенсивности. Следует обратить внимание, что поля, вычисленные по формулам (1) – (5), на самом деле следует называть «квазивекторными», поскольку компоненты поля КС получены из скалярного поля давления, как его градиенты.

Рассмотрим модели волноводов с дном с градиентом скорости звука и затухания и с водным слоем с возрастающей или убывающей по направлению ко дну скоростью звука в водном слое, что отражает летний либо зимний характер вертикального распределения скорости звука. Вертикальное распределение скорости звука в водном и донном слоях для двух типов осадочных отложений – ила и песка, показано на рисунке 2.

Физические параметры слоев приняты следующими: равновесная плотность дна $\rho_2=1400 \text{ кг/м}^3$ в случае ила и $\rho_2 = 2600 \text{ кг/м}^3$ в случае песка, $\rho_H = 2600 \text{ кг/м}^3$, $c_H = 2200 \text{ м/с}$. Расчет акустических характеристик дна выполнен в рамках GS+EC модели [4, 5]

Рассмотрим представленные на рисунке 3 яркостные картины и горизонтальные разрезы горизонтальной и вертикальной составляющих поля колебательной скорости в наиболее благоприятном случае для распространения звука в мелком море – песчаное дно и положительный градиент скорости звука в водном слое – приповерхностный звуковой канал.

Частота 500 Гц, распространяется 26 мод, глубина источника $z_s=8 \text{ м}$. Яркостная картина звукового давления в точности совпадает с картиной горизонтальной составляющей КС. Вблизи источника, на его оси, уровень вертикальной составляющей КС очень мал. Яркостные картины показывают формирование лучевой структуры поля с возможностью «заворота» лучей в градиентном слое с возвращением его в водный слой. Общее снижение

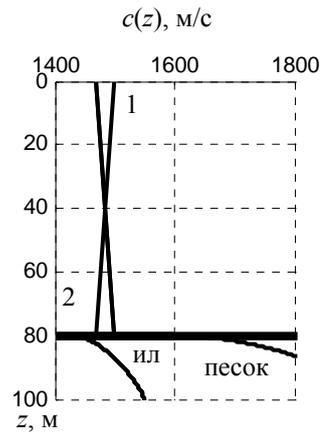


Рисунок 2. Профили скорости звука в водном слое и в дне

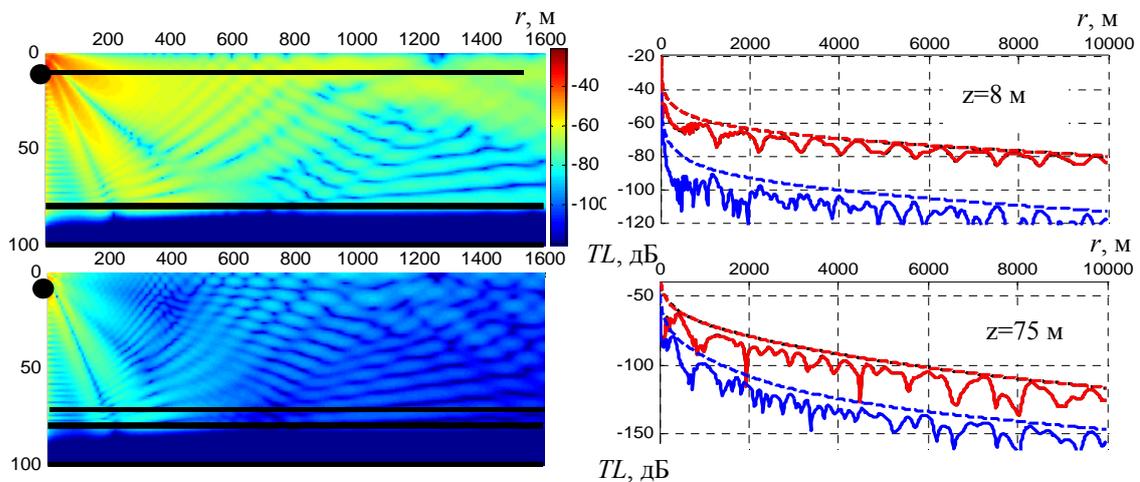


Рисунок 3. Слева - яркостные картины горизонтальной (сверху) и вертикальной (снизу) составляющих поля КС. Справа – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: поле давления (—), горизонтальной (---), вертикальной (· · ·) компоненты КС, пунктир – некогерентное сложение. Грунт – песок. Горизонтальная черная линия соответствует глубине, на которой показан разрез поля – справа

уровня поля на километровой дистанции при некогерентном сложении мод составляет: на глубине $z_s = 8$ м $TL_{p,r} \approx -60$ дБ, на глубине $z_s = 75$ м $TL_{p,r} \approx -70$ дБ. Снижение уровня поля на 10-ти километровой дистанции – в приповерхностном канале $TL_{p,r} \approx -80$ дБ, в случае приемника вне канала - $TL_{p,r} \approx -115$ дБ. Разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z как на оси канала, так и вне оси примерно одинакова, максимум ее возрастает с увеличением расстояния, и при $r = 10$ км достигает ≈ 30 дБ (считая по уровням некогерентного сложения). Разница в осредненных уровнях спада поля $TL_{p,r}$ и TL_z составляет 30 дБ на оси канала и вблизи дна.

Менее благоприятный случай для распространения звука – случай отрицательного вертикального градиента – сочетание придонного звукового канала и грунта в виде песка. Соответствующие яркостные картины акустического поля и горизонтальные разрезы показаны на рисунке 4.

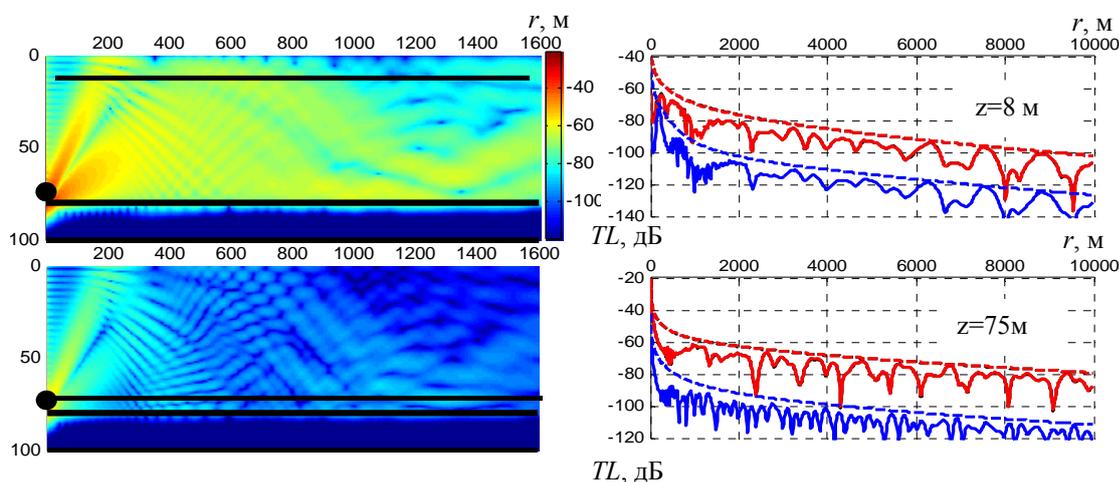


Рисунок 4. Слева – яркостные картины горизонтальной (сверху) и вертикальной (снизу) составляющих поля КС. Справа – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: поле давления (—), горизонтальной (---), вертикальной (—) компоненты КС, пунктир - некогерентное сложение. Грунт - песок

Источник расположен вблизи дна. Частота 500 Гц, распространяется 28 мод. Общее снижение уровня поля на километровой дистанции при некогерентном сложении мод составляет: на глубине $z_s = 8$ м $TL_{p,r} \approx -70$ дБ, что примерно на 10 дБ больше, чем в предыдущем случае, на глубине $z_s = 75$ м $TL_{p,r} \approx -60$ дБ. Снижение уровня поля на 10-ти километровой дистанции – в случае приемника в придонном канале $TL_{p,r} \approx -80$ дБ, в случае источника вне канала - $TL_{p,r} \approx -100$ дБ. Проявляется разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z на оси канала ≈ 30 дБ, и вне оси ≈ 25 дБ (считая по уровням некогерентного сложения). Разница в осредненных уровнях спада поля $TL_{p,r}$ и TL_z составляет 25 дБ на оси канала и 30 дБ вблизи дна.

Еще менее благоприятная ситуация для распространения акустических волн – илистое дно, но положительный градиент скорости звука. Соответствующие картины поля показаны на рисунке 5.

Частота 400 Гц, 24 моды. По горизонтальным разрезам поля на оси приповерхностного канала видно, что фактором, определяющим усредненный закон спада уровня поля при такой глубине волновода, является уже не характер дна, а ПСЗ - снижение уровня поля на километровой дистанции при некогерентном сложении составляет: на глубине $z_s = 8$ м $TL_{p,r} \approx -60$ дБ. Снижение уровня поля на 10-ти километровой дистанции – в случае приемника в приповерхностном канале $TL_{p,r} \approx -80$ дБ, в случае источника вне канала - $TL_{p,r} \approx -125$ дБ. Разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z на оси канала ≈ 30 дБ, вне оси ≈ 25 дБ (считая по уровням некогерентного сложения), интерференционная структура поля вследствие быстрого «высвечивания» высших мод значительно более сглажена. Минимум разницы $TL_{p,r}$ и TL_z вне канала значительно меньше, чем на оси канала.

Наиболее неблагоприятный случай – отрицательный градиент скорости звука и илистое дно. Соответствующие картины поля показаны на рисунке 6. Частота 400 Гц, 26 мод. Снижение уровня поля на 10-ти километровой дистанции более 150 дБ. Разница в уровнях $TL_{p,r}$ и TL_z на и вне оси канала ≈ 25 дБ.

Результаты моделирования поля потока мощности для двух типов дна – песок и ил показаны на рисунке 7.

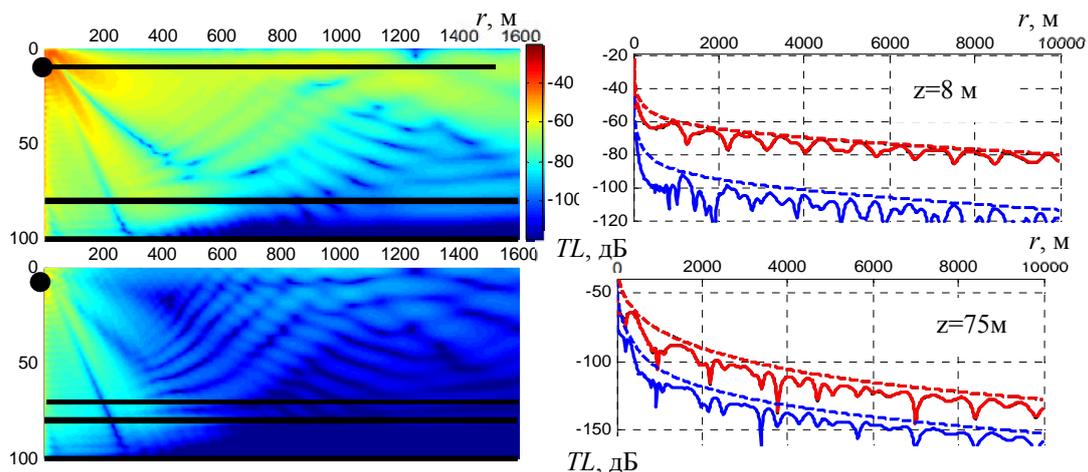


Рисунок 5. Слева - яркостные картины горизонтальной (сверху) и вертикальной (снизу) составляющих поля КС. Справа – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: поле давления (—), горизонтальной (---), вертикальной (—) компоненты КС, пунктир - некогерентное сложение. Грунт - ил

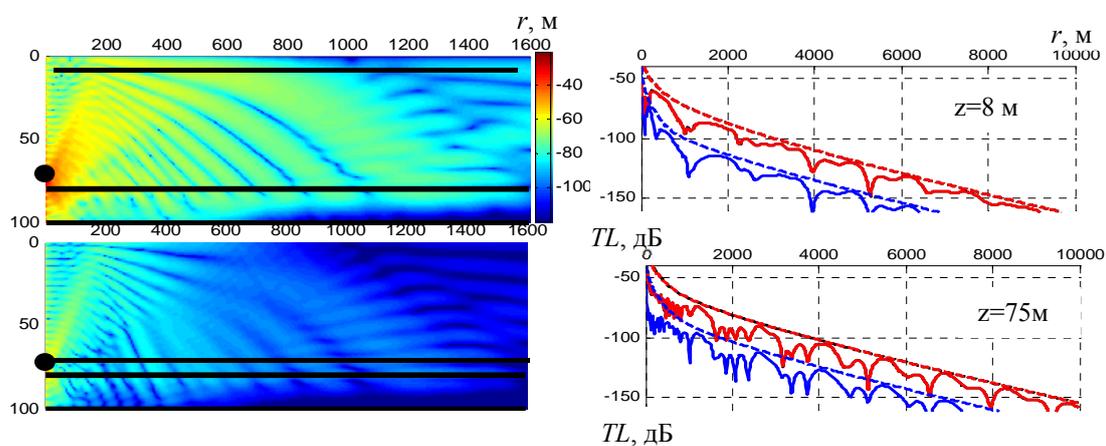


Рисунок 6. Слева - яркостные картины горизонтальной (сверху) и вертикальной (снизу) составляющих поля КС. Справа – горизонтальные разрезы полей на различных глубинах: поле давления (—), горизонтальной (---), вертикальной (—) компоненты КС, пунктир - некогерентное сложение. Грунт - ил

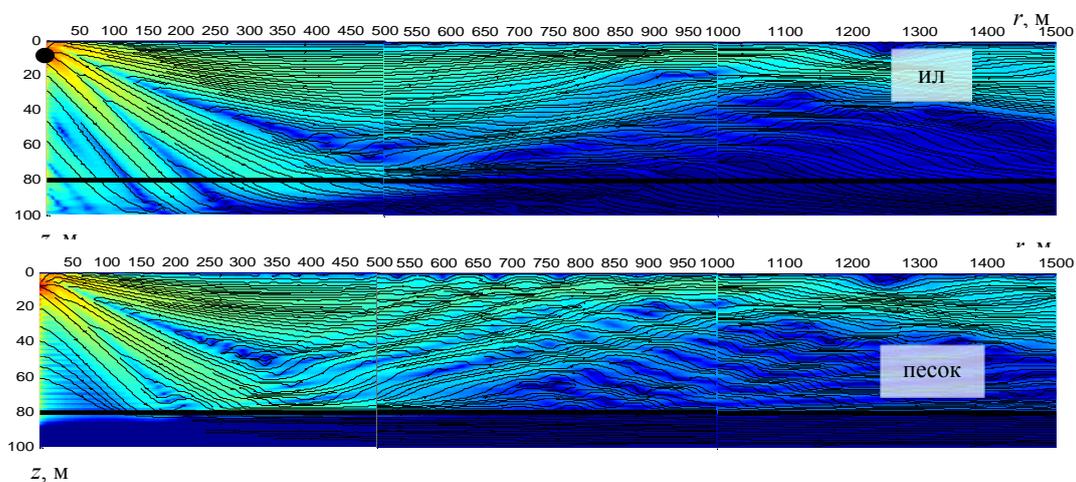


Рисунок 7. Структура поля потока мощности в волноводе с промежуточным слоем в виде ила и песка при многомодовом распространения звука (26 мод)

Как видно из рисунка 7, звуковая энергия в случае илистого дна показывает сложное поведение. С одной стороны, глубина проникновения внутрь дна оказывается больше чем в случае песчаного дна. С другой стороны, с увеличением расстояния энергия убывает быстрее.

Проведенные математические эксперименты с вариациями профиля скорости звука (положительный или отрицательный градиент) и характера дна (ил, песок), показали, что для монопольного источника, в зависимости от расположения корреспондирующих точек, разница в осредненных уровнях спада поля давления, горизонтальной компоненты КС и вертикальной компоненты КС составляют 20-30 дБ. Поскольку вертикальная компонента КС более «тихая», ее гораздо сложнее регистрировать экспериментально. Даже незначительное отклонение оси поляризации приемника u_z компоненты КС от вертикали приведет к «кроссполяризации» – регистрации вместо «тихой» вертикальной более «громкой» горизонтальной компоненты КС. Данное обстоятельство следует учитывать при экспериментах, связанных с выявлением различий в интерференционной структуре полей компонент КС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный численно-аналитический метод моделирования полей потоков мощности показывает хороший результат во всем частотном диапазоне, доступном для «волновых» расчетов. Моделирование возможно осуществлять для произвольных профилей скорости звука и различных моделей слоистого дна.

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

Список литературы / References:

1. Popper A.N., Hawkins A.D. The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2018, vol. 143, no. 1, pp. 470-488. DOI: 10.1121/1.5021594
2. Popper A.N., Hawkins A.D., Halvorsen M. B. Anthropogenic Sound and Fishes. *Research Report*, 2019, 170 p. URL: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/891-1.pdf> (date of access: 12.07.2019).
3. Ластовенко О.Р. *Скалярные и векторные акустические поля в волноводах мелкого моря*. Дис. ... к.ф.-м.н. Киев, 2013, 167 с. [Lastovenko O.R. *Scalar and vector acoustic fields in waveguides of the shallow sea*. Dis. ... Ph.D. Kiev, 2013, 167 p. (In Russ.)]
4. 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, 15(3), pp. 39-51. DOI: 10.31429/vestnik-15-3-39-51. (In Russ.)]
5. 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. 26, no. 1, pp. 77-91. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-1-77-91 (In Russ.)]

ON THE EFFECT OF SCALAR AND VECTOR COMPONENTS OF THE SOUND FIELD ON FISH AND INVERTEBRATES

Zavjalova O.S., Lastovenko O.R., Lisyutin V.A., Luchin V.L., Petrenko N.V., Rybakova K.A., Rogova O.V., Jarochenko A.A.

Sevastopol state university

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

Abstract. Underwater sound generated by human activities can potentially adversely affect aquatic animals, including invertebrates. In addition to the sound pressure field, the field of particle velocity can also have an effect. Modern biological-acoustic studies show that fish and invertebrates are sensitive not only to pressure, but also to the level of particle velocity, the vector components of the sound field. The classification of fish by their sensitivity to the components of the sound field is given. The currently accepted sound field levels of traumatic effects on fish are given. The results of modeling the vector field of the power flux in a multimode horizontal layered waveguide of the shallow sea are presented. Modeling of the power flow field is carried out “by definition”, as the product of pressure fields and field components of the particle velocity vector. The pressure and particle velocity fields are calculated using the normal mode method. A qualitative connection is established between the physical and acoustic characteristics of the layered bottom and the averaged laws of decay of the components of the fields of the particle velocity and the field of the power flux for a multimode character of sound propagation.

Key words: pressure field, particle velocity field, vector intensity field.