

# ВЛИЯНИЕ ПОКМАРКОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ

Д.В. Макаров, А.О. Холмогоров, Р.Б. Шакиров

Рассмотрена задача о распространении звука в мелководном акустическом волноводе, трасса которого пересекает покмарк – образование в форме кратера, характеризующееся активным выходом природного газа. Свойственная покмаркам высокая газонасыщенность проявляется в акустических свойствах среды как резкое снижение скорости звука в дне. Исследуется влияние покмарков на свойства распространения низкочастотного звука. Показано, что покмарк способен значительно усиливать затухание звука. Представлен метод сканирования волновода по данным измерения акустического пропагатора. Результаты сканирования указывают на возможность существования отдельных акустических пучков, не попадающих в зону покмарка. Указанные обстоятельства открывают перспективы для дистанционного обнаружения покмарков.

**Ключевые слова:** покмарк, акустика мелкого моря, волновод, пропагатор акустического поля.

## Введение

Покмарки (от англ. rockmark), представляющие собой конусовидные депрессии на поверхности морского дна, были впервые обнаружены на шельфе провинции Новая Шотландия (Канада) при проведении съемки гидролокатором бокового обзора [1]. К настоящему времени установлено, что эти структуры широко распространены в морях и озерах в интервалах глубин от 30 м до более 3000 м [2]. Изучение покмарков имеет большое фундаментальное и прикладное значение, поскольку предполагается, что выброс метана может происходить за счет разложения газовых гидратов [3]. Кроме того, эти образования представляют собой потенциальный источник газов, вызывающих парниковый эффект [4], а разложение газогидратов с выделением больших объемов газов является одной из причин, способствующих обрушению континентального склона [5].

Большая часть покмарков выявляется по результатам сейсмической и батиметрической съемок. Также сведения о покмарках могут быть получены по результатам комплекса геохимических методов (специализированный пробоотбор, определение содержания метана и гомологов в придонных водах и донных отложениях, изотопные методы, биологические). В ходе таких исследований, в частности, картируются районы с потоками метана и газогидрата-

ми, изучаются их морфоструктурные особенности, строение верхней части осадочного разреза и рельефа дна, выполняется комплексная оценка характеристик подводных газовых источников. Вместе с тем существует потребность в дистанционном обнаружении покмарков, так как современные исследования показывают, что явление дегазации дна морей и океанов гораздо масштабнее, чем это было известно ранее. Акустические методы представляются достаточно перспективным средством решения этой проблемы.

Низкочастотные акустические сигналы с частотами ниже 500 Гц стали использоваться для зондирования газонасыщенных осадков сравнительно недавно. В частности, в работах [6, 7] проводился замер концентрации газа на основании оценки скорости звука в дне. Соответствующие расчетные методы развиты в статьях [8–10]. Данные работы предполагают прямую акустическую засветку дна, например, с борта судна. Если использовать такую схему для идентификации покмарка, то расстояние между излучающей системой и покмарком не может превышать нескольких сотен метров. Для того чтобы выйти за эти пределы, необходимо использовать методы и подходы, более характерные для гидроакустической томографии протяженных океанических трасс [11,12]. Это позволит значительно упростить выявление покмарков как потенциальных областей концентрации углеводород-

ных газов и газовых гидратов. Именно это направление развивается в данной работе.

Статья построена следующим образом. Раздел 1 освещает общее описание покмарков, включая возможные механизмы их образования. В разделе 2 представлена модель акустического волновода, используемая в работе. Раздел 3 посвящен методу описания акустических полей спомощью пропагатора акустического поля. В разделе 4 этот метод используется для сканирования волновода с помощью направленных гауссовых пучков. В Заключении приводятся основные результаты работы и намечаются пути дальнейших исследований.

## 1. Покмарки

Кратероподобные структуры, или покмарки, формируются на поверхности дна, сложенного тонкозернистыми осадками морских и озерных бассейнов в результате субаквальных выходов флюидов, а именно, подземных вод или углеводородных газов [1, 13]. В плане эти объекты имеют форму, стремящуюся к окружности или овалу, если она не деформировалась за счет оползания грунтов или воздействия придонных течений [1, 14]. Размеры покмарков колеблются от нескольких метров до нескольких десятков метров при глубине 5–10 м. Образования размерами более 350 м и глубиной свыше 35 м были названы гигантскими покмарками [13]. Встречаются также покмарки, размеры которых превышают 1 км при глубине в несколько десятков метров [15].

Покмарки широко распространены в зонах перехода континент–океан и наиболее часто обнаруживаются в окраинных морях активных континентальных окраин. Покмарки являются своего рода индикаторами нефтегазоносных систем и газогидратных скоплений. В морях Востока России покмарки обнаружены в Японском, Охотском, Беринговом, Чукотском, Восточно-Сибирском морях и море Лаптевых. Одни из наиболее детально изученных покмарков находятся в Японском и Охотском морях, хорошо изучены покмарки в озере Байкал. С ними ассоциируются наиболее активные фокусированные потоки метана в виде струйных истечений пузырей газа из донных отложений в толщу вод, карбонатная минерализация, очаги бентосных видов организмов.

Источники газов могут быть различными. В современных морских алевропелитовых осадках метан образуется при переработке органического вещества. Иногда в составе флюидов присутствует двуокись углерода, вероятно, образующаяся за счет биологического метаболизма и при анаэробном окислении

метана. Газонасыщенные пористые современные морские отложения широко развиты на дне морей, на что указывает затухание акустического сигнала в приповерхностном геологическом разрезе [16].

В гляциальных шельфах, где отложения обеднены органическим веществом, появление покмарков часто связывают с выходами глубинных термальных газов, мигрирующих к поверхности дна по тектоническим разломам [17, 18]. Предполагаются как вертикальная диффузия газов, так и их латеральная миграция в области повышенной проницаемости.

Согласно различным гипотезам [13, 14], выбросы газа происходят либо при относительно постоянном или периодичном подтоке, либо эпизодически в результате воздействия катастрофических явлений, таких как землетрясение или аномальный шторм, приводящих к резкому перемещению осадков в виде оползней. К примеру, исследования, проведенные на шельфе Северной Калифорнии и в зал. Патрас (Греция), показали, что спусковым механизмом для выбросов газа послужили именно землетрясения [19].

Существуют также теории образования морфологически сходных с покмарками кратерообразных форм без участия газовых выбросов за счет воздействия льда или подтока грунтовых вод [14, 20].

По литературным данным, в Балтийском море метановые кратеры выявлены в районах распространения газонасыщенных осадков и повышенных содержаний метана в придонной воде в пределах Гданьской, Арконской и Готландской впадин [21].

Кратероподобные структуры диаметром до 150 м, которые, вероятнее всего, являются покмарками, описаны в западной части Финского залива в экономической зоне Финляндии. В российской части Финского залива в 1989–2000 гг. при проведении ВСЕГЕИ геологосъемочных работ методом непрерывного сейсмоакустического профилирования в рельефе и геологическом разрезе четвертичных отложений выявлено около 25 воронкообразных структур [22]. Их горизонтальный размер не превышает 10–20, а глубина 1–2 м. Они приурочены к зонам устойчивого накопления голоценовых илов с высоким (более 5%) содержанием органического вещества. Наибольшая концентрация покмарков отмечается на западе российской зоны залива, между островами Готланд и Мощный (рис. 1, 2). Толща литориновых и постлиториновых отложений в центральных частях седиментационных бассейнов достигает мощности 10 м и более, что создает условия для накопления в осадке биогенных газов.

Восточный склон острова Сахалин с 80-х годов прошлого столетия известен как район, где происхо-



Рис. 1. Покмарки (район о-ва Гогланд) на записи непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП). Совместный рейс ВСЕГЕИ и Геологической службы Финляндии на НИС «Аранда» (2009 г.) [22].

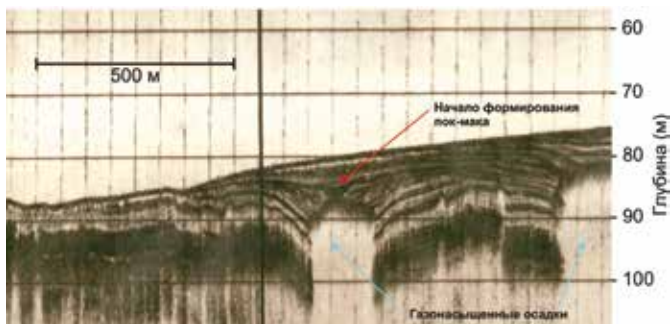


Рис. 2. Газонасыщенные осадки и начальная стадия образования покмарка на профиле НСП (данные ВСЕГЕИ, 1991 г.) [22]

дит активная разгрузка метана [23]. Покмарки были обнаружены здесь только после картирования морского дна многолучевыми эхолотами в рейсах НИС «Академик М.А. Лаврентьев» [24] и «Зонне» [25]. По материалам батиметрической и сейсмоакустической съемки, выполненных в 1998–2004 гг., впервые дано описание морфологии покмарков, рассмотрен характер их распределения вдоль восточного склона о-ва Сахалин и приведены данные об их активности.

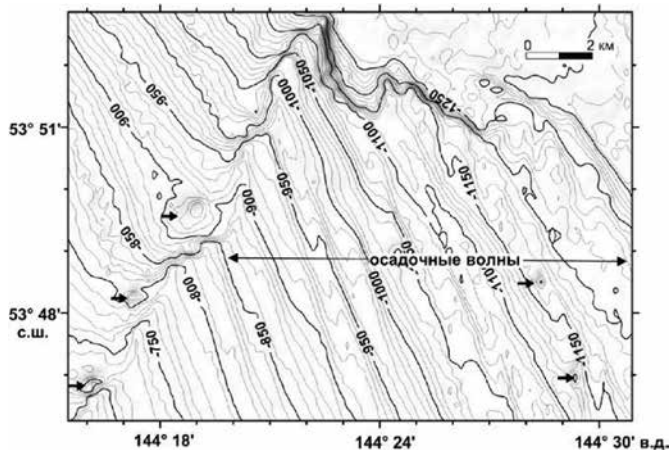


Рис. 3. Батиметрическая карта зоны разлома Лаврентьева. Наиболее крупные депрессии помечены стрелками. Сечение изобат 10 м. Северо-восточный склон Сахалина [26]

В восточной части Финского залива были обнаружены покмарки при проведении непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) высокого разрешения с борта НИС «Аранда». Использовался акустический комплекс с пьезокерамическим излучателем (рабочая частота 12 кГц). Запись акустических данных производилась в цифровом виде на приборно-аппаратурный комплекс Meridata MD DSS sonar system [22].

## 2. Модель акустического волновода

Рассмотрим двухслойный акустический волновод в мелком море, с водным слоем сверху и осадочным снизу.

Звуковое поле в волноводе описывается уравнением Гельмгольца [27]:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] + k_0^2 n^2 \Psi = 0, \quad (1)$$

где  $z$  – глубина,  $r$  – горизонтальная координата,  $\Psi(r, z)$  – звуковое поле,  $k_0$  – опорное волновое число, связанное с частотой звука  $f$  с помощью формулы  $k_0 = 2\pi f / c_0$ ,  $n(r; z)$  – показатель преломления звуковых волн.

На поверхности воды акустическое поле удовлетворяет граничному условию Дирихле:

$$\Psi|_{z=0} = 0. \quad (2)$$

Снизу осадочный слой граничит со слоем твердых пород, поэтому на нижней границе  $z = L$  мы имеем граничное условие Неймана:

$$\frac{d\Psi}{dz} \Big|_{z=L} = 0. \quad (3)$$

Условие на границе раздела между водным и осадочным слоями,  $z = h$ , выглядит следующим образом:

$$\Psi|_{z=h-0} = \Psi|_{z=h+0}, \quad \frac{1}{\rho_{\text{wat}}} \frac{d\Psi}{dz} \Big|_{z=h-0} = \frac{1}{\rho_{\text{sed}}} \frac{d\Psi}{dz} \Big|_{z=h+0}, \quad (4)$$

где  $\rho_w$  и  $\rho_{\text{sed}}$  – значения плотности в воде и в осадочном слое, соответственно. В дальнейшем мы будем использовать упрощенную модель, когда плотность осадочного слоя считается постоянной. В действительности может наблюдаться существенная неоднородность плотности в верхнем слое газонасыщенных осадков [7]. Исследование влияния этого фактора планируется в последующих работах.

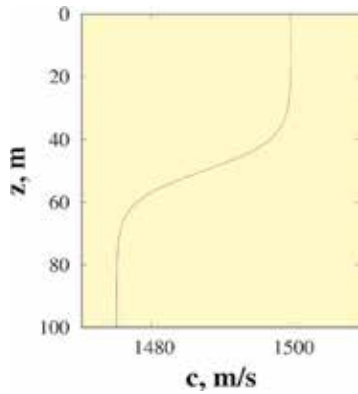


Рис. 4. Профиль скорости звука в водном слое

В работе рассматривается идеализированная модель подводного акустического волновода, состоящая из трех сегментов: сегмент, соответствующий покмарку, расположен между двух сегментов, соответствующих опорному волноводу без покмарков.

Поглощение звука в водном слое является слабым, и мы им в данной работе пренебрегаем. Считая каждый из волноводных сегментов горизонтально-однородным, мы можем представить показатель преломления в следующем виде:

$$n(z) = \frac{c_0}{c(z)} + 2i\alpha(f)\Theta(z - h), \quad (5)$$

где  $\Theta(z)$  — функция Хэвисайда. Глубина дна  $h$  взята равной 100 м для опорного волновода и 105 м для сегмента, соответствующего покмарку. Функция  $\alpha(f)$  определяет частотную зависимость затухания в осадочном слое. В настоящей работе мы используем акустическую модель осадочного слоя, соответствующую условиям Восточно-Китайского моря, где был получен закон  $\alpha(f) \approx 0.42 \times 10^{-6} f^2$  [28].

Профиль скорости звука в водном слое соответствует придонному звуковому каналу и задается выражением [29, 30]:

$$c(z) = \begin{cases} c_0 - \frac{\Delta_c}{2} \left( 1 + \tanh \frac{z - z_c}{\Delta_z} \right), & 0 \leq z < h, \\ c_b, & h \leq z \leq L, \end{cases} \quad (6)$$

где  $c_0 = 1500$  м/с,  $\Delta_c = 25$  м/с,  $z_c = 50$  м,  $\Delta_z = 10$  м (см. рис. 2). Мы будем считать, что формула выполняется для всех сегментов волновода.

Мы рассматриваем две модели волновода, назовем их Модель I и Модель II. В обеих из них расстояние между излучающей и приемной антеннами равно 10 км. Различия между моделями касаются свойств дна. Модель I характеризуется следующими параметрами:

- зона покмарка расположена между точками  $r_1 = 2$  км и  $r_2 = 2.5$  км;
- скорость звука в дне равна 1475 м/с в зоне покмарка и 1700 м/с вне ее;
- плотность дна равна 1500 кг/м<sup>3</sup> в зоне покмарка и 1850 кг/м<sup>3</sup> вне ее.

Параметры Модели II следующие:

- зона покмарка расположена между точками  $r_1 = 2$  км и  $r_2 = 3$  км;
- скорость звука в дне равна 1400 м/с в зоне покмарка и 1600 м/с вне ее;
- плотность дна равна 1400 кг/м<sup>3</sup> в зоне покмарка и 1600 кг/м<sup>3</sup> вне ее.

В Модели I скорости звука в покмарке и в прилегающем к нему водном слое совпадают. Согласно результатам работы [8], данный случай предполагает наиболее сильное затухание звука в области покмарка. Модель II характеризуется большей протяженностью сегмента покмарка вдоль волновода.

Используя подстановку  $\Psi = \sqrt{k_0 r} \Phi$  и пренебрегая связью различных азимутальных составляющих акустического поля, мы можем свести исходную трехмерную задачу к двумерной. Звуковое поле внутри отдельного горизонтально-однородного сегмента может быть представлено в виде суперпозиции нормальных мод:

$$\Psi(r, z) = \sum_{m=1}^M a_m e^{i(k_{rm} + i\alpha_m)r} \Psi_m(z) + \text{с.с.} \quad (7)$$

Нормальные моды и соответствующие им волновые числа являются решениями задачи Штурма–Лиувилля:

$$\rho(z) \frac{d}{dz} \left[ \frac{1}{\rho(z)} \frac{d\Psi_m(z)}{dz} \right] + [k_0^2 n^2(z) - k_{rm}^2] \Psi_m(z) = 0 \quad (8)$$

с граничными условиями (2)–(3) и условием непрерывности на дне (4). Коэффициенты разложения  $a_m$  определяются по формуле:

$$a_m = \int_{z=0}^L \frac{\Psi_m^*(z) \Psi(r = r_i, z)}{\rho(z)} dz, \quad (9)$$

где  $r_i$  — горизонтальная координата начала  $i$ -го сегмента.

На рис. 5 представлены зависимости коэффициента затухания акустического поля от номера моды. Очевидно, что практически во всех случаях покмарк усиливает затухание на 2–3 порядка, и ростом частоты звука этот эффект усиливается. С учетом того, что протяженность зоны покмарка может быть достаточно велика, это дает основание ожидать существен-

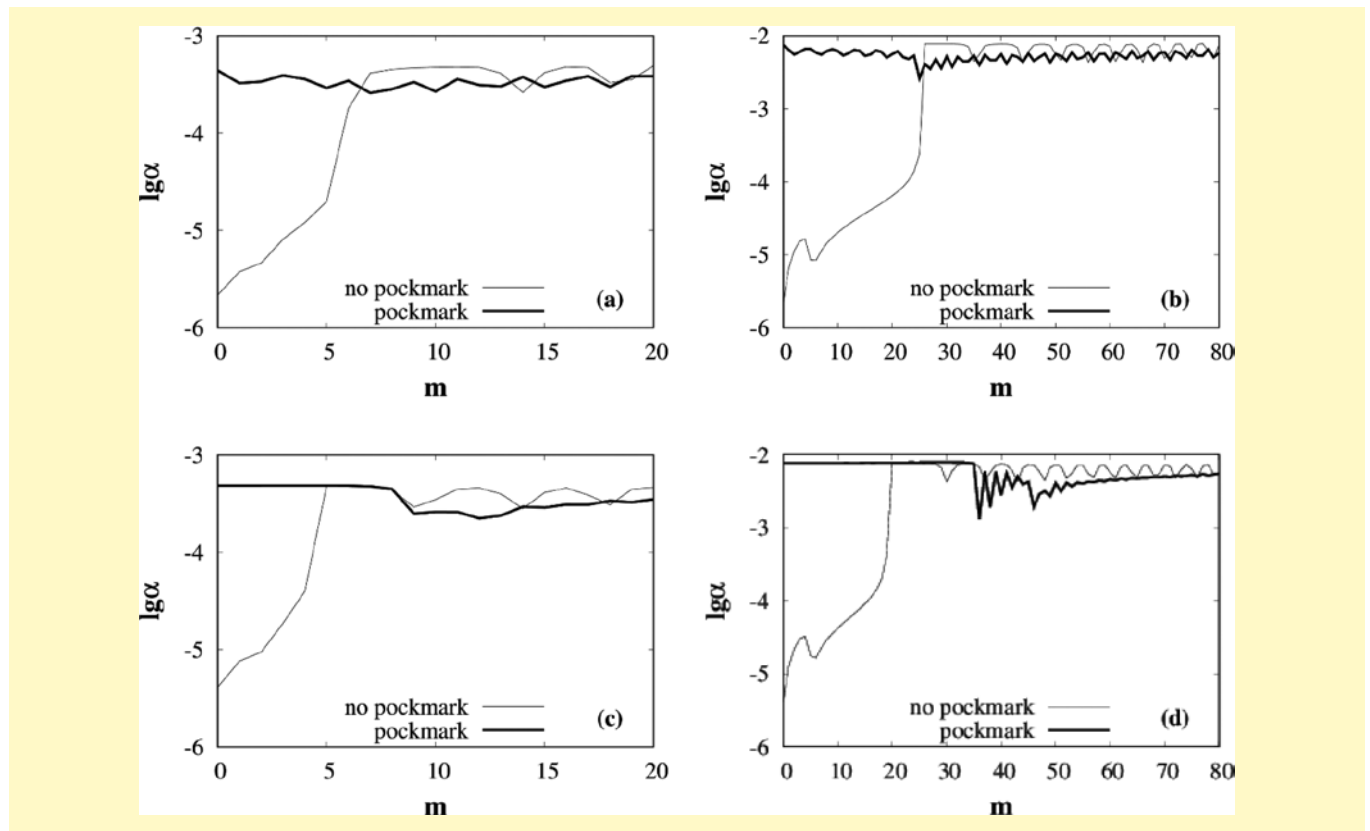


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания от номера моды. Панели (а) и (b) соответствуют Модели I, панели (с) и (d) – Модели II. Частота звука: 100 Гц для панелей (а) и (с) и 400 Гц для панелей (b) и (d)

ного влияния покмарка на структуру принимаемого сигнала.

### 3. Пропагатор акустического поля

Проведение гидроакустической томографии предполагает сканирование океанической среды с помощью последовательности акустических сигналов. При использовании вертикальной излучающей антенны мы можем варьировать пространственную конфигурацию излучаемых акустических полей, тем самым отыскивая условия, соответствующие, например, максимальной засветке искомой неоднородности. К недостаткам такого подхода можно отнести как технические трудности, связанные с созданием и эксплуатацией вертикальной излучающей антенны, так и методические проблемы, обусловленные тем, что число требуемых для эффективного зондирования среды сигналов может оказаться чрезмерно большим. Здесь необходимо принимать во внимание вредоносность низкочастотного звука высокой мощности для рыб и морских млекопитающих [31, 32].

В работе [33] был предложен альтернативный подход, основанный на прямом измерении пропагатора акустического поля. Такое измерение мож-

но осуществить с помощью одного-единственного источника звука, последовательно опуская его на заданные глубины. Пропагатор акустического поля  $\hat{G}$  определяется выражением [34–40]:

$$\Psi(r'', z) = \hat{G}(r'', r')\Psi(r', z). \quad (10)$$

Согласно этому определению, пропагатор представляет собой некий универсальный оператор эволюции, описывающий трансформацию любого волнового пакета при прохождении волноводного сегмента между  $r = r'$  и  $r = r''$ . Сам по себе пропагатор не зависит от формы начального волнового пакета. При этом он включает в себя практически полную информацию об акустических свойствах трассы, в том числе свойства рассеяния и дисперсионные характеристики.

Используя базис нормальных мод, мы можем представить пропагатор в виде конечной матрицы с элементами:

$$G_{mn}(r'', r') = \int_{z=0}^L \Psi_m(z)\hat{G}(r'', r')\Psi_n(z)dz, \quad (11)$$

где  $\hat{G}(r'', r')\Psi_n(z)$  – профиль акустического поля при  $r = r''$ , если при  $r = r' < r''$  оно описывалось  $n$ -й модой  $\Psi_n(z)$ . Тогда пространственная изменчивость

акустического поля описывается как соответствующие изменения вектора модовых амплитуд:

$$\mathbf{a}(r'') = \mathbf{G}(r'', r')\mathbf{a}(r'). \quad (12)$$

При использовании базиса нормальных мод пропагатор горизонтально-однородного волновода выражается в виде диагональной матрицы с элементами

$$G_{mn}(r'', r') = \delta_{mn} e^{(ik_m - \alpha_m)(r'' - r')}, \quad (13)$$

где  $\delta_{mn}$  – символ Кронекера. В случае сегментированного волновода, в котором разным сегментам соответствуют разные наборы мод, результирующий пропагатор выражается формулой [40, 41]:

$$\mathbf{G}(r'', r') = \prod_{j=1}^J \mathbf{G}_{j-j+1}(r_{j-j+1}, r_{j-j}) \mathbf{S}_{j-j+1}, \quad (14)$$

где  $\mathbf{G}_j$  – пропагатор для  $j$ -го сегмента волновода,  $\Delta r_j$  – длина  $j$ -го сегмента,  $\mathbf{S}_j$  – матрица, описывающая преобразование мод при переходе между  $j-1$ -м и  $j$ -м сегментами,

$$S_{mn} = \int_{z=0}^L \Psi_m^{(j)*} \Psi_n^{(j-1)} dz, \quad (15)$$

$\Psi_m^{(j)}(z)$  обозначает моды  $j$ -го сегмента. Матрица  $\mathbf{S}_1$  описывает преобразование между модами, использованными для представления начального состояния, и модами первого сегмента. Если таковые совпадают, эта матрица является диагональной единичной матрицей. В случае используемых в данной работе Моделей I и II, состоящих из трех сегментов, формула (14) принимает вид:

$$\mathbf{G}(R, 0) = \mathbf{G}_0(R, r_2) \mathbf{S}^T \mathbf{G}_p(r_2, r_1) \mathbf{S} \mathbf{G}_0(r_1, 0), \quad (16)$$

где  $\mathbf{G}_0$  – матрица пропагатора опорного волновода, соответствующего окружению покмарка, и  $\mathbf{G}_p$  – матрица пропагатора вдоль покмарка,  $\mathbf{S}$  – матрица межмодовой трансформации при переходе между сегментами.

#### 4. Сканирование волновода направленными гауссовыми пакетами

Имея в распоряжении информацию о пропагаторе акустического поля, мы можем без труда рассчитать акустическое поле для любого выбранного нами начального состояния, не проводя дополнительных посылок сигналов. Это позволяет провести сканирование волновода зондирующими волновыми пучками исключительно с помощью компьютерной симуляции. В качестве таких пучков могут быть выбраны направленные гауссовы пучки:

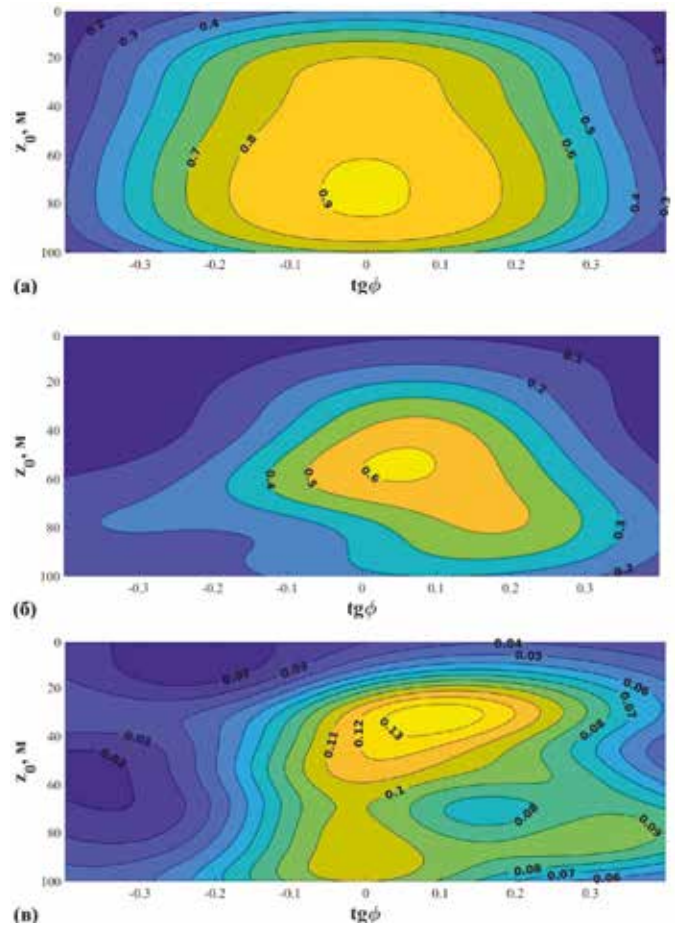


Рис. 6. Результаты сканирования волновода направленными гауссовыми пучками с частотой 100 Гц: цветовая модуляция описывает зависимость коэффициента прохождения пучка от угла и глубины испускания. Панель (а) соответствует волноводу, трасса которого не пересекает покмарк, панель (б) – данным для Модели I, панель (в) – данным для Модели II

$$\psi(z; p_0, z_0) = A \exp \left[ -\frac{(z - z_0)^2}{4\sigma^2} + ik_0 p(z - z_0) \right], \quad (17)$$

где  $\sigma$  – ширина начального пучка по глубине, а параметр  $p$  характеризует его направление в вертикальной плоскости. Подобного рода пакеты характеризуются минимальной пространственной расходимостью, а геометрия их распространения наиболее всего близка к траектории луча, испускаемого с глубины  $z = z_0$  под углом  $\phi = \arctg p$  к горизонтальной плоскости [42].

Введем коэффициент прохождения пучка:

$$\kappa = \frac{1}{A} \int |\Psi(R, z)|^2 dz. \quad (18)$$

Зададимся целью найти зависимость  $\kappa$  от параметров пучка  $p$  и  $z_0$ . На рис. 6 представлены результаты моделирования для тональных сигналов с частотой 100 Гц. Мы видим, что в отсутствие покмарка

присутствует обширная область в параметрическом пространстве, соответствующая малым потерям на распространение. Максимум коэффициента прохождения соответствует наинизшим модам, распространяющимся в придонном звуковом канале. Модели с покмарками демонстрируют качественно иное поведение. Как и следовало ожидать, покмарк приводит к резкому росту потерь на распространение. Это особенно ощутимо в случае Модели II, данные для которой представлены на рис. 6 (в). Особый интерес вызывает смещение максимума прохождения из придонного канала на меньшие глубины. Природа этого эффекта становится понятной из рис. 7, где изображено пространственное распределение потерь на распространение (transmission loss), определяемых с помощью хорошо известного соотношения

$$TL=20\lg\frac{|\Psi(r,z)|}{A^{0,5}}. \quad (19)$$

Как следует из рис. 7 (а), траектория гауссова пучка, испущенного из «пятна проходимости» на рис. 6 (в), проложена таким образом, что он практически не соприкасается с зоной покмарка, которая характеризуется резким усилением проникновения звука в осадочный слой. Этот пучок практически «пе-

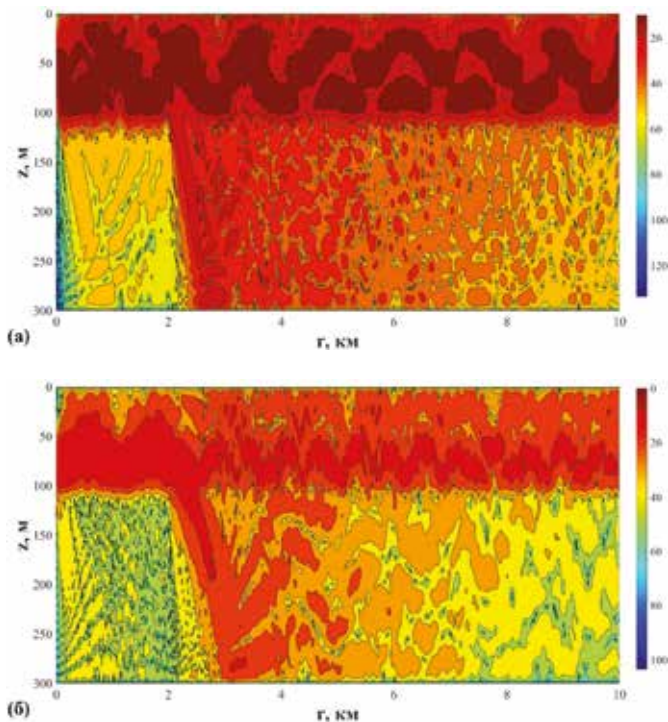


Рис. 7. Зависимость потерь на распространение TL от пространственных координат для Модели I и тонального сигнала с частотой 100 Гц. Рис.6 (а) соответствует гауссову пучку с  $p = 0.07$  и  $z_0 = 55$  м, что соответствует «пятну проходимости» на рис. 6(б). Рис. 6(б) соответствует гауссову пучку, преимущественно распространяющемуся в придонном звуковом канале

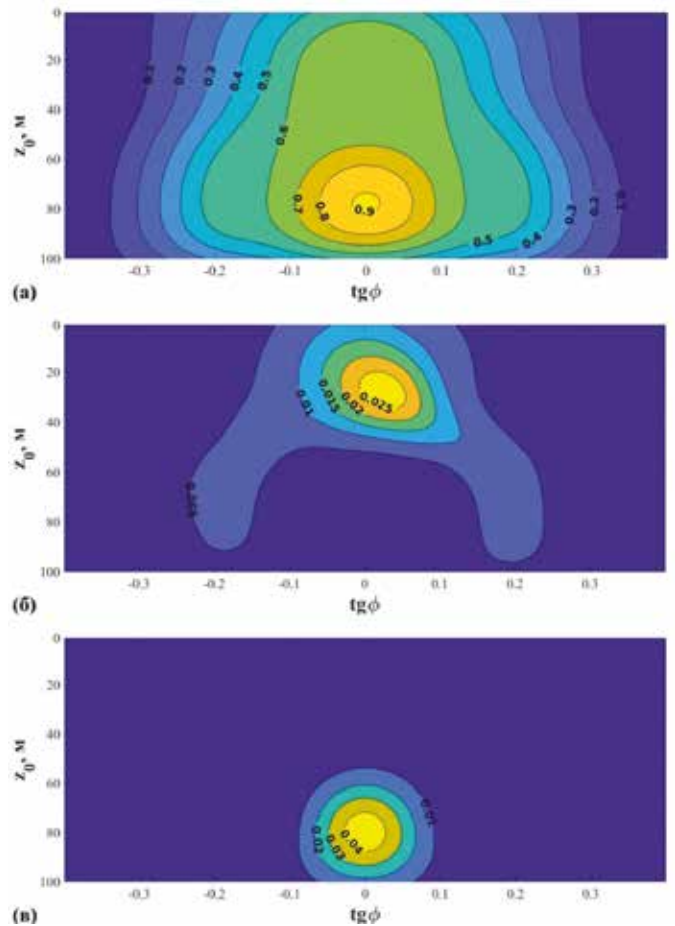


Рис. 8. Результаты сканирования волновода направленными гауссовыми пучками с частотой 400 Гц: цветовая модуляция описывает зависимость коэффициента прохождения пучка от угла и глубины испускания. Панель (а) соответствует волноводу, трасса которого не пересекает покмарк, панель (б) – данным для Модели I, панель (в) – данным для Модели II

репрыгивает» покмарк, что не удастся сделать пучку, испущенному параллельно горизонтальной плоскости из придонного звукового канала (см. рис. 7(б)) и испытывающему из-за этого существенные потери.

Следует отметить, что «перепрыгивающий» гауссов пучок соответствует относительно высоким модам волновода, которые испытывают значительное затухание даже в отсутствие покмарка. Это обстоятельство становится особенно существенным с повышением частоты сигнала. Данные сканирования волновода тональными сигналами с частотой 400 Гц свидетельствуют о том, что такой пучок оказывается неспособен преодолеть километровую зону покмарка в Модели II (см. рис. 8(в)). В то же время в Модели I с меньшей протяженностью покмарка именно он имеет наибольший коэффициент прохождения (см. рис. 8(б)). На рис. 9 изображено распределение потерь на распространение для него и для пучка, распространяющегося в придонном канале.

Заметим, что пучок, распространяющийся в придонном канале, несет львиную долю потерь именно при прохождении покмарка, в то время как пучок, «перепрыгивающий» его, несет существенные потери при каждом отражении от дна и вне зоны покмарка.

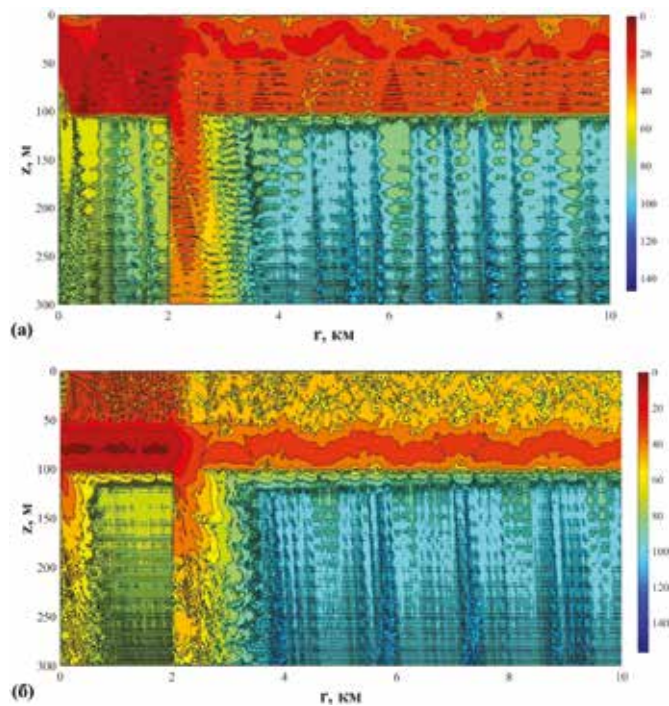


Рис. 9. Зависимость потерь на распространение TL от пространственных координат для Модели I и тонального сигнала с частотой 400 Гц. Панель (а) соответствует гауссову пучку с  $p = 0.07$  и  $z_0 = 30$  м, что соответствует «пятну проходимости» на рис. 8(б). Панель (б) соответствует гауссову пучку, преимущественно распространяющемуся в придонном звуковом канале

## Заключение

Результаты представленной работы свидетельствуют о достаточно сильном влиянии покмарков на картину распространения низкочастотного звука в мелководных акваториях, характеризующихся наличием придонного звукового канала. Данное обстоятельство дает основания рассматривать низкочастотное акустическое сканирование как достаточно перспективный метод дистанционного обнаружения покмарков. Осуществляя такое сканирование посредством измерения пропагатора акустического поля, мы получаем достаточно полный объем о свойствах рассматриваемой трассы. В частности, мы можем идентифицировать пучки, минуя покмарк, не попадая в него. Поскольку такие пучки имеют вполне определенную геометрию распространения, достаточно близкую к лучевой, их выделение может позволить не только установить сам факт присутствия покмарка вдоль сканируемой трассы, но и найти вероятное его расположение.

Дальнейшее развитие данной работы, по всей видимости, должно быть связано с исследованием более реалистичных моделей среды, которые должны учитывать, например, зависимость концентрации газов от глубины, а также горизонтальную рефракцию [43, 44]. Кроме того, целесообразно исследовать возможность дистанционного сканирования с помощью импульсных сигналов.

Исследования частично поддержаны грантами РФФИ 20-55-12010; 20-55-50005 и грантом Президента РФ МК МК-357.2021.1.5. Работа выполнена в рамках госбюджетных тем НИР с регистрационными номерами 121021500055-0 и АААА-А19-119122090009-2. Часть работы выполнена по госбюджетной тематике ТОИ ДВО РАН «Моделирование разномасштабных динамических процессов в океане» (№ 0211-2021-0009).

## ЛИТЕРАТУРА

1. King L.H., MacLean B. Pockmarks on the Scotian Shelf // Geological Society of America Bulletin. 1970. Vol. 81. P. 3142–3148.
2. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge University Press, 2007. 475 p.
3. Kennett J., Cannariato K.G., Hendy I.L. et al. Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: the Clathrate Gun Hypothesis. Washington DC: American Geophysical Union, 2003. 202 p.
4. Dickens G.R.M., Castillo M., Walker J.C.G. A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate // Geology. 1997. Vol. 25. P. 259–262.
5. Henriot J.-P., Mienert J. (ed.). Gas hydrates – Relevance to world margin stability and climatic change: Geological society [London] Special Publication 137. 1998. 338 p.
6. Katsnelson B.G., Katsman R., Lunkov A., Ostrovsky I. Acoustical methodology for determination of gas content in aquatic sediments, with application to Lake Kinneret, Israel, as a case study // Limnology and Oceanography: Methods. 2017. Vol. 15. P. 531–541.
7. Uzhangsky E., Katsnelson B.G., Lunkov A., Ostrovsky I. Spatial and temporal variability of free gas content in shallow sediments: Lake Kinneret as a case study // Geo-Marine Lett. 2020. Vol. 40. P. 491–505.
8. Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. Затухание звука в мелководных акваториях с газонасыщенным дном // Акуст. журн. 2015. Т. 61, № 1. С. 90–100.



9. Григорьев В.А., Петников В.Г., Шатравин А.В. Звуковое поле в мелководном волноводе арктического типа с дном, содержащим газонасыщенный осадочный слой // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63, № 4. С. 389–405.
10. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терёхина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64, № 3. С. 342–358.
11. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring // *Deep Sea Res.* 1979. Vol. 26, No. 2. P. 123–161.
12. Макаров Д.В., Коньков Л.Е., Петров П.С. Влияние океанических синоптических вихрей на длительность модовых акустических импульсов // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2016. Т. 59, № 7. С. 638–654.
13. Kelley J.T., Dickson S.M., Belknap D.F. et al. Giant sea-bed pockmarks: evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine // *Geology.* 1994. Vol. 22. P. 59–62.
14. Hovland M., Judd A. Seabed pockmarks and seepages: impact on geology, biology and the marine environment. London: Graham & Trotman, 1988. 293 p.
15. Long D., Lammers S., Linke P. Possible hydrate mounds within large sea-floor craters in the Barents Sea // *Gas Hydrates: Relevance to Word Margin Stability and Climate Change* / Henriot J.P., Mienert J. (ed.) Geological Society of London, 1998. P. 223–237. Special Publication; Vol. 137
16. Schubel J.R. Gas bubbles and the acoustically impenetrable, or turbid, character of some estuarine sediments // *Natural Gases in Marine Sediments.* New York: Plenum Press, 1974. P. 275–298.
17. Soderberg P., Floden T. Gas seepages, gas eruptions and degassing structures in the seafloor along the Stromna tectonic lineament in the crystalline Stockholm Archipelago, east Sweden // *Continent. Shelf Res.* 1992. Vol. 12, N 10. P. 1157–1171.
18. Chand S. et al. Gas hydrate stability zone modeling in areas of salt tectonics and pockmarks of the Barents Sea suggest an active hydrocarbon venting system / Chand S., Mienert J., Andreassen K., Knies J., Plassen L., Fotland B. // *Marine and Petroleum Geology.* 2008. Vol. 25. P. 625–636.
19. Field M., Jennings A.E. Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake // *Marine Geol.* 1987. Vol. 77. P. 39–51.
20. Hammer O., Webb K.E. Piston coring of Inner Oslofjord Pockmarks, Norway: constraints on age and mechanism // *Norwegian J. of Geol.* 2010. Vol. 90. P. 79–91.
21. Геодекян А.А., Троцюк В.Я. Газовые кратеры на дне Балтики – индикаторы процессов миграции углеводородов из недр // *Геоакустические и газолитогеохимические исследования в Балтийском море. Геологические особенности разгрузки флюидных потоков / под ред. А.А. Геодекяна, В.Я. Троцюка, А.И. Блажичина.* М.: ИО АН СССР, 1990. С. 6–11.
22. Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Григорьев А.Г., Пименов Н.В., Амантов А.В., Кропачев Ю.П., Неевин И.А. Геолого-геоморфологические условия пок-маков в восточной части Финского залива // *Региональная геология и металлогения.* 2013. № 54. С. 25–37.
23. Обжиров А.И. История исследования газогидратов в Охотском море // *Подводные исследования и робототехника.* 2006. № 2. С. 72–81.
24. KOMEX Cruise Report RV «Akademik M.A. Lavrentiev» Cruise 29, Leg I and Leg II / Biebow N., Kulinich R., Baranov B. (Eds.). Kiel, 2003. 176 p. (GEOMAR Report 110)
25. Cruise Report SO178-KOMEX. Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea / Dullo W.-Chr., Biebow, N. Georgeleit, K. (Eds.). Kiel, 2004. 125 p. (GEOMAR Report)
26. Баранов Б.В., Дозорова К.А., Саломатин А.С. Покмарки восточного склона острова Сахалин // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* 2011. № 2, вып. 18. С. 31–43.
27. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.Л. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 369 с.
28. Zhou J.-X., Zhang X.-Z., Knobles D. Low-frequency geoacoustic model for the effective properties of sandy seabottoms // *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 125, N 5. P. 2847–2866.
29. Макаров Д.В. Алгоритм реконструкции акустического поля по данным точечных измерений // *Подводные исследования и робототехника.* 2018. Т. 26, № 2. С. 62–67.
30. Макаров Д.В. Применение метода дискретного представления переменных для формирования амплитудно-фазовых распределений поля на вертикальной антенной решетке в волноводе // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67, № 4. С. 413–430.
31. Gailey G., Sychenko O., McDonald T., Racca R., Rutenko A., Bröker K. Behavioural responses of western gray whales to a 4-D seismic survey off northeastern Sakhalin Island, Russia // *Endangered Species Research.* 2016. Vol. 30. P. 53–71.
32. Рутенко А.Н., Гриценко В.А., Ковзель Д.Г., Манульчев Д.С., Фершалов М.Ю. Методика оценки параметров измеренных на сахалинском шельфе акустических импульсов для многофакторного анализа их влияния на серых китов // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65, № 5. С. 662–674.
33. Макаров Д.В., Аллилуев А.Д. Об экспериментальном определении пропегатора акустического поля // *Подводные исследования и робототехника.* 2021. Т. 35, № 1. С. 80–84.
34. Makarov D.V., Kon'kov L.E., Uleysky M.Yu. Level spacing statistics in a randomly-inhomogeneous acoustic waveguide // 2010. e-print arXiv 1008.3037 [nlin.CD] (2010).
35. Hegewisch K.C., Tomsovic S. Random matrix theory for underwater sound propagation // *Europhys. Lett.* 2012. Vol. 97, No 3. 34002.
36. Вировлянский А.Л., Макаров Д.В., Пранц С.В. Лучевой и волновой хаос в подводных акустических волноводах // *Успехи физических наук.* 2012. Т. 182, № 1. С. 19–48.
37. Makarov D.V., Kon'kov L.E., Uleysky M.Yu., Petrov P.S. Wave chaos in a randomly inhomogeneous waveguide: spectral analysis of the finite-range evolution operator // *Phys. Rev. E.* 2013. Vol. 87, No 1. 012911.
38. Hegewisch K.C., Tomsovic S. Constructing acoustic timefronts using random matrix theory // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. Vol. 134, No 4. P. 3174–3184.
39. Makarov D. Random matrix theory for low-frequency sound propagation in the ocean: a spectral statistics test // *J. Theor. Comput. Acoust.* 2018. Vol. 26. N 1. 185002.
40. Makarov D.V. Random matrix theory for an adiabatically-varying oceanic acoustic waveguide // *Wave Motion.* 2019. Vol. 90. P. 205–217.
41. Makarov D.V., Komissarov A.A. Modelling of sound propagation in the ocean using the matrix propagator // *Proc. Mtg. Acoust.* 2020. Vol. 055004.
42. Макаров Д.В. Об измерении углов прихода с помощью вертикальной антенны // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63, № 6. С. 637–645.
43. Petrov P.S., Petrov P.N. Asymptotic solution for the problem of sound propagation in a shallow sea with the bathymetry described by a parametric quadratic function // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. Vol. 146. P. 1943–1952.
44. Petrov P.S., Ehrhardt M., Tyschenko A.G., Petrov P.N. Wide-angle mode parabolic equations for the modelling of horizontal refraction in underwater acoustics and their numerical solution on unbounded domains // *J. Sound Vib.* 2020. Vol. 484. 115526.

## Об авторах

**МАКАРОВ Денис Владимирович**, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская 43

**Область научных интересов:** акустика океана, теория нелинейных колебаний и волн, квантовая оптика, статистическая радиопизика, теория хаоса

**E-mail:** makarov@poi.dvo.ru

**Телефон:** +7 (423) 2313081

**ORCID ID:** 0000-0002-2568-8927

**ХОЛМОГОРОВ Андрей Олегович**, аспирант

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская 43

**Область научных интересов:** геология нефти и газа, фундаментальные проблемы геоэкологии в геологии, геохимия, морская геология, литология и геохимия донных отложений, потоки природных газов

**E-mail:** kholmogorov\_ao@poi.dvo.ru

**Телефон:** +7914-79-111-83

**ORCID ID:** 0000-0002-6259-1614

**ШАКИРОВ Ренат Белалович**, д.г.-м.н., доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией газогеохимии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская 43

**Область научных интересов:** морская геология, литология и геохимия донных отложений, геология нефти и газа, геохимия углеводородов, фундаментальные проблемы геоэкологии в геологии, рациональное природопользование, фоновое и аномальное состояния геосфер зоны перехода “континент-океан”

**E-mail:** ren@poi.dvo.ru

**Телефон:** +7924-130-86-89

**ORCID ID:** 0000-0003-1202-0351

### Для цитирования:

Макаров Д.В., Холмогоров А.О., Шакиров Р.Б. ВЛИЯНИЕ ПОКМАРКОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 4(38). С. 60–71. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_38\_04\_06.

