



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии  
и комплексного управления прибрежными зонами

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(магистерская диссертация)

На тему Особенность распространения акустических сигналов в Баренцевом море

Исполнитель Паничева Елизавета Дмитриевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Гордеева Светлана Михайловна  
(фамилия, имя, отчество)

Научный консультант кандидат технических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Никитин Дмитрий Алексеевич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

  
(подпись)

кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«14» сб 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

## Содержание

| №   | Название главы                                                                   | Стр |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
|     | <b>Список сокращений.....</b>                                                    | 3   |
|     | <b>Введение.....</b>                                                             | 4   |
| 1.  | <b>Распространение акустических волн в море .....</b>                            |     |
| 1.1 | Скорость звука, распространение и отражение акустических волн.....               | 6   |
| 1.2 | Современные исследования особенностей распространения акустических сигналов..... | 12  |
| 1.3 | Современные исследования в области акустики в Баренцевом море.....               | 17  |
| 2.  | <b>Материалы и методы.....</b>                                                   | 20  |
| 2.1 | Описание исходных данных.....                                                    | 20  |
| 2.2 | Метод расчета скорости звука.....                                                | 21  |
| 2.3 | Метод построения акустических лучей.....                                         | 22  |
| 2.4 | Метод построения распространения лучей, идущих ко дну.....                       | 27  |
| 3.  | <b>Моделирование акустических сигналов в Баренцевом море.....</b>                | 31  |
| 3.1 | Пространственное распределение температуры воды, солености и скорости звука..... | 31  |
| 3.2 | Распространение акустических волн в разных условиях среды.....                   | 35  |
| 3.3 | Распространение акустических волн в Баренцевом море.....                         | 47  |
|     | <b>Заключение.....</b>                                                           | 52  |
|     | <b>Список использованных источников.....</b>                                     | 54  |
|     | Приложение А. Координаты точек разреза с максимальными глубинами.....            | 58  |
|     | Приложение Б. Программа расчета акустических лучей.....                          | 59  |

## **Список сокращений**

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| ВРСЗ | Вертикальный профиль скорости звука |
| ПСЗ  | Профиль скорости звука              |
| ПЗК  | Подводный звуковой канал            |

## ВВЕДЕНИЕ

Акустические волны распространяются в толще океана на большие расстояния. Акустика океана – сравнительно новая часть океанологии и приобрела большое прикладное значение. В большинстве морей и океанов имеется постоянно действующий фактор, повышающий эффективность акустических средств, - подводный звуковой канал, по которому звук может распространяться с малым ослаблением на весьма большие расстояния. Также существуют большое количество факторов, которые ухудшают распространение звука под водой, такие как неровности поверхности воды и дна, а также различные неоднородности толщи воды. Поэтому акустика океана играет важную роль в процессе освоения и изучения океана. В научной литературе недостаточно исследований об особенностях распространения акустических сигналов в шельфовых морях.

Баренцево море имеет большое значение для транспорта и для рыболовства, здесь расположены крупные порты. Неоднородный рельеф дна значительно влияет на распространения акустических лучей, он значительно неоднороден, пересечен подводными возвышенностями, впадинами и желобами. Поступления вод из других бассейнов и неровный подводный рельеф создают неоднородные водные массы, которые значительно ослабляют распространение акустических сигналов.

Научная работа, посвященная особенностями распространения акустических сигналов в Баренцевом море, является актуальным исследованием. В условиях изменения климата Баренцево море подвергается существенными изменениями, которые влияют на акустические свойства морской среды. Благодаря современным технологиям модернизация методов исследования позволяет получать более точные данные о распространении акустических сигналов. Данные факторы играют важную роль для исследования состояния среды и возможности устойчивого развития региона.

Цель исследования: оценка распространения акустических лучей для разных гидрологических и морфологических условий на примере Баренцева моря.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ современных исследований по распространению акустических сигналов в Баренцевом море;
- подготовка массива гидрофизических параметров на основании данных реанализа;
- подготовка программы расчета распространения акустических сигналов;
- описание особенностей распространения акустических сигналов в Баренцевом море;
- изучение влияния температуры, солености и давления на распространение акустических сигналов;
- прогнозирование путей распространения акустических сигналов в различных районах Баренцева моря;
- влияние подводного рельефа в море на траекторию распространения сигнала.

Район исследования– Баренцево море.

Предмет исследования –распространение акустических сигналов в толще воды.

## **1. Распространение акустических волн в море**

Акустические волны являются колебаниями в морской среде с низкой плотностью и высокой проводимостью, которые передают энергию в виде звуковых сигналов на большие расстояния без значительного снижения интенсивности. Однако скорость распространения может варьироваться из-за факторов, которые ухудшают распространение звука под водой, такие как рыбы, водоросли, неровности поверхности воды и дна, а также различные неоднородности толщи воды, которые приводят к отражению, преломлению или поглощению звуковых сигналов, на которые оказывает влияние температура, соленость и давление [1].

Распространение акустических волн в море – это процесс, который играет важную роль в экосистеме Баренцева моря для морских организмов и их взаимодействии между собой. Морские организмы, такие как киты и дельфины используют акустические сигналы для коммуникации и охоты. Таким образом, акустические волны могут использоваться для изучения морской среды и мониторинга популяций морских организмов, для понимания жизни в морских глубинах и сохранения морской экосистемы [2].

### **1.1 Скорость звука, распространение и отражение акустических волн**

Скорость звука в морской среде, где распространение звуковых волн отличается от воздушной среды, может быть определена путем проведения непосредственных измерений с использованием специализированных приборов или путем вычислений на основе эмпирических формул, учитывающих зависимость скорости звука от таких параметров, как температура ( $T$ ), соленость ( $S$ ) и гидростатическое давление ( $P$ ). Применение эмпирических формул для определения скорости звука позволило получить широкое распространение и применение в современных исследованиях морской акустики и гидроакустики.

До последнего времени наиболее точной принято считать формулу Вильсона [3].

$$c = 1449,14 + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_P + \Delta c_{STP}, \quad (1)$$

где  $\Delta c_T = 4,5721T - 4,4532 * 10^{-2} * T^2 - 2,6045 * 10^{-4}T^3 + 7,985 * 10^{-6}T^4$

$$\Delta c_S = 1,3980(S - 35) + 1,692 * 10^{-3}(S - 35)^2$$

$$\Delta c_P = 1,60272 * 10^{-1}P + 1,0268 * 10^{-5}P^2 + 3,5216 * 10^{-9}P^{-3} - 3,3603 * 10^{-12}P^4$$

$$\begin{aligned} \Delta c_{STP} = & (S - 35) * (-1,1244 * 10^{-2}T + 7,7711 * 10^{-7}T^2 + 7,7016 * \\ & 10^{-5}P - 1,2943 * 10^{-7}P^2 + 3,1589 * 10^{-8}PT + 1,5790 * \\ & 10^{-9}PT^2) + P(-1,8607 * 10^{-4}T + 7,4812 * 10^{-6}T^2 + 4,5283 * \\ & 10^{-8}T^3) + P^2(-2,5294 * 10^{-7}T + 1,8563 * 10^{-9}T^2) + \\ & P^3(-1,9646 * 10^{-10}T) \end{aligned}$$

$c$  – скорость звука (м/с);

$T$  – температура воды ( $^{\circ}\text{C}$ );

$S$  – соленость воды (‰);

$P$  – давление воды (кг/см<sup>3</sup>)

Лерой упростил формулу Вильсона (1) для скорости звука в зависимости от солености, температуры и глубины при небольших погрешностях [4]:

$$c = V_0 + V_a + V_b + V_c + V_d, \quad (2)$$

где  $V_0 = 1493,0 + 3(T - 10) - 6 * 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 * 10^{-2}(T - 18)^2 +$

$$1,2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)/(S - 35) + z/61$$

$$V_a = 0,1 * \xi^2 + 2 * 10^{-4}\xi^2(T - 18)^2 + 0,1\xi * \varphi/90$$

$$V_b = 2,6 * 10^{-4}T(T - 5)(T - 25)$$

$$V_c = -10^{-3}\xi^2(\xi - 4)(\xi - 8)$$

$$V_d = 1,5 * 10^{-3}(S - 35)(1 - \xi) + 3 * 10^{-6}T^2(T - 30)(S - 35)$$

$z$  и  $\xi = z/1000$  – глубина в метрах и километрах соответственно;

$\varphi$  – географическая широта места в градусах.

В уравнении (2) можно использовать лишь первое слагаемое. При  $T \leq 25^{\circ}\text{C}$  ошибка составляет 0,2 м/с. Учет первых трех слагаемых при условии, что

температура меняется в диапазоне  $-2^{\circ}\text{C} < T < 34^{\circ}$  и обычной океанской солености ошибка составила не более 0,2 м/с. Полная формула в сравнении с формулой Вильсона дает средне квадратическое отклонение 0,07 м/с [5].

Фрай и Паг также упростили формулу Вильсона [13]:

$$C = 1449.30 + \Delta C_T + \Delta C_S + \Delta C_P + \Delta C_{STP}, \quad (3)$$

где  $\Delta C_T = 4.587 T - 5.356 \cdot 10^{-2} T^2 + 2.604 \cdot 10^{-4} T^3$ ;

$$\Delta C_S = 1.19 (S - 35) + 9.6 \cdot 10^{-2} (S - 35)^3;$$

$$\Delta C_P = 1.5848 \cdot 10^{-1} P + 1.572 \cdot 10^{-5} P^2 - 3.46 \cdot 10^{-12} P^4;$$

$$\Delta C_{STP} = 1.354 \cdot 10^{-5} T^2 P - 7.19 \cdot 10^{-7} T P^2 - 1.2 \cdot 10^{-1} (S - 35) T.$$

Среднеквадратическая ошибка составила 0.1 м/с при следующих условиях: [5] –  $3^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$ ;  $33.1 \text{ ‰} < S < 36.6 \text{ ‰}$ ;  $1.033 \text{ кг/см}^2 < P < 984.3 \text{ кг/см}^2$ .

Таким образом, скорость распространения звука в морской среде подвержена воздействию различных факторов, таких как изменения плотности, температуры и солености воды, которые постоянно меняются в зависимости от географического расположения и глубины. Эти изменения создают сложные условия для распространения акустических волн в морской среде, учитывая все разнообразие переменных, влияющих на скорость звука и его характеристики при передвижении через водную среду. Таким образом, изучение и понимание этих процессов имеют важное значение для науки и исследований в области подводной акустики и гидроакустики.

Важную роль в формировании профиля скорости звука играет температура воды, например, при повышении температуры скорость звука также увеличивается. Аналогично повышение солености приводит к увеличению плотности воды, а значит и скорости звука. Увеличение распределения скорости звука по глубине приводит к изменению пути распространения акустических волн. Давление, увеличивающееся с глубиной, создает сложные и изменчивые условия для распространения звуковых волн на различных глубинах [6].

Изменчивость и неоднородное распределение скорости звука оказывают значительное воздействие на рассеивание гидроакустических волн и может вызвать фокусировку сигнала. Неоднородность скорости звука в водной среде может привести к эффектам усиления и ослабления звуковых сигналов, а также их фокусировке в определенных областях. Изучение влияния изменчивости скорости звука на распространение звуковых волн играет важную роль в гидроакустике и позволяет лучше понять физические процессы, происходящие в морской среде.

На распространение звука в океане важное влияние оказывает не абсолютное значение скорости звука, а профиль распределения скорости по глубине, определяя условия распространения звука в океане. Вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) различно в разных районах Мирового океана, а также изменяется во времени. На изменение ВРСЗ в верхних слоях влияет изменение температуры и солености, соответственно на больших глубинах, где изменение солености и температуры по глубине мало, влияние скорости звука обусловлено гидростатическим давлением [16].

Важно учитывать различия ВРСЗ в глубоководных районах океана и мелководных районах морей. В исследовании свойств морской среды в глобальном масштабе авторы [7] для глубоководных районов выделили в 12 типичных распределений ВРСЗ, в которых дальность распространения акустических волн меняется от 25 до 42 км (рисунок 1.1 а). В общем случае можно выделить несколько слоев при анализе профилей скорости звука – приповерхностный слой, сезонный термоклин, основной термоклин, глубоководный изотермический слой.

Температура приповерхностного слоя наиболее изменчива из-за быстрых изменений, связанных с суточной солнечной активностью, воздействием тепла и холода, а также с ветровым воздействием. В перемешанном слое под локальным воздействием ветра может сформироваться приповерхностный звуковой канал. При изменении метеорологических условий, например, при длительном безветрии и солнечной погоде этот слой исчезает.

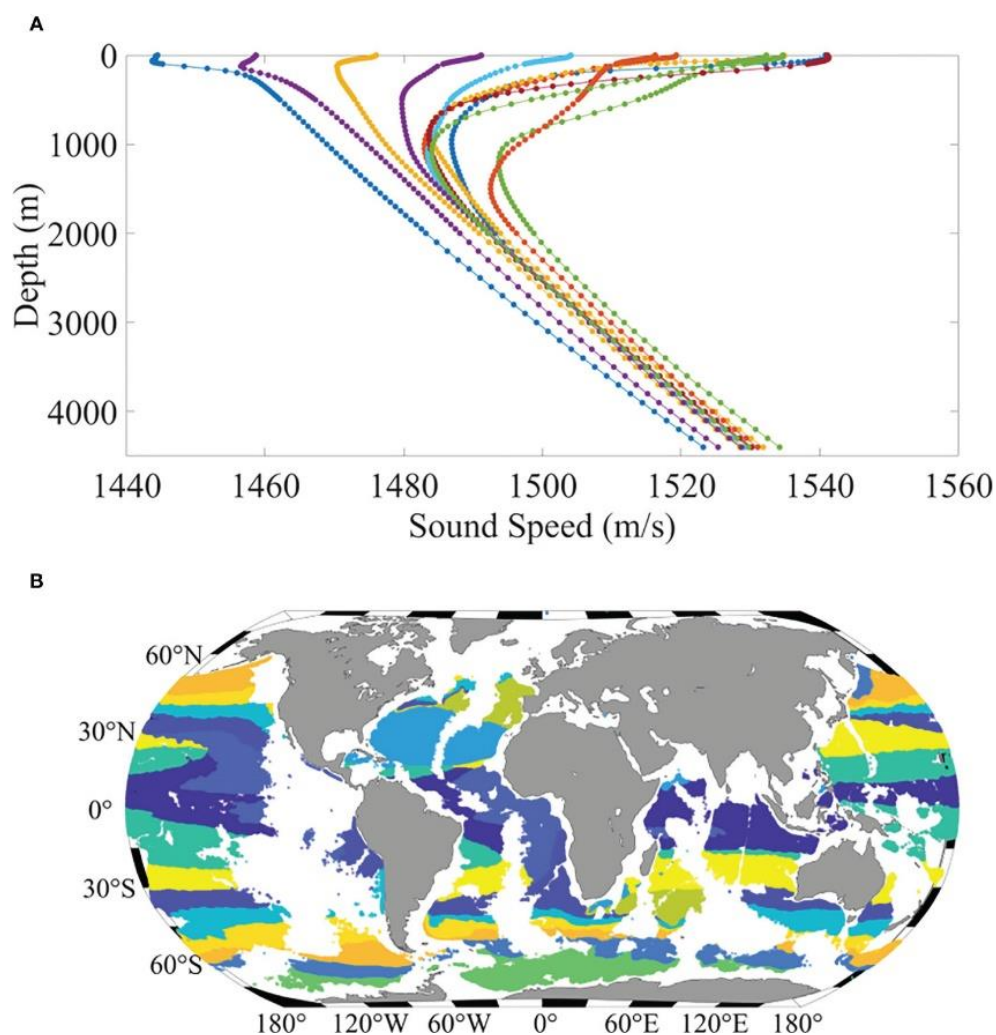


Рисунок 1.1 – Профили скорости звука [7]. а – виды распределения ВСРЗ;  
в – пространственное распределение профилей ВСРЗ

Под приповерхностным слоем находится сезонный термоклин. Сезонный термоклин характеризует отрицательный градиент температуры и скорости звука (температура и скорость звука уменьшаются с глубиной). Этот слой зависит от времени года, так летом и осенью сезонный термоклин устойчив и имеет четкие границы, а зимой и осенью он сливается с поверхностным слоем и выделить его довольно трудно.

Следующим за сезонным термоклином обычно находится основной термоклин, который испытывает лишь незначительные изменения в течение сезона, в основном вследствие температурных колебаний воды. Этот основной

термоклин представляет собой стабильный и важный слой гидрологической структуры водной среды, влияющий на процессы перемешивания и теплообмена в океане

Ниже основного термоклина до дна простирается глубоководный изотермический слой с почти постоянной температурой воды и основное влияние на увеличение скорости звука оказывает гидростатическое давление. [6].

Однако в мелководных прибрежных районах и на континентальном шельфе профиль скорости звука утрачивает регулярность и предсказать форму ВРСЗ трудно из-за зависимости характера прогрева водных масс, солености и течений. А также значительное влияние на профиль скорости звука оказывает поступление пресной воды, которая влияет на изменение солености.

Хотелось бы отдельно выделить арктический район. Потепление Северного Ледовитого океана наблюдается последние несколько десятилетий [8]. С уменьшением ледового покрова в Баренцевом море увеличивается поступление солнечного тепла, увеличивая температуру воды в поверхностных слоях, а таяние морского льда – к увеличению поступления пресной воды [9]. Эти последствия привели к изменениям поверхностных вод на глубинах около 100 м и к колебаниям скорости звука на этих глубинах, например, к появлению подводного звукового канала, который может обеспечить распространение звука на большие расстояния с небольшими потерями звука. В исследовании термохалинной структуры скорости звука в Канадском бассейне [11, 12] одним из важных факторов отмечают увеличение влияния атлантических вод, которые приводят к сильно стратифицированным верхним слоям океана с сильным градиентом плотности. Для акустики особенность водных масс и их изменчивость играет важную роль для исследований распространения звука. В ходе проведенного эксперимента было выделено, что колебания скорости звука в верхних слоях океана привело к фокусировке звука. Для Баренцева моря также увеличение влияния атлантических вод может привести к изменению циркуляции водных масс.

## **1.2 Современные исследования особенностей распространения акустических сигналов**

Лучевая акустика – это метод, используемый для моделирования распространения акустических волн в море. В основе данного метода лежит принцип геометрической акустики, рассматривающий распространение звуковых волн в виде лучей. В основные принципы геометрической акустики входит: звуковые волны рассматриваются как прямолинейные лучи, распространявшиеся от источника звука. Принцип Ферма – основа геометрической акустики, который гласит, что пройденный путь акустическим лучом между двумя точками, минимизирует время прохождения. Переход луча через границу сред с разными скоростями звука, угол падения луча и угол преломления связаны законом Снеллиуса при этом при столкновении луча с границей сред часть энергии будет отражаться, а часть преломляться. Лучевая акустика позволяет оценить путь распространения акустического сигнала и оценить влияние различных факторов. [5, 6, 13] Преимуществом также является, что реальные граничные условия легко задаются. Сам метод справедлив на высоких частотах, что будет доказано ниже.

Распространение акустических лучей можно смоделировать с помощью трассировки лучей (Ray Tracing), наиболее используемый подход, основанный на лучевой теории. Метод используется для расчета траектории движения лучей от источника.

В статье [14] представлено описание моделирования классической лучевой теории и доказано, что метод представляет физическую картину распространения звука в неоднородной среде. В научной статье описаны все параметры необходимые для исследования распространения акустических лучей с помощью метода лучевой акустики. В ходе исследования для построения распространения лучей была использована модель PlaneRay в основе лежит метод разделение толщи воды на большое количество слоев,

каждый из которых имеет одинаковую толщину разделенных слоев. Внутри каждого слоя профиль скорости звука аппроксимировался. Точность метода определялась сравнением фактического профиля скорости звука с линейной аппроксимацией скорости. С использованием основных принципов лучевой акустики и трассировки лучей был показан пример лучевого моделирования при использовании низкочастотного звука (рисунок 1.2).

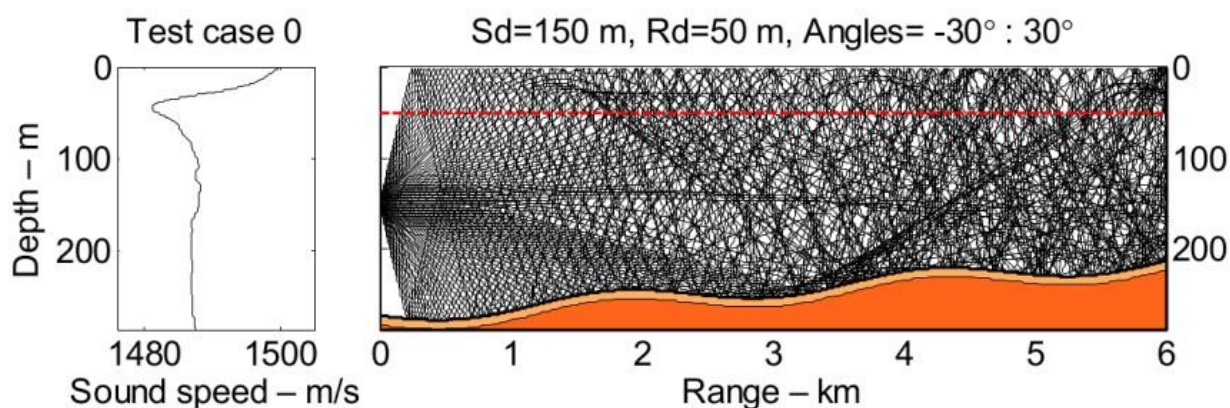


Рисунок 1.2 – Профиль скорости звука и трассировка лучей для типичного случая. Глубина источника составляет 150 м. Красная пунктирная линия отмечает линию приема на глубине 50 м [14].

Собственные лучи – луч, соединяющий положение источника с положением приемника. При расчете акустического поля важен точный алгоритм определения собственных лучей. В статье [14] описанная модель PlaneRay использует процедуру сортировки для эффективного определения большого количества собственных лучей в условиях, которые зависят от дальности действия. На графиках были показаны зависимости дальности и время прохождения до того места, где лучи пересекают линию глубины приемника. Конкретный луч может пересекать линию глубины приемника несколько раз на разных расстояниях.

Рассмотрим один конкретный луч (рисунок 3): в итоге на расстоянии 2 км имеется 11 собственных лучей с приблизительными начальными углами  $5,9^\circ$ ;

9,6°; 22°; 24° для положительных лучей и -2,0°; -3,6°; -7°, -4°, -15,0°, -17,0°, -25,0°, -27,0° для отрицательных (рисунок 1.3). Графики состоят из независимых точек, объединенных в кластеры. Ветви непрерывны и поддаются интерполяции. В большинстве случаев значения, полученные с помощью интерполяции, достаточно точные, но при увеличении плотности начальных углов увеличивается точность вычисления.

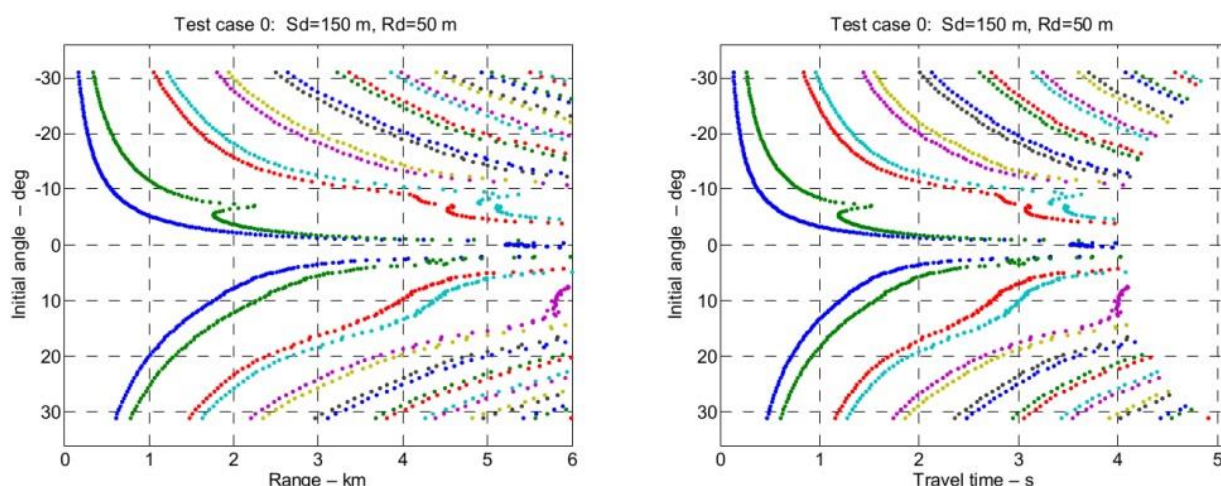


Рисунок 1.3 – Распространение собственных лучей (по рисунку 2) [14] . Слева – дальность, справа – прохождение до глубины приемника в зависимости от начального угла у источника.

Подводя итог, можно утверждать, что в контексте распространения акустических лучей в водной среде высокие частоты обладают более высокой эффективностью передачи сигналов по сравнению с низкими частотами.

Как говорилось выше, метод лучевой акустики можно дополнять для различных практических целей. Например, распространение акустических сигналов в неоднородной среде в мелководных районах, где важную роль играет рельеф дна моря.

В работе [15] в мелководном проливе Лонг-Айленд, который отличается сложной неоднородной морской средой в особенности батиметрией, было проведено сравнение двух идеализированных случаев. Сравнение осуществлялось с существующей модели Bellhop. В постановке метода

исследования было два идеализированных случая: плоское дно и мелководный клин, направленные на калибровку моделей, а также для сравнения при более сложном моделировании. В итоге решение для мелководного клина вызвало ошибки после 1,0 км для высокочастотного звука и 0,2 км после низкочастотного звука. Данные ошибки были вызваны пренебрежением связности мод, т.е. не было учета взаимодействия лучей друг с другом. Также выявлено, что модель плохо отслеживает интерференцию лучей при изменении профиля скорости звука и батиметрии.

При увеличении учета параметров морской среды, влияющих на морскую среду, детально моделировать распространение звука в сложных мелководных средах позволяет метод трассировки лучей [15].

Метод лучевой акустики применялся в исследовании шельфовой части Черного моря [16], однако стоит отметить, что там применялся комплексный подход, т.е. использовался метод лучевой акустики для высоких частот (модель Bellhop) и волновой метод для низких (модель Krakenc). В профиле скорости звука выделили два волновода: приповерхностный и придонный. Источники находились на глубинах 10 м и 85 м. В верхнем волноводе выделили лучи, рефрагирующие в слое и лучи, отражающиеся от дна и поверхности. В придонном волноводе — канальные, лучи, отраженные от дна, и лучи, отражающиеся от поверхности (рисунок 1.4).

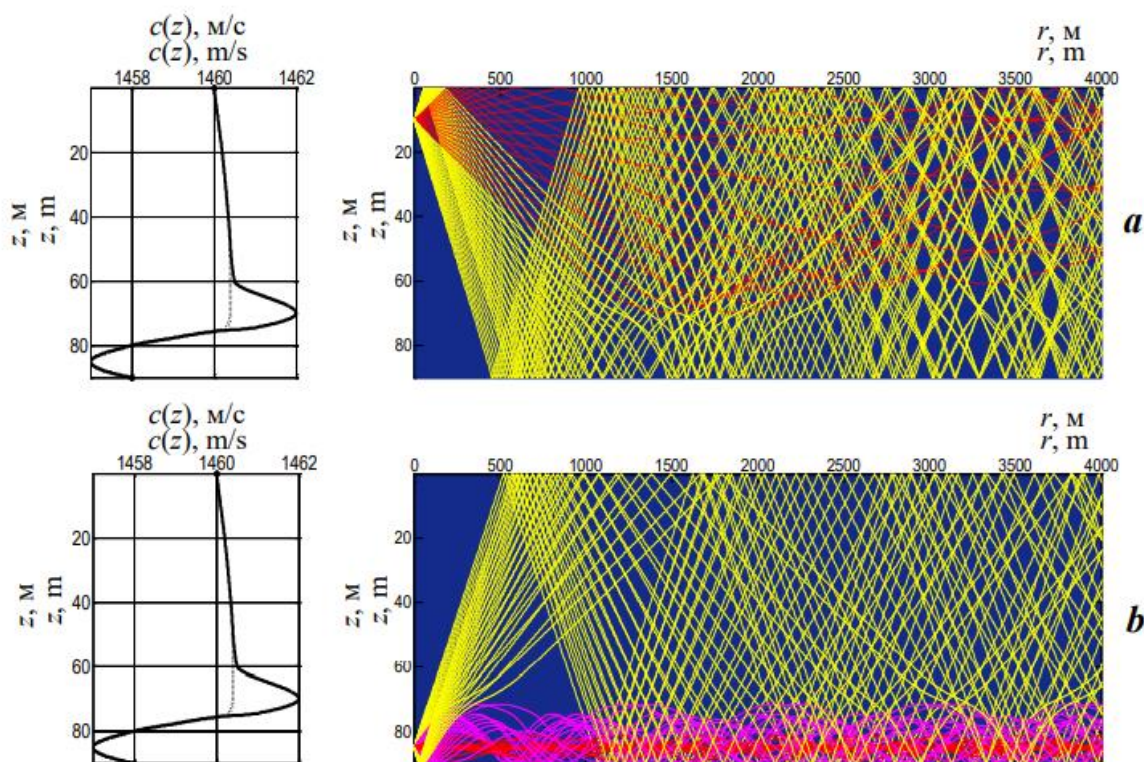


Рисунок 1.4 – Профиль скорости звука и лучевые траектории [15].  
Расположение источника: приповерхностное (а); придонное (б).

Метод нормальных мод выделил концентрацию высокочастотной энергии в области придонного и приповерхностного волновода. Часть акустической энергии проникла в дно. При исследовании звуковых полей был сделан вывод, что в лучевом приближении пространственное распределение структуры поля ограничивалось профилем скорости звука (ПСЗ), т.е. максимум на ПСЗ является границей распространения акустических сигналов.

В приповерхностном слое оба метода согласуются друг с другом. В случае источника в придонном слое метод лучевой акустики занижает уровень поля, интерференционная картина упрощена [16].

В целом, при совершенствовании методов лучевой акустики и увеличении параметров, влияющих на распространение акустических сигналов, метод способен более точно описывать физические параметры среды.

Особенность в виде более быстрого вычисления и упрощенного задания граничных условий в некоторых случаях дает преимущества при исследовании морской среды.

### **1.3 Современные исследования в области акустики в Баренцевом море**

Ледовитость моря является одним из существенных факторов, которые оказывают влияние на распространение акустических сигналов. Наличие и характер ледового покрова влияют на термические и гидрографические характеристики среды, включая температуру и солёность, а также влияет на процессы отражения и преломления звуковых волн [26]. Под слоем морского льда температура воды обычно остается относительно стабильной в верхних слоях. Во время формирования льда на морской поверхности солёность увеличивается, и наоборот, при его расплавлении в море происходит поступление пресных вод, что приводит к снижению солёности в верхних слоях морской воды [17]. Оба эти параметра влияют на скорость звука. Также лед представляет собой барьер, при котором происходит отражение и преломление акустических сигналов, меняя характер распространения [29].

Скорость распространения акустических волн зависит от параметров ледяного покрова, таких как толщина и сплоченность. В исследовании [18] были получены оценки акустических сигналов в зависимости от скорости дрейфа. Как известно, лед не представляет собой гладкую поверхность, а имеет шероховатости. Именно поэтому были проведены количественные оценки влияния этих свойств на отражение звука.

В работе [19] был предложен вариант использования акустической модели Баренцева моря для использования в ГИС системах. В основе этого исследования лежат связи акустических и океанологических элементов. В модели необходимо было учитывать тип грунта, шумы и ВРСЗ.

В исследовании [20] описываются типы грунта Баренцева моря, а также были уточнены характер рельефа и возможные изменения в будущем.

Центральная часть акватории характеризуется мелководными участками. Грунт представлен главным образом песками и песчаными отложениями. Грунт сформировался сильными приливными течениями и ледниковой деятельностью. Более глубоководная область желоб Медвежий обусловлены сложным составом грунтом, тут встречаются глинистый ил, оседающий в глубоких депрессиях. Перенос грунта происходит за счет течений и ледников. Южную часть моря можно охарактеризовать песчаными отложениями, сформировавшиеся за счет ледниковых процессов и речного стока. Воздействие морскими течениями, ледниковыми процессами и речного стока сформировал сложное распределение осадочных пород в шельфовых областях Баренцева моря и определяется песками, глинами и смесями песчано-глинистых отложений.

Почвы, в том числе грунты, насыщенные минералами в Баренцевом море, играют значительную роль в процессе изучения распространения акустических сигналов. Например, ил и песчаные отложения способствуют поглощению звука и его энергии. Скалистые грунты, в свою очередь, обладают свойством отражать звуковые волны и передавать энергию звука. Учитывая разнообразие типов грунтов в данном морском регионе, их характеристики играют важную роль в исследованиях по распространению звука в морской среде, что имеет ключевое значение для работ по моделированию и пониманию физических процессов водных пространств.

Температура воды Баренцева моря сильно меняется в последние десятилетия. В работе [21] выделили области с значительными трендами изменения температуры воды придонного слоя. В итоге области расположены на участках, отдаленных от влияния течений атлантических и арктических вод в придонных слоях [29].

В 2003 году в Центральной части Баренцева моря проведено исследование дальнего распространения звука [22]. Авторы пришли к выводу, что для центральной части Баренцева моря в летний период затухание звука в диапазоне от частоты 16 до 4000 Гц, которая была обусловлена при отражении

от дна. Распространение звука при межгодовой изменчивости важным условием был переход фронтальной зоны от южных вод с придонным звуковым каналом к северным водам с подводным звуковым каналом [30].

Современные научные исследования, посвященные изучению процессов распространения акустических волн, оказываются недостаточными, требующими дальнейшего углубленного анализа и изучения для совершенствования нашего понимания акустической среды. Исследования, связанные с особенностями Баренцева моря, включая температуру воды, соленость и рельеф дна, уже имеются, однако их изучение остается актуальным и важным для получения дополнительной ценной информации, необходимой для более точного моделирования и анализа процессов распространения акустических волн в данном районе.

## 2. Материалы и методы исследования

### 2.1 Описание исходных данных

Для расчета распространение акустических сигналов были использованы данные реанализа GLORYS12V1 (DOI: 10.48670/moi-00021), соответствующие с физикой модели и наиболее близки к натурным данным. Эта база данных содержит ежедневные значения потенциальной температуры, солёности, высоты поверхности моря, концентрацию, скорость и толщину морского льда, а также толщину смешанного слоя океана. Пространственное распределение охватывает глобальный океан с координатами от  $180^{\circ}$  з.д до  $180^{\circ}$  в.д и  $90^{\circ}$  с.ш до  $90^{\circ}$  ю.ш с регулярной сеткой на  $1/12^{\circ}$  и 50 стандартных вертикальных уровней (глубин) в период с 04.12.1991 до настоящего времени.

В базе данных GLORYS12V1 были выбраны гидрофизические параметры: потенциальная температура и солёность воды с координатами с  $35^{\circ}$  в.д до  $45^{\circ}$  в.д и с  $70^{\circ}$  с.ш до  $75^{\circ}$  с.ш до глубины 400 м на 1 июля 2020 года.

Полученный массив данных обрабатывался: сетка координат была увеличена до  $1^{\circ}$  по широте и на  $2^{\circ}$  по долготе. Полученное пространственное распределение представлено на рисунке 2.1.

Баренцево море характеризуется сложным гидрологическим режимом, отличающиеся влиянием Атлантического и Арктического океана, а также поступлением пресной воды с речным стоком. Также рельеф дна разнообразен и включает пологими возвышенностями и понижениями с перепадами глубин от 50 до 100 м [24]. Именно поэтому для этой работы мы использовали следующие разрезы (см. рисунок 2.1).

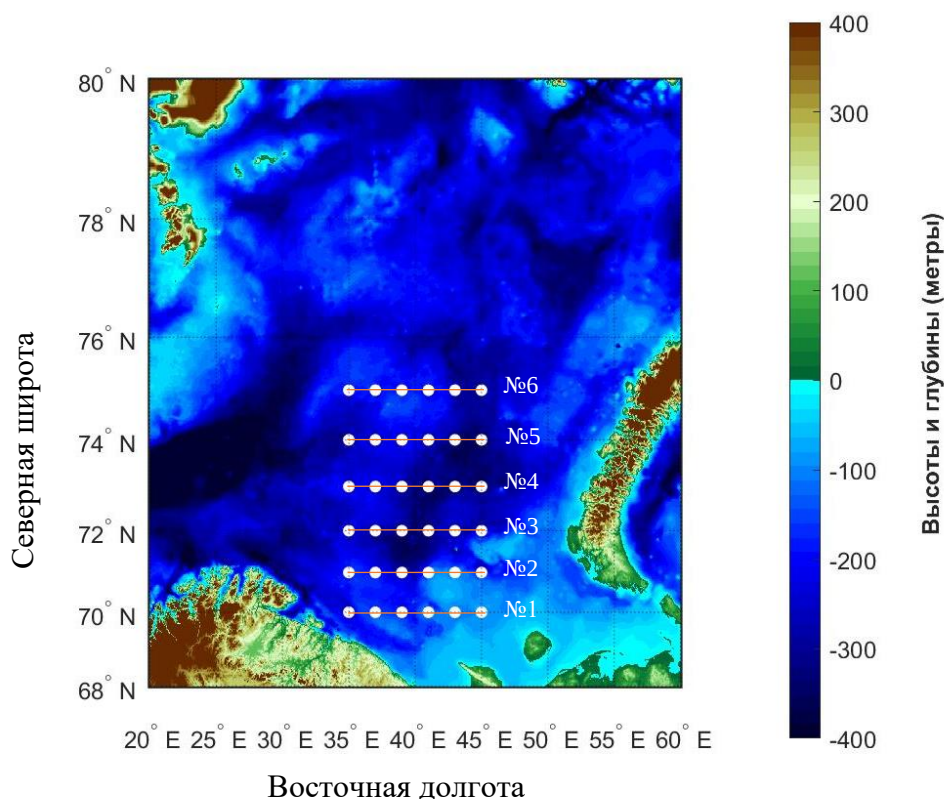


Рисунок 2.1 – Пространственное распределения станций гидрофизических параметров. Приведена топография суши и морского дна.

Для определения топографии использовалась глобальная модель рельефа ETOPO (DOI: 10.25921/fd45-gt74), которая объединяет данные топографии, батиметрии и береговой линии из региональных и глобальных наборах данных для отображения геофизических характеристик Земли. Сетка данных составляет 1 секунду по широте и долготе. В итоге модель предоставляет слегка сглаженный результат рельефа. В работе использовалась модель ETOPO1 для нахождения глубины на станциях разрезов. Характеристики станций разрезов (координаты, глубина) представлены в приложении А.

## 2.2 Метод расчета скорости звука

Для расчета скорости звука на каждой станции было использовано

распределение температуры воды и солености по глубине.

Скорость звука ( $c$ , м/с) рассчитывалась по эмпирической формуле (1) полученная в работе Фрая и Прага с учетом величин температуры ( $T$ , °C), давления ( $P$ , кг/м<sup>3</sup>) и солености ( $S$ , ‰) [13]

$$c = 11449,30 + \Delta c_P + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_{STP}, \quad (1)$$

где  $\Delta c_T = 4,5721T - 4,4532 * 10^{-2}T^2 - 2,6045 * 10^{-4}T^3 + 7,985 * 10^{-6}T^4$

$$\Delta c_S = 1,3980(S - 35) + 1,692 * 10^{-3}(S - 35)^2$$

$$\Delta c_P = 1,69272 * 10^{-1}P + 1,0268 * 10^{-5}P^2 + 3,5216 * 10^{-9}P^3 - 3,3603 * 10^{-12}P^4$$

$$\begin{aligned} \Delta c_{STP} = (S - 35)(-1,1244 * 10^{-2}T + 7,7711 * 10^{-7}T^2 + 7,7016 * 10^{-5}P - \\ 1,2943 * 10^{-7}P^2 + 3,1580 * 10^{-8}PT + 1,5790 * 10^{-9}PT^2) + \\ P(-1,8607 * 10^{-4}T + 7,4812 * 10^{-6}T^2 + 4,5283 * 10^{-8}T^3) + \\ P^2(-2,5294 * 10^{-7}T + 1,8563 * 10^{-9}T^2) + P^3(-1,9646 * 10^{-10}T) \end{aligned}$$

$\Delta c_T$  – поправка к скорости на температуру;

$\Delta c_S$  – поправка к скорости на соленость;

$\Delta c_P$  – поправка скорости на давление;

$\Delta c_{STP}$  – поправка к скорости на соленость, температуру и давление.

Рассчитаем зависимость давления ( $P$ ) от глубины ( $z$ , м):

$$P = 1,033 + 1,028126 * 10^{-1}z + 2,38 * 10^{-7}z^2 - 6,8 * 10^{-17}z^4 \quad (2)$$

Тогда поправка к скорости на давление  $\Delta c_P$  преобразуется в поправку на глубину:

$$\begin{aligned} \Delta c_z = 0,1656 + 1,64802 * 10^{-2}z + 1,4680 * 10^{-7}z^2 + 4,315 * 10^{-12}z^3 - \\ 3,48 * 10^{-16}z^4 - 3,4 * 10^{-21}z^5 - 1,2 * 10^{-26}z^6 . \end{aligned}$$

### 2.3 Метод построения акустических лучей

Расчет распространения акустических лучей основан на методе кусочно-линейной аппроксимации профиля скорости звука и лучевым методом [5].

Суть метода кусочно-линейной аппроксимации профиля скорости состоит в том, что среда разбивается на слои ( $z_1, z_2, z_i, z_{i+1}$ ), в которых градиент

скорости ( $g$ ) постоянен (рисунок 2.2).

Градиент скорости:

$$g = \frac{\Delta c}{\Delta z} \quad (3)$$

где  $\Delta c = c_2 - c_1$ ;

$\Delta z = z_2 - z_1$ ;

$c$  – скорость звука, м/с;

$z$  – глубина, м

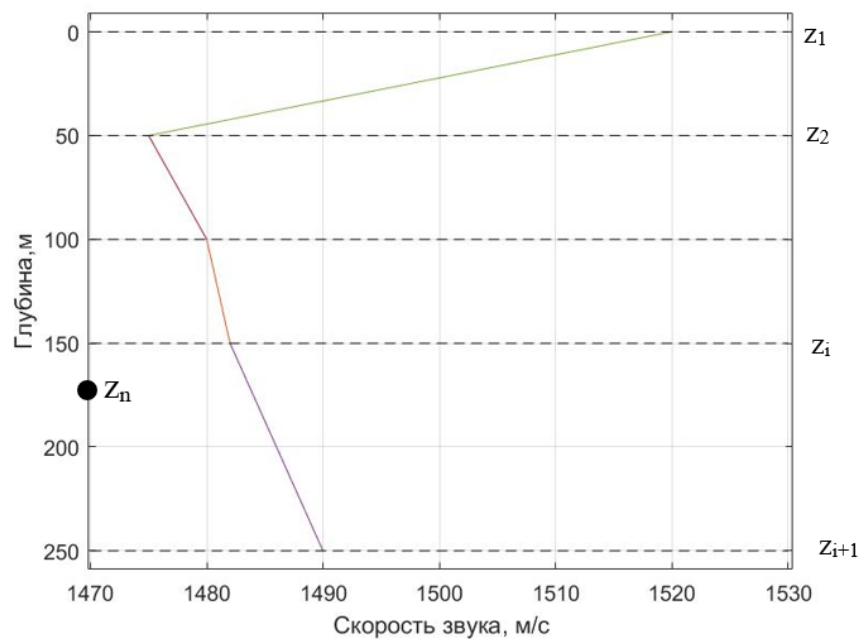


Рисунок 2.2 – Кусочно-линейная аппроксимация профиля скорости звука.

$z_1, z_2, z_i, z_{i+1}$  – границы слоев.  $z_n$  – глубина источника звука.

Если источник находится на глубине  $z_n$  рассчитаем скорость звука в источнике:

$$c_n = \frac{c_i + \Delta c_n}{(z_{i+1} - z_i) * (z_n - z_i)} \quad (4)$$

где  $c_i$  – скорость звука ниже глубины излучателя;

$\Delta c_n$  разница в скоростях звука;  $\Delta c_n = c_{i+1} - c_i$  ;

$c_{i+1}$  – скорость звука выше глубины излучателя;

$c_1$  – скорость звука ниже глубины излучателя

$z_{i+1}$  – глубина выше излучателя;

$z_i$  – глубина ниже излучателя;

$z_n$  - глубина, на которой находится источник.

Тогда начало расчета и построения траектории лучей начнется на глубине  $z_n$  с рассчитанной скорости звука ( $c_n$ ).

В ходе работы за основу берем закон Снеллиуса

$$\frac{c_i}{\cos \alpha_i} = \frac{c_{i+1}}{\cos \alpha_{i+1}} = \text{const} \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  и  $\alpha_{i+1}$  – углы скольжения на горизонтах  $z_i$  и  $z_{i+1}$ , соответственно.

Из уравнения (5) найдем угол скольжения  $\alpha_i$ , под которым луч должен выйти из излучателя, чтобы коснуться горизонта  $z_i$

$$\cos(\alpha_i) = \frac{c_i}{c_{i+1}}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) получим формулу нахождения угла скольжения ( $\alpha_i$ ), под которым луч выходит из излучателя.

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{c_i}{c_{i+1}}\right) \quad (7)$$

Из уравнения (5) выведем формулу угла скольжения  $\alpha_{i+1}$ , под траекторией которой луч проходит дальше к горизонту  $z_{i+1}$ .

$$\cos \alpha_{i+1} = \frac{c_{i+1} * \cos \alpha_i}{c_i},$$

Тогда уравнение угла скольжения  $\alpha_{i+1}$  рассчитывается:

$$\alpha_{i+1} = \arccos\left(\frac{c_{i+1} * \cos \alpha_i}{c_i}\right), \quad (8)$$

Если  $\alpha_{i+1} < 0$  – лучи идут к поверхности, при  $\alpha_{i+1} > 0$  – лучи идут ко дну.

Когда градиент скорости звука (2.3) положительный, т.е.  $g > 0$ , означает что скорость звука увеличивается с глубиной. Увеличение скорости звука влияет на распространения акустического луча. Луч будет преломляться, стремясь вернуться в область с меньшей скоростью звука (рисунок 3). Угол скольжения будет менять знак.

$$\alpha_{i+1} = -\alpha_i \quad (9)$$

Критический угол скольжения

$$\alpha_n = \arccos\left(\frac{c_i}{c_{i+1}}\right) \quad (10)$$

Переменная  $\alpha_n$  определяется как угол скольжения между лучом и горизонтом. Является критическим углом, при котором акустический луч изменит направление распространения

Если  $\alpha_n > a_i$  луч идет на поверхность

Угол скольжения будет рассчитываться

$$\cos \alpha_{i+1} = \frac{c_i \cdot \cos \alpha_i}{c_{i+1}} \quad (11)$$

Если  $\alpha_n < a_i$ , луч будет преломляться. Угол скольжения  $\alpha_{i+1}$  рассчитывается по формуле (11)

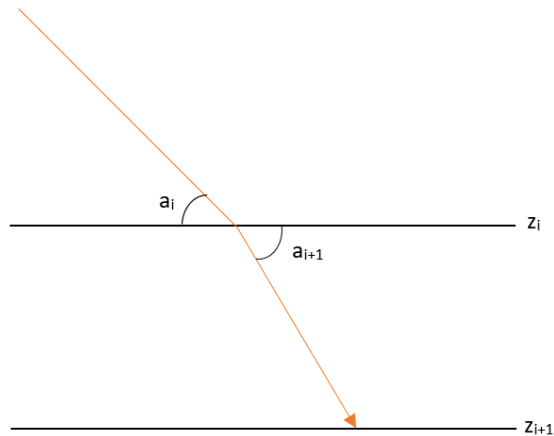


Рисунок 2.3 – Преломление луча от слоя ( $z_i$ ).  $a_i$  – угол скольжения;  $a_{i+1}$  – угол преломления

Если  $\alpha_n \leq a_i$  луч будет отражаться (рисунок 2.4).  $\alpha_{i+1} = -a_i$

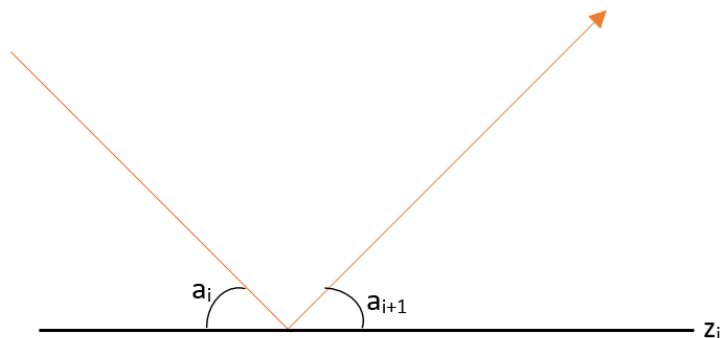


Рисунок 2.4 – Отражение луча от слоя ( $z_i$ ).  $\alpha_i$  – угол скольжения;  $\alpha_{i+1}$  – угол отражения

Если градиент скорости звука отрицательный т.е.  $g < 0$ , означает что скорость звука уменьшается с глубиной. Луч не будет преломляться.

Угол скольжения будет рассчитываться

$$\cos \alpha_{i+1} = \frac{c_{i+1} * \cos \alpha_i}{c_i} \quad (12)$$

Если  $\alpha_n < \alpha_i$ , луч будет преломляться. Угол скольжения  $\alpha_{i+1}$  рассчитывается по формуле (11)

Если  $\alpha_n \leq \alpha_i$ , луч будет отражаться,  $\alpha_{i+1} = -\alpha_i$

При кусочно-линейной аппроксимации скорости звука углы скольжения (рисунок 2.5б) пересчитываются при попадании на границу слоев  $z_1, z_2, z_i, z_{i+1}$ . При переходе акустического луча из одной среды в другую меняется распределение скорости звука по глубине. Рассчитываются углы преломления и далее угол скольжения для второй среды (рисунок 2.6).

$$\beta_i = 90 - \alpha_i, \quad (13)$$

где  $\alpha_i$  – угол скольжения первой среды,

$\beta_i$  – угол преломления для первой среды

$$\beta_{i+1} = \arccos \frac{\cos \beta_i * c_2}{c_1}, \quad (14)$$

где  $c_1$  – скорость звука в первой среде;

$c_2$  – скорость звука во второй среде;

$\beta_{i+1}$  – угол преломления второй среды

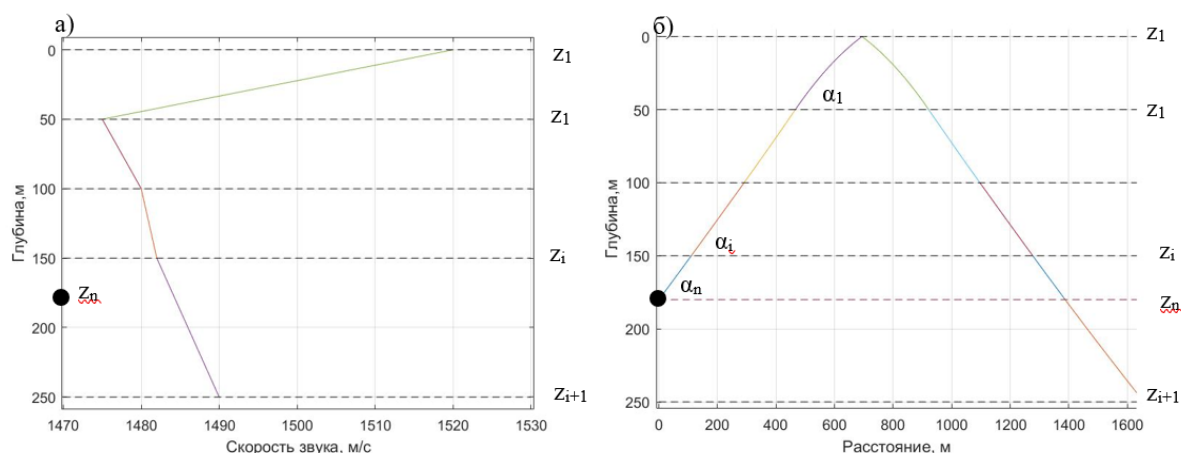


Рисунок 2.5 – Построение луча (б) при кусочно-линейной аппроксимации профиля скорости звука (а).  $Z_1, Z_2, Z_i, Z_{i+1}$  – границы слоев,  $Z_n$  – глубина источника звука.  $\alpha_n$  – угол скольжения источника.  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_i, \alpha_{i+1}$  – углы скольжения в слоях. Черной точкой отмечен источник.

Получим угол скольжения при переходе луча из одной среды в другую

$$\alpha_{i+1} = 90 - \beta_{i+1} \quad (15)$$

Где  $\alpha_{i+1}$  угол скольжения во второй среде с новым распределением скорости звука

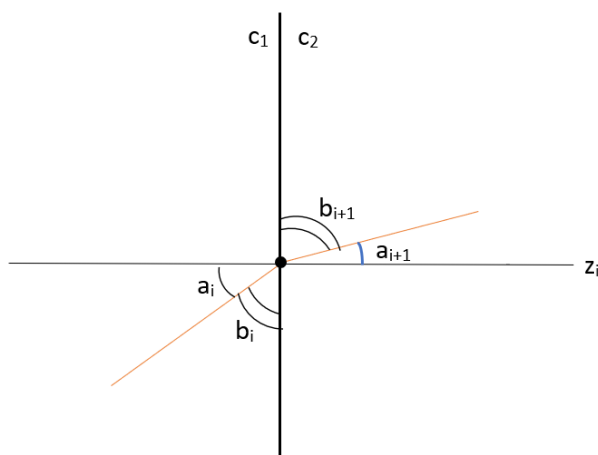


Рисунок 2.6 – Переход луча из одной среды в другую с изменением угла скольжения ( $\alpha_{i+1}$ ). На схеме  $\alpha_i$  – угол скольжения первой среды;  $\beta_i$  – угол преломления для первой среды;  $\beta_{i+1}$  – угол преломления второй среды

## 2.4 Метод построения распространения лучей, идущих ко дну.

Источник излучает волну, она распространяется равномерно по всем направлениям. Метод лучевой акустики предполагает, что волны распространяются вдоль прямых линий (лучей).

Пользуясь выражением (5), траектория луча есть дуга окружности.

Радиус кривизны волнового фронта на источнике

$$R_0 = -\frac{c_i}{g \cdot \cos \alpha_i} \quad (16)$$

где  $c_i$  – скорость звука в первом слое,

$g$  – градиент скорости,

$\alpha_i$  – угол выхода луча из источника.

Координаты центра кривизны волнового фронта на источнике

$$X_{c0} = R_0 \cdot \sin \alpha_i \quad (17)$$

$$Z_{c0} = R_0 \cdot \cos \alpha_i, \quad (18)$$

где  $R_0$  – радиус кривизны волнового фронта,

$\alpha_i$  – угол выхода луча из источника.

Координаты центра кривизны волнового фронта в слое

$$X_c = R \cdot \sin \alpha_{i+1}, \quad (19)$$

$$Z_c = R \cdot \cos \alpha_{i+1}, \quad (20)$$

где  $R$  – радиус кривизны волнового фронта,

$\alpha_{i+1}$  – угол выхода луча из слоя.

$$R = -\frac{c_{i+1}}{g \cdot \cos \alpha_{i+1}} \quad (21)$$

где  $c_{i+1}$  – скорость звука в слое,

$g$  – градиент скорости,

$\alpha_{i+1}$  – угол выхода луча из слоя.

Уравнение прямой

$$y = kx + b, \quad (22)$$

где  $k$  – коэффициент наклона дна,  $b$  – глубина дна на станции

Коэффициент наклона дна

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (23)$$

где  $y_1$ ,  $y_2$  – глубина дна первой станции и второй станции, соответственно;

$x_1, x_2$  – расстояние первой и второй станции.

Уравнение нахождения точек пересечения с наклонной границей (рисунок 2.7):

$$(x - X_c)^2 + (kx + (b - Z_c))^2 = R^2. \quad (24)$$

Координаты точек пересечения с наклонной границей рельефа дна

$$X_{1,2} = -2k * (b - Z_c) - 2 * x_c \pm \sqrt{\frac{(-2k*(b-Z_c)-2*X_c)^2 - 4*(1+k^2)*(X_c^2 + (b-Z_c)^2 - R^2)}{2*(2k*(b-Z_c)-R^2)}}, \quad (25)$$

где  $X_{1,2}$  – расстояние нахождения пересечения луча с границей рельефа дна

$$Z_{1,2} = k * X_{1,2} + b, \quad (26)$$

где  $Z_{1,2}$  – глубина нахождения пересечения луча с границей рельефа дна.

Точки пересечения с наклонной границей рельефа должны быть положительными:

$$X_{1,2} > 0 \text{ и } Z_{1,2} > 0$$

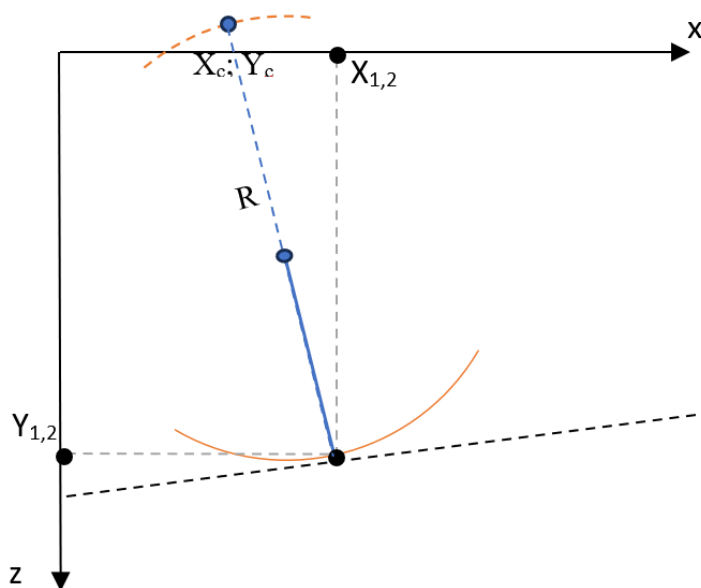


Рисунок 2.7 – Лучевые траектории луча. Синим цветом отмечены линии, характеристики дуги окружности ( $R$  – радиус кривизны,  $X_c$  и  $Y_c$  – координаты центра окружности). Оранжевым цветом акустический луч. Черной пунктирной линией уравнение прямой, характеризующий рельеф дна. Серым цветом точки пересечения с наклонным рельефом дна ( $X$  – расстояние, на котором луч попадает на дно;  $Z$  – глубина координаты пересечения луча с дном).

В качестве инструмента расчетов и визуализации использовался пакет прикладных программ MATLAB (Приложение Б).

Выделяют несколько типов вертикального распределения скорости звука. Подводный звуковой канал (ПЗК) образуется если скорость звука на поверхности ( $C_1$ ) меньше или больше скорости звука у дна ( $C_2$ ). Минимальная скорость звука ( $C_{\min}$ ) на некоторой глубине ( $z_{\min}$ ) называют осью ПЗК. Выделяют несколько типов ПЗК [6]. Для первого типа ПЗК, вертикальное распределение скорости характеризуется скорости звука на поверхности меньше скорости звука у дна (Рисунок 2.8а). Для второго типа скорость звука на поверхности больше скорости звука у дна (Рисунок 2.8б). Если источник находится на уровне  $z_{\min}$  или рядом с ним, то акустические волны будут простираются в слое от поверхности до глубины где скорость звука меньше скорости звука  $C_1$  для первого типа ПЗК и до глубины где скорость звука меньше  $C_2$  для второго типа ПЗК

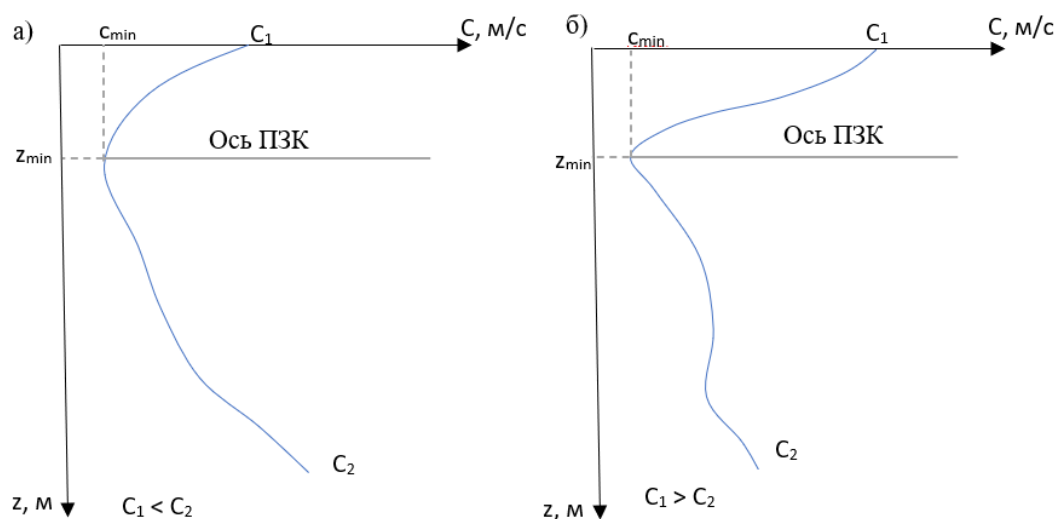


Рисунок 2.8 – Вертикальное распределение скорости звука, при котором образуется подводный звуковой канал первого (а) и второго типа (б)

### 3. Моделирование акустических сигналов в Баренцевом море

#### 3.1 Пространственное распределение температуры воды, солености и скорости звука

Пространственное распределение температуры, солености воды на исследуемом полигоне и их статистические оценки представлены на рисунках 3.1, 3.2 и в таблицах 3.1, 3.2 соответственно.

В верхних слоях температура воды в основном имеет более высокие значения, которые меняются в диапазоне от 4 °С до 6 °С. С увеличением глубины вода охлаждается, и температура воды достигает 0 °С – 2 °С. На выбранных разрезах, которые ближе к Кольскому полуострову, проходят теплые атлантические воды, характеризующиеся повышенной температурой и соленостью. На соленость влияет речной сток, распределяя соленые атлантические воды. При движении от берега на температуру и соленость начинают влиять смешанные слои атлантических и арктических вод. Поэтому температура воды на поверхности моря меняется довольно плавно, без резких переходов. На глубине появляется термоклин, характеризующийся теплыми верхними водами и холодными на глубине. Термоклин создает барьер для смешивания теплых и холодных вод. В районе образования термоклина соленость на нижних слоях более высокая, чем в верхних слоях воды (рисунки 3.1-3.2).

Наибольшее среднее значение температуры воды (7,40 °С) – на первом разрезе, связанное, как говорилось выше, с влиянием атлантических вод. При этом колебания температуры воды в первом разрезе наибольшие. Максимальная температуры – 8,92 °С, минимальная температура – 5,73 °С.

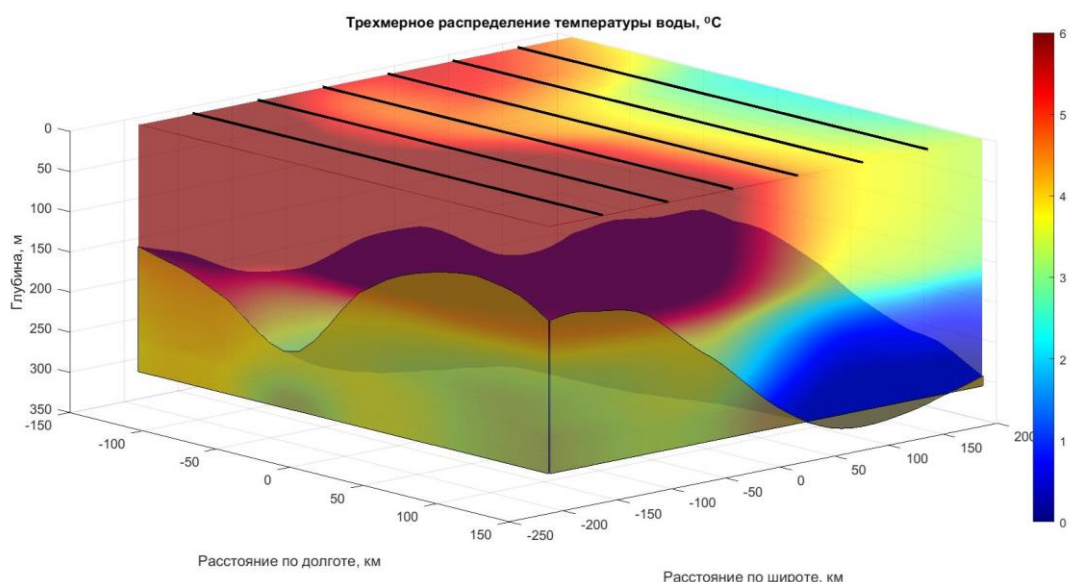


Рисунок 3.1 – Пространственное распределение температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) в районе исследования Баренцева моря с учетом рельефа дна.

Таблица 3.1 – Статистические характеристики температура воды  $^{\circ}\text{C}$  на глубине 0,5 и 55,8 м

| Разрез | Глубина<br>м | Среднее<br>$^{\circ}\text{C}$ | Макс,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Мин,<br>$^{\circ}\text{C}$ | глубина<br>м | Среднее,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Макс,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Мин,<br>$^{\circ}\text{C}$ |
|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| №1     | 0,5          | 7,40                          | 8,92                        | 5,73                       | 55,8         | 3,00                           | 4,60                        | 1,12                       |
| №2     | 0,5          | 6,98                          | 7,65                        | 6,17                       | 55,8         | 3,48                           | 4,91                        | 2,59                       |
| №3     | 0,5          | 5,76                          | 6,38                        | 4,81                       | 55,8         | 2,43                           | 3,82                        | 0,82                       |
| №4     | 0,5          | 4,48                          | 5,67                        | 3,88                       | 55,8         | 1,70                           | 3,35                        | 0,54                       |
| №5     | 0,5          | 3,47                          | 4,91                        | 2,65                       | 55,8         | 1,26                           | 3,42                        | -0,15                      |
| №6     | 0,5          | 2,55                          | 3,25                        | 2,20                       | 55,8         | 0,43                           | 1,74                        | -0,04                      |

С удалением от берега температура воды начинает равномерно понижаться. Наименьшая средняя температура воды – на глубине 0,5 м в 2020 году в районе исследования на разрезе №6, поскольку на разрез влияют холодные арктические воды, приходящие из Северного Ледовитого океана. Разрез характеризуется малой изменчивостью температуры воды на разрезе, с максимальной температурой –  $3,25^{\circ}\text{C}$  и минимальной –  $2,20^{\circ}\text{C}$ .

Температура воды на глубине 55,8 м изменяется аналогично температуре воды на глубине 0,5 м: среднее значение с удалением от берега уменьшается. По максимальным и минимальным значениям температуры воды на глубине

55,8 м диапазон изменчивости температуры воды больше.

Температура воды значительно влияет на скорость звука. Поскольку вода обладает свойством расширяться при повышении температуры воды и сжиматься при понижении температуры. Так что можно предположить, что при распространении акустических волн при переходе от одной среды в другую траектория луча будет изменяться.

Соленость воды дает менее значительный эффект на изменение скорости звука, чем температура воды. Диапазон изменчивости солености воды на глубине 0,5 м небольшой (таблица 3.2). Изменчивость солености составляла от 34,2 ‰ до 34,9 ‰. Влияние речного стока вносит вклад в колебания солености на разрезе 1 (70° в.д и 35 – 45 с.ш). В общем случае с увеличением глубины соленость увеличивается.

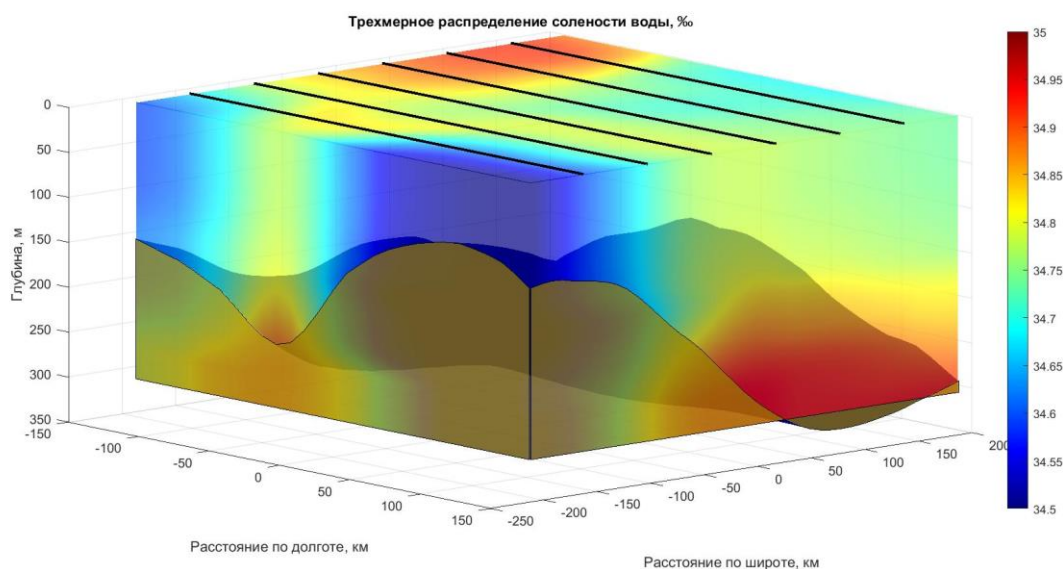


Рисунок 3.2 – Пространственное распределение солености воды (‰) в районе исследования Баренцева моря с учетом рельефа дна.

Таблица 3.2 – Статистические характеристики солёности воды (‰) на глубине 0,5 и 55,8 м.

| Разрез | Глубина<br>м | Среднее<br>°C | Макс,<br>°C | Мин,<br>°C | глубина<br>м | Среднее,<br>°C | Макс,<br>°C | Мин,<br>°C |
|--------|--------------|---------------|-------------|------------|--------------|----------------|-------------|------------|
| №1     | 0,5          | 34,43         | 34,66       | 34,24      | 55,8         | 34,49          | 34,73       | 34,26      |
| №2     | 0,5          | 34,64         | 34,81       | 34,56      | 55,8         | 34,65          | 34,87       | 34,51      |
| №3     | 0,5          | 34,78         | 34,82       | 34,74      | 55,8         | 34,84          | 34,88       | 34,73      |
| №4     | 0,5          | 34,80         | 34,89       | 34,71      | 55,8         | 34,86          | 34,93       | 34,80      |
| №5     | 0,5          | 34,78         | 34,92       | 34,70      | 55,8         | 34,85          | 34,95       | 34,78      |
| №6     | 0,5          | 34,70         | 34,77       | 34,64      | 55,8         | 34,82          | 34,86       | 34,77      |

Статистический анализ температуры и солёности по глубине может показать только примерные оценки гидрологического характера Баренцева моря и сделать общие выводы о возможном характере распространения акустических волн.

Например, температура воды будет вносить большой вклад в пространственное изменение скорости звука. Температура воды с глубиной понижается, а значит скорость звука тоже. Траектория акустических лучей будет стремиться пойти на дно, в сторону уменьшения скорости звука.

Совместное влияние температуры воды и солёности создают сложный профиль скорости звука в Баренцевом море. Результатом этого может быть факт, что в верхних слоях моря скорость звука максимальная, уменьшаясь с глубиной. Наиболее высокая скорость звука в верхних слоях моря – в районе Кольского полуострова, где наблюдалась самая высокая температура воды. Далее по пространству скорость звука на поверхности плавно уменьшалась. Постепенно, при снижении температуры воды с глубиной, при этом с довольно высокой солёностью, скорость звука плавно снижалась и с глубиной. В районе образования термоклина на глубине 200 м – 350 м скорость звука резко снизилась (рисунок 3.3).

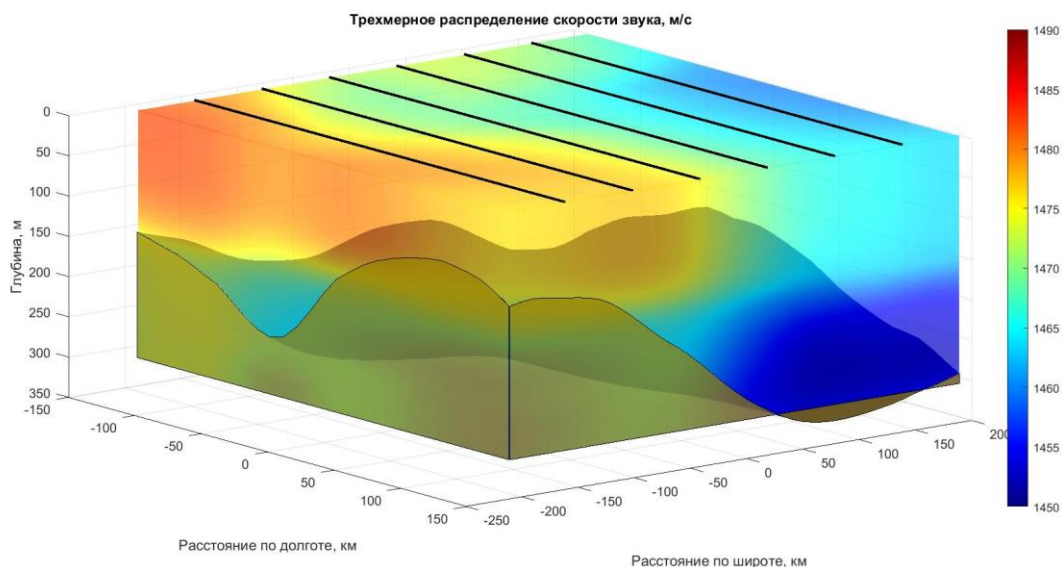


Рисунок 3.3 – Пространственное распределение скорости звука (м/с) в районе Баренцева моря.

### 3.2 Распространение акустических волн в разных условиях водной среды

В работе проводилось несколько экспериментов, что позволяет детально изучить влияние гидрологических факторов и сложного изменения рельефа дна. Поскольку распространение звука требует учета множества факторов, важно детально изучить влияние каждого фактора отдельно и комбинации всех факторов.

*Первый эксперимент (теоретический).* Сравнение распространения звуковых волн при ровном и наклонном дне с одинаковыми условиями среды.

Условия эксперимента 1:

1. Вертикальное распределение скорости звука для обоих сценариев одинаково (сценарий 1 – ровное дно, и сценарий 2 – наклонное дно).
2. Глубина источника звука одинакова.

*Сценарий 1*, характеризующий прямым дном (рисунки 3.4 – 3.5)

Как видно из рисунка 3.4, в профиле скорости звука выделяется подводный звуковой канал (ПЗК). Благодаря ПЗК акустические волны

распространяются в определенных слоях на большие расстояния без потери энергии. В нашем случае звуковой канал характеризуется вторым типом, т.е. скорость звука у поверхности выше скорости звука у дна. Ось ПЗК находится на глубине 110 м. Благодаря отрицательному градиенту лучи, выходящие из источника с малыми углами распространяются в канале ПЗК без отражения от дна и поверхности, достигая максимального расстояния распространения (см. рисунок 3.4, лучи, отмеченные красным цветом). Лучи выходящие из источника под большим углом отражаются от дна и поверхности (рисунок 3.4, лучи отмеченные зеленым цветом), в результате в начале пути распространения акустических волн образовалась акустическая тень.

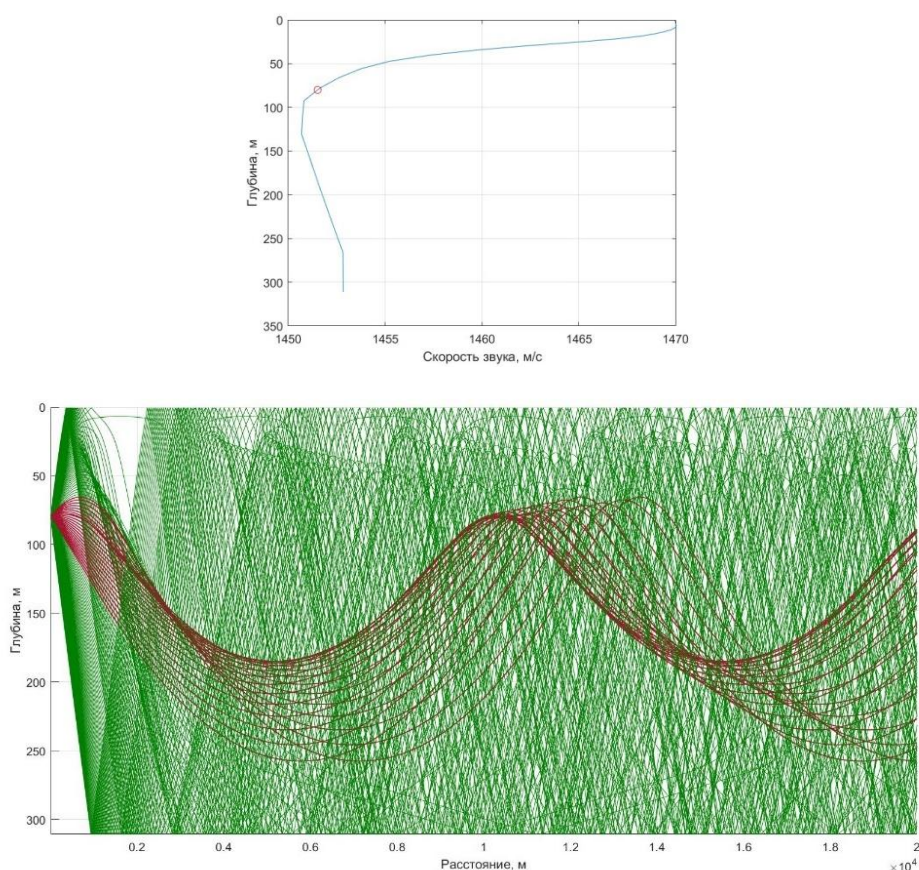


Рисунок 3.4 – Профиль скорости звука (вверху) и распространение акустических волн лучевым методом на ровном дне (внизу). Глубина источника 80 м. Начальные углы наклона лучей к источнику от  $-14^{\circ}$  до  $14^{\circ}$ . Красный цвет – лучи, не отражающиеся от дна или поверхности. Зеленый цвет – отражение лучей от поверхности вода-дно; поверхность-вода

На рисунке 3.5. показано волновое поле, которое описывает распространение акустических волн. При увеличении дальности распространения сигнал преломляется и отражается. Зоны с высоким акустическим давлением сигнала показаны как желтые и красные области. В этих областях сигнал меньше затухает и продолжает распространяться на дальние расстояния. Зоны с низким акустическим давлением (синие области) описывают сильное затухание сигнала. Отражение от поверхности и дна увеличивает потери при распространении звука. В зонах, где акустические волны не отражались от дна и поверхности, уровень акустического давления сигнала при увеличении расстояния от источника убывала меньше, чем лучи, которые отражались от дна и поверхности.

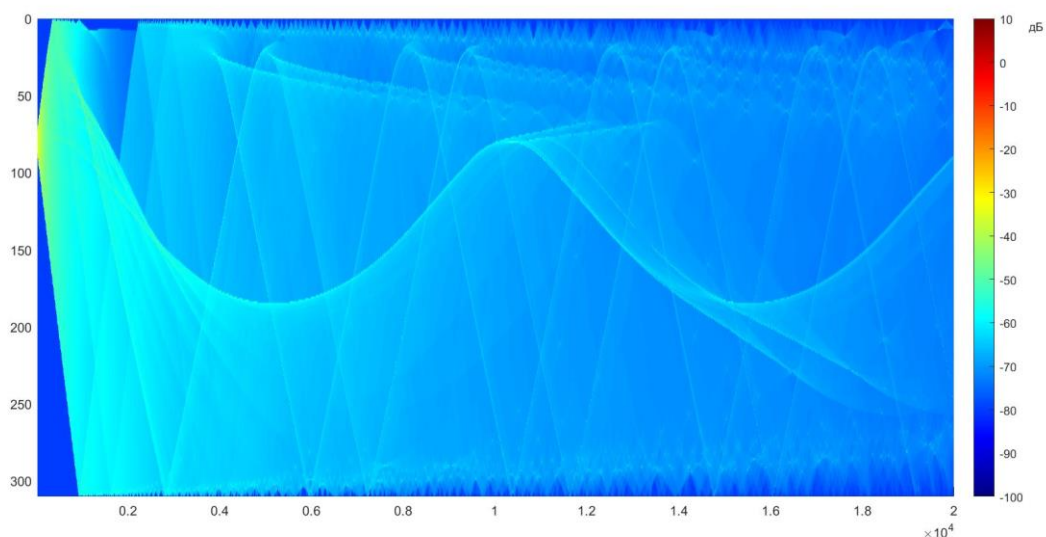


Рисунок 3.5 – Уровень акустического давления сигнала (дБ) в эксперименте с ровным дном.

Для источника звука с частотой 1000 Гц при ровном дне

*Сценарий 2.* Такое же распределение скорости звука, лучи распространяются при наклонном дне (рисунки 3.6-3.7).

На рисунке 3.6 видно, что лучи, распространяющиеся с малыми углами от источника, также не испытывают отражения от дна или поверхности (рисунок 3.6, лучи красного цвета). Но за счет наклона дна распространение акустических лучей слегка изменилось. В отличие от плоского дна, где проще

предсказать траекторию распространения звука, при наклонном дне траектория становится более непредсказуемой. То есть, в нашем случае некоторые лучи отражаются под более крутым углом и смогли сократить зону акустической тени (рисунок 3.6, лучи зеленого цвета).

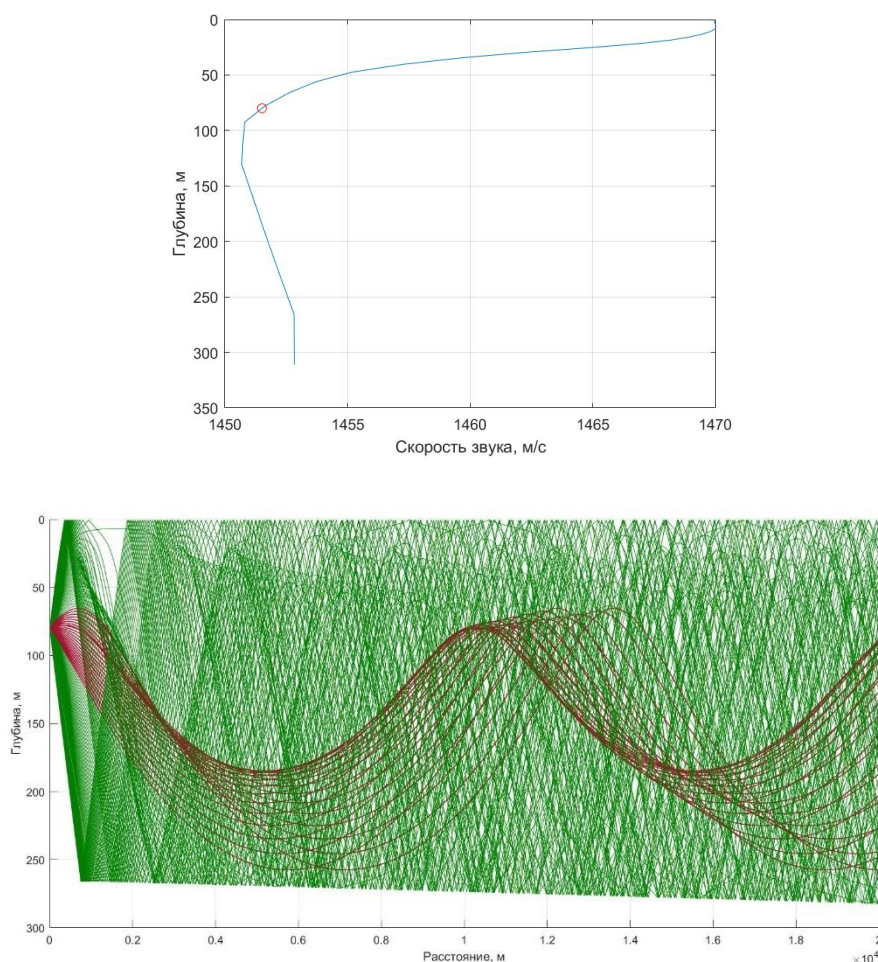


Рисунок 3.6 – Профиль скорости звука (вверху) и распространение акустических волн лучевым методом (внизу) на наклонном дне. Глубина источника 80 м. Начальные углы наклона лучей к источнику от  $-14^0$  до  $14^0$ . Красный цвет – лучи, не отражающиеся от дна и поверхности. Зеленый цвет – отражение лучей от поверхности вода-дно; поверхность-вода

Как и в случае с ровным дном акустическое давление сигнала наибольшая вблизи источника звука и при распространении звука дальше от него за счет отражении от дна и поверхности сигнал уменьшается (рисунок 3.7).

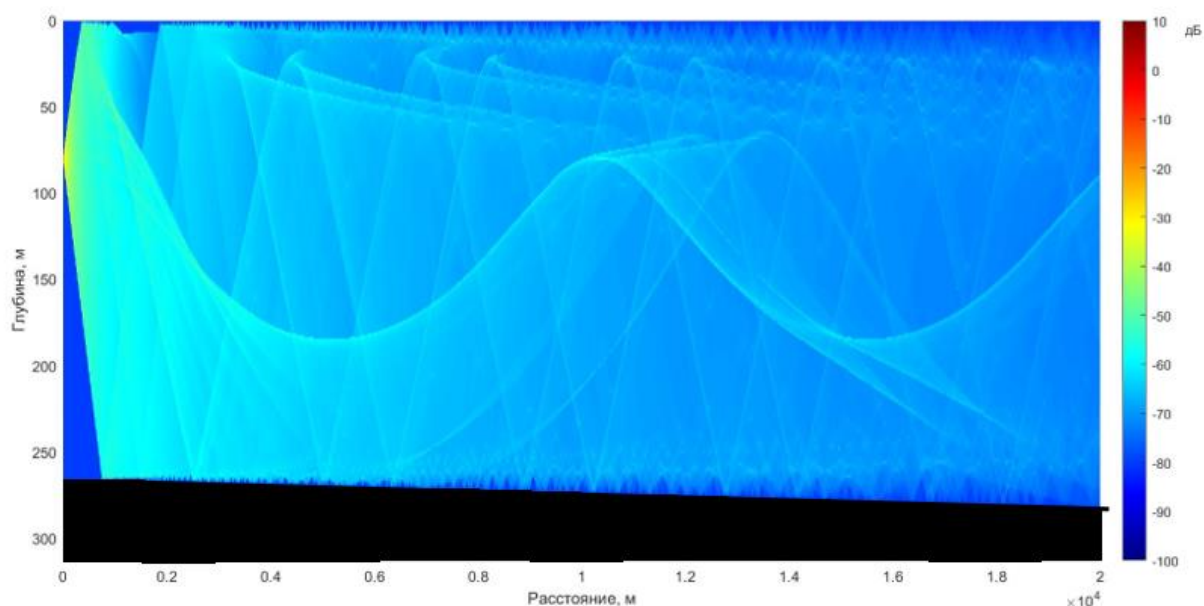


Рисунок 3.7 – Уровень акустического давления сигнала (дБ) в эксперименте с наклонным дном.

Для источника звука с частотой 1000 Гц при наклонном дне.

Рассмотрим изменчивость акустического давления сигнала при удалении от источника для ровного и наклонного дна (рисунки 3.8, 3.9). При удалении от источника до 906 м акустический сигнал для обоих случаев был одинаков. При увеличении расстояния уровень акустического давления сигнала менялся. В итоге акустический сигнал для ровного дна была меньше, чем для наклонного.

Рассчитанная разность акустического давления сигналов для двух сценариев (рисунок 3.9) (сценарий 1 минус сценарий 2) показала, что диапазон разностей уровней давления сигнала составил от 1 до -0.5 дБ. До расстояния 2500 м разница интенсивности колебалась от 0 до 0,9 дБ. От расстояния 2500 м до 10 км и 500 м различия давления сигнала менялась от 0,5 до -0.2 дБ. После – различия в сигнале варьировались от 0.9 до -0.5 дБ.

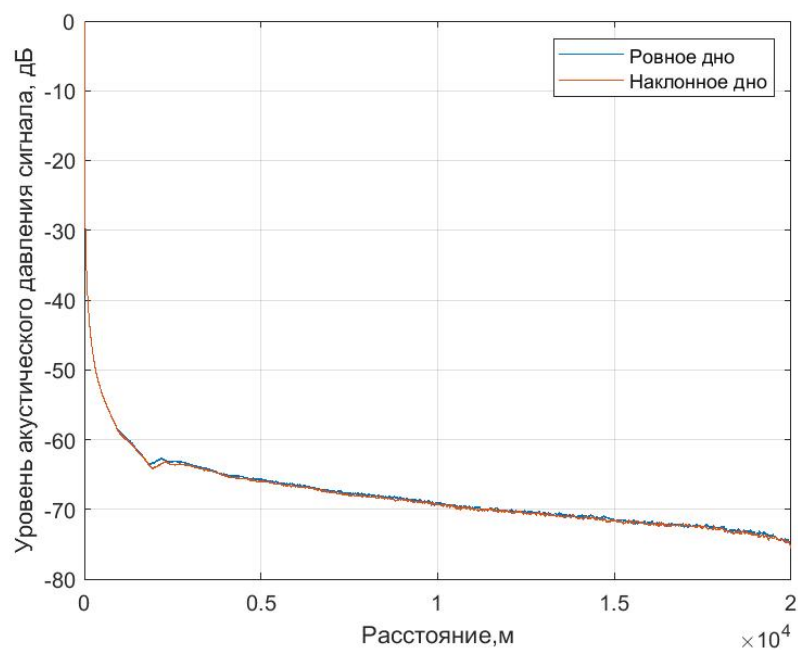


Рисунок 3.8 – Изменение уровня акустического давления сигнала при удалении от источника, усредненного по всем глубинам, для двух сценариев.

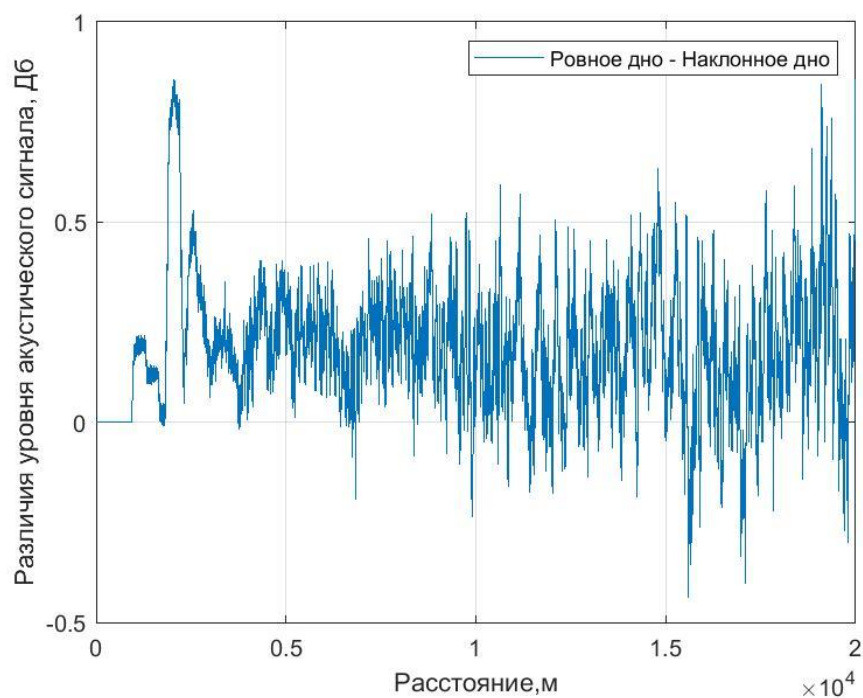


Рисунок 3.9 – Разница величин интенсивности сигнала для двух сценариев (сценарий 1 (ровное дно) минус сценарий 2 (наклонное дно)).

Таким образом, в целом, изменение рельефа акватории влияет на распространение акустических волн, поэтому важно учитывать при моделировании.

*Эксперимент 2.* Влияние на распространение акустических лучей:

- 1) изменения рельефа дна;
- 2) неоднородной среды;
- 3) различной глубины источника звука.

Неоднородная среда характеризуется изменением температуры и солености воды, а значит и скорости звука не только по глубине, но и по пространству с учетом географического положения. Неровный рельеф Баренцева моря обусловлено впадинами и возвышенностями, что препятствует дальнейму распространению звука [25]. В эксперименте изменение вертикального распределения скорости звука в морской среде было установлено на отметке 10 км от источника звука.

В рассмотренном сценарии оба распределения скорости звука по глубине отличаются отсутствием холодного промежуточного слоя и соответственного промежуточного слоя пониженной скорости звука на глубинах 50–250 м (Рисунок 3.10).

Как видно из рисунка 3.11 лучи, которые в первом эксперименте не отражались от дна и поверхности, при переходе границы с другими гидрологическими характеристиками, изогнулись вниз, в сторону дна, так как скорость во второй среде на горизонтах изменилась, и луч стал преломляться в сторону с меньшей скоростью звука. Также при переходе из одной среды в другую произошло преломление лучей.

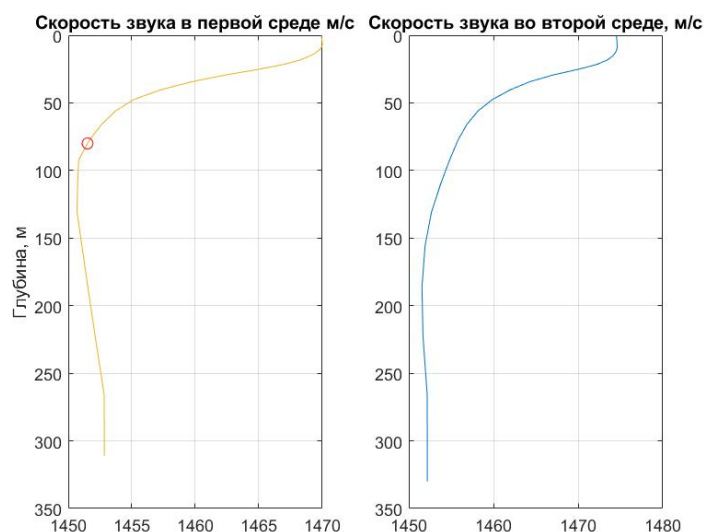


Рисунок 3.10 – Профили скорости звука для двух сред. Точкой отмечен источник в первой среде.

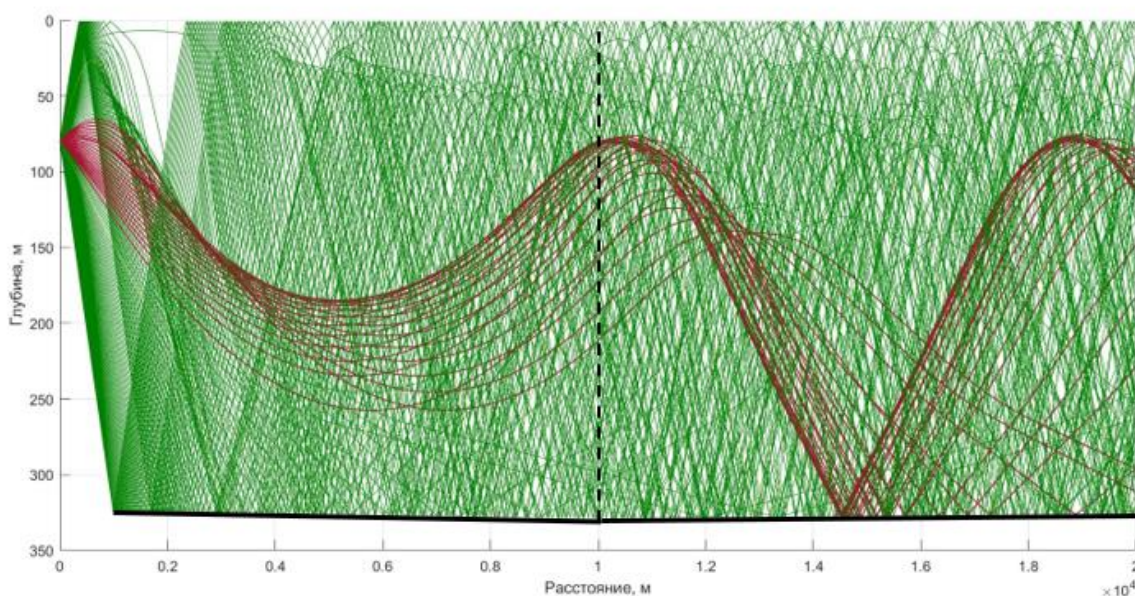


Рисунок 3.11 – Распространение акустических лучей через границу сред с другим профилем скорости звука (пунктирная линия). Красным отмечены лучи, которые при прохождении границы начинают отражаться от дна.

После перехода лучей из одной среды (расстояние от 0 до 10 км) в другую (от 10 км до 20 км) лучи, которые в эксперименте 1 (без учета изменения профиля скорости звука) распространялись в слое ПЗК, при изменении профиля

скорости пошли вниз в сторону дна и там начали отражаться. На расстоянии 14 км 500 м лучи отразились от дна (рисунки 3.11-3.12).

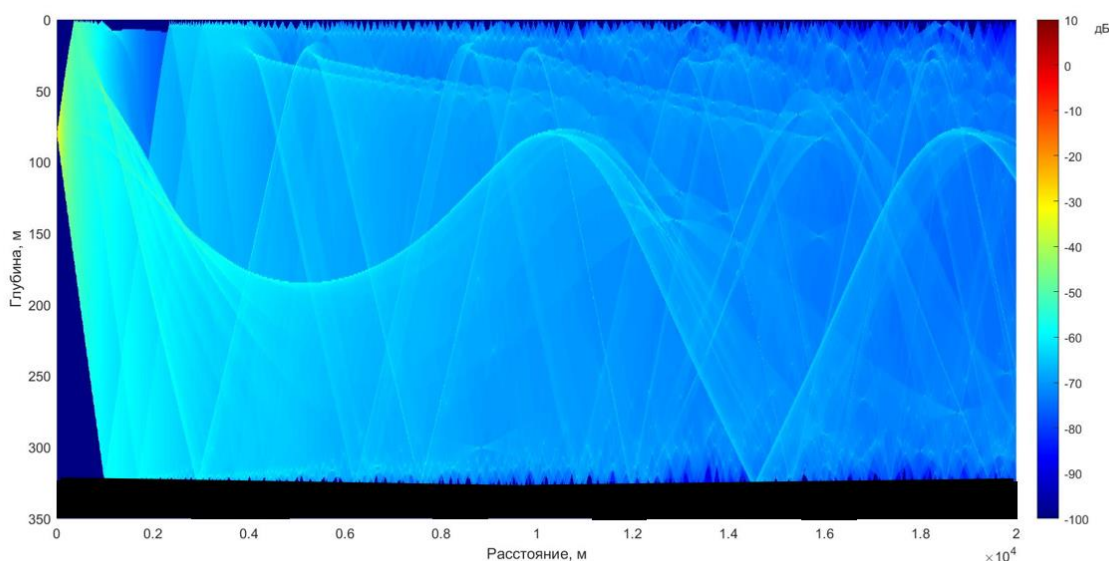


Рисунок 3.12 – Уровень акустического давления сигнала (дБ) в эксперименте при переходе лучей через границу с разными профилями скорости звука.

Для источника звука с частотой 1000 Гц

Сравним все три варианта распространения акустической волны и уровень акустического давления сигнала (рисунки 3.13, 3.14). Как и в предыдущих случаях, при удалении от источника до 906 м сигнал для всех случаев была одинаков.

Рассмотрим разницу давления сигнала при учете только рельефа и при учете рельефа и неоднородности морской среды. Стоит отметить, что до 8 км разницы в распространении звука при плоском и наклонном дне нет, так как при моделировании были одинаковые глубины. Изменение вертикального распределения скорости звука в морской среде было установлено на отметке 10 км от источника звука. Далее сигнал ослаблялся в зависимости от дальности источника звука, и разброс значений для обоих случаев составил примерно от -0,2 до 0,6 дБ. Разница в распространении звука при плоском дне с неоднородной средой и при наклонном дне обратно пропорциональны, что

может быть связано с небольшим уклоном дна, небольшой разницей вертикального профиля скорости звука, а также глубины источника, который находится в слое подводного звукового канала.

В таком случае, если необходимы примерные оценки уровня акустического давления сигнала, можно не учитывать влияние дна и неоднородности среды.

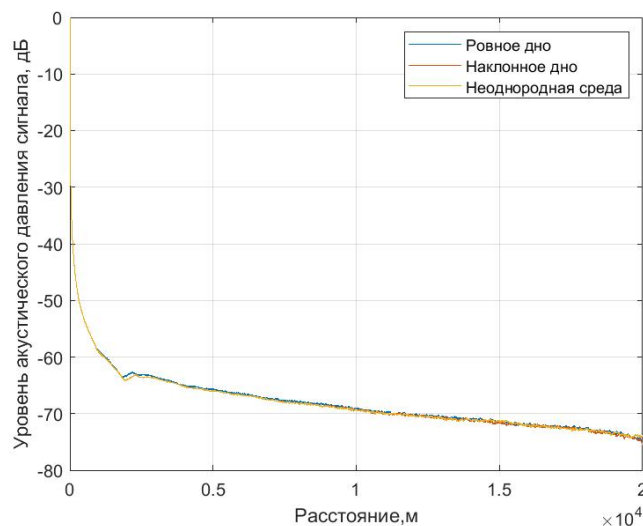


Рисунок 3.13 – Изменение уровня акустического давления сигнала при удалении от источника, усредненного по всем глубинам, в ходе двух экспериментов.

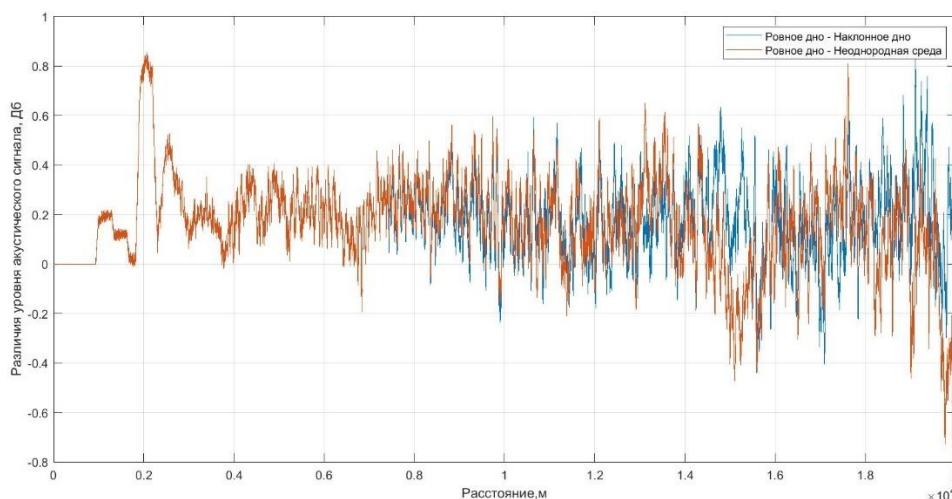


Рисунок 3.14 – Разница уровня акустического давления звукового сигнала в эксперименте с неоднородной морской средой для ровного дна и наклонного дна.

Как говорилось выше, важным влияющим фактором на распространение звука в море является отражение и преломление акустических волн и звука от типа грунта.

*Эксперимент 3.* Влияние характера распространения акустических волн и поглощение сигнала от песка и ила на дне.

В эксперименте 2 рассматривалось распространение акустических волн, где на дне был смоделирован песок.

Выполним моделирование для таких же условий морской среды за исключением того, что морское дно будет характеризоваться илистыми донными отложениями.

По методу лучевой акустики с расчетом углов скольжения и преломления по закону Снеллиуса построенная траектория распространения акустических лучей с донными отложениями в виде ила мало отличается от траектории распространения лучей с песком на дне (рисунок 3.15).

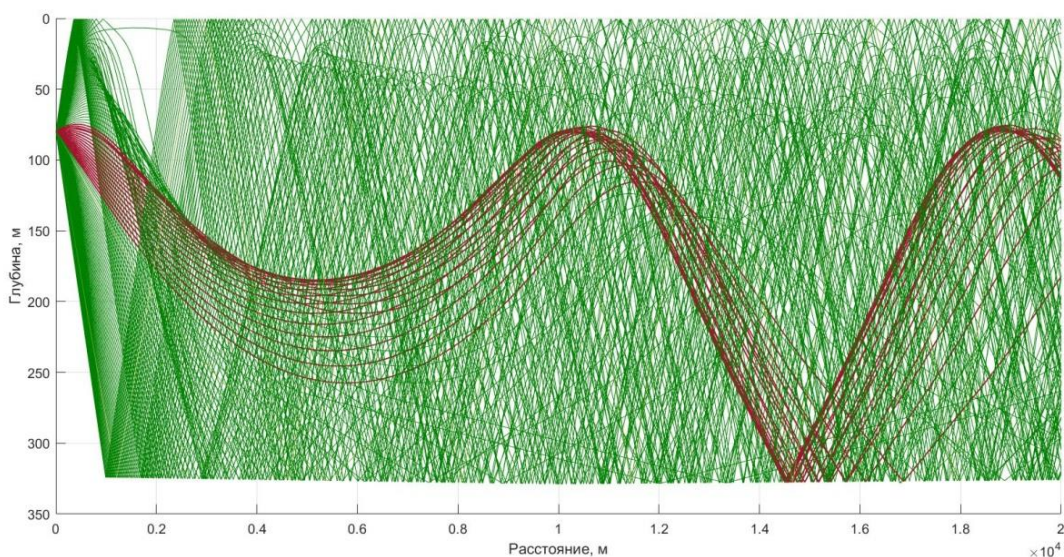


Рисунок 3.15 - Распространение акустических лучей через границу сред с другим профилем скорости звука и донными отложениями - ил. Красным отмечены лучи, которые при прохождении границы начинают отражаться от дна

Как видно из рисунков 3.16 и 3.17, в отличие от распространения сигнала от песчаного дна, при котором уровень акустического давления сигнала на расстоянии 20 км меняется от -50 до -60 дБ при илистом дне часть звуковой энергии поглотилась дном, и уровень сигналов на расстоянии 20 км варьировалась от -70 до -100 дБ.

Таким образом, только часть звуковой энергии, которая распространяется в подводном звуком канале доходит до расстояния в 20 км.

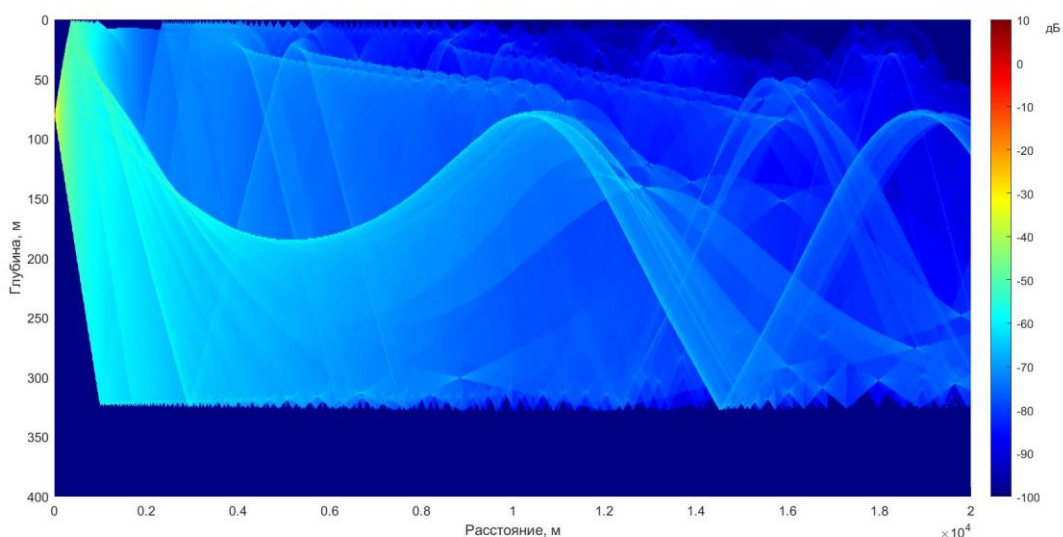


Рисунок 3.16 – Уровень акустического давления сигнала (дБ) в эксперименте при переходе лучей через границу с разными профилями скорости звука (на расстоянии 10 км от источника) и с илистым дном. Для источника звука с частотой 1000 Гц.

До 906 м сигнал для разных характеристик донных отложений не отличается (рисунок 3.17) и составляет -65 дБ. Далее идет резкий спад сигнала для илистых донных отложений. На расстоянии 10 км уровень сигнала доходит до уровня -78 дБ, и далее на расстоянии 20 км понижается почти до -90 дБ. При песчаном дне, в сравнении с илистым дном, также до 7000 м уровень сигнала не меняется. И также как и при илистом типе грунта, уровень сигнала с удалением от источника понижается, но более плавно, и достигает уровня акустического давления сигнала на расстоянии в 20 км до -73 дБ.

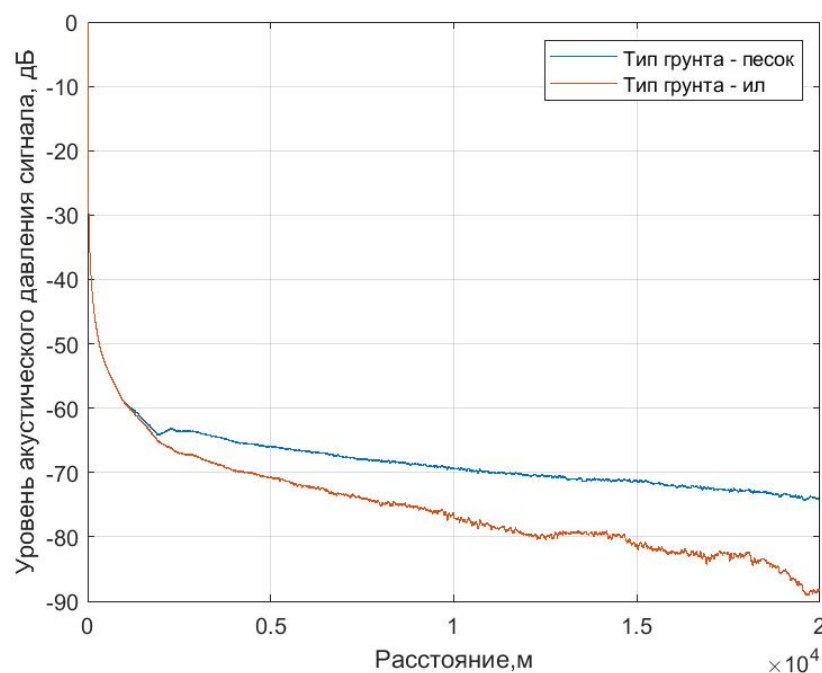


Рисунок 3.17 – Изменение уровня акустического давления сигнала, усредненного по всем глубинам, при удалении от источника, в ходе двух экспериментов с различными донными осадками.

### 3.3 Распространение акустических волн в Баренцевом море

Рассмотрим распространение акустической волны на разрезе 1 в Баренцевом море на двух станциях с координатами ( $70^0$  с.ш  $41^0$  в.д и  $70^0$  с.ш  $43^0$  в.д) и на разрезе 6 на двух станциях с координатами ( $75^0$  с.ш  $41^0$  в.д и  $75^0$  с.ш  $43^0$  в.д).

Оба разреза различаются сложным гидрологическим распределением по температуре и солености. Первый разрез подвержен влиянию теплых атлантических вод, а разрез 6 образован холодными арктическими водами.

Источник звука находился на глубине 40 м (рисунок 3.18), где скорость звука на глубине меньше скорости звука на поверхности. Как видно из лучевой картины (рисунок 3.19), некоторые акустические лучи отражались у дна, но не доходили до поверхности, преломляясь в среде с меньшей скоростью звука.

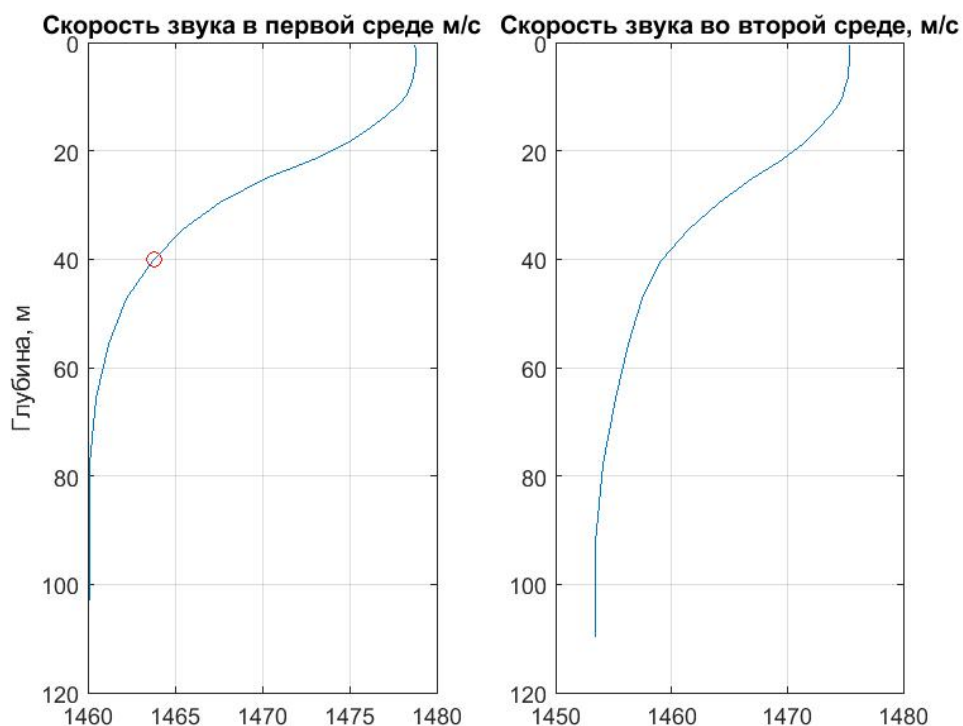


Рисунок 3.18 –Профиль скорости звука на разрезе 1 в точках с координатами:  $70^{\circ}$  с.ш  $41^{\circ}$  в.д и  $70^{\circ}$  с.ш  $43^{\circ}$  в.д.

Точкой отмечен источник звука.

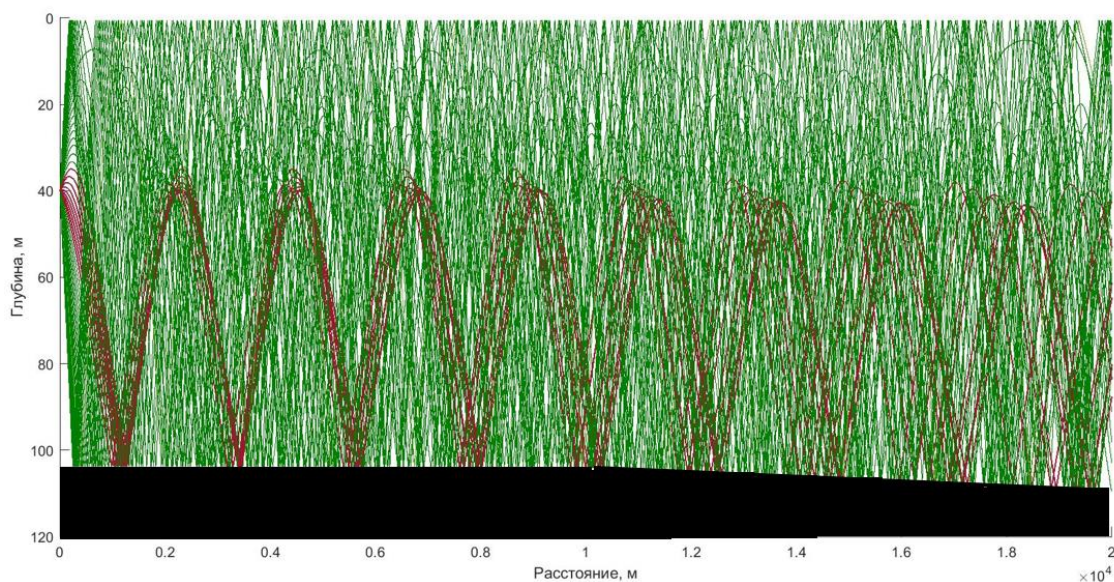


Рисунок 3.19 – Распространение акустических лучей на разрезе 1 между точками с координатами:  $70^{\circ}$  с.ш  $41^{\circ}$  в.д и  $70^{\circ}$  с.ш  $43^{\circ}$  в.д, через границу сред с другим профилем скорости звука, реальным профилем дна и донными отложениями – песок

Как видно из рисунка 3.20, уровень сигнала по мере распространения звука плавно ослаблялась для акустических лучей, распространяющиеся в слое от 40 м до дна.

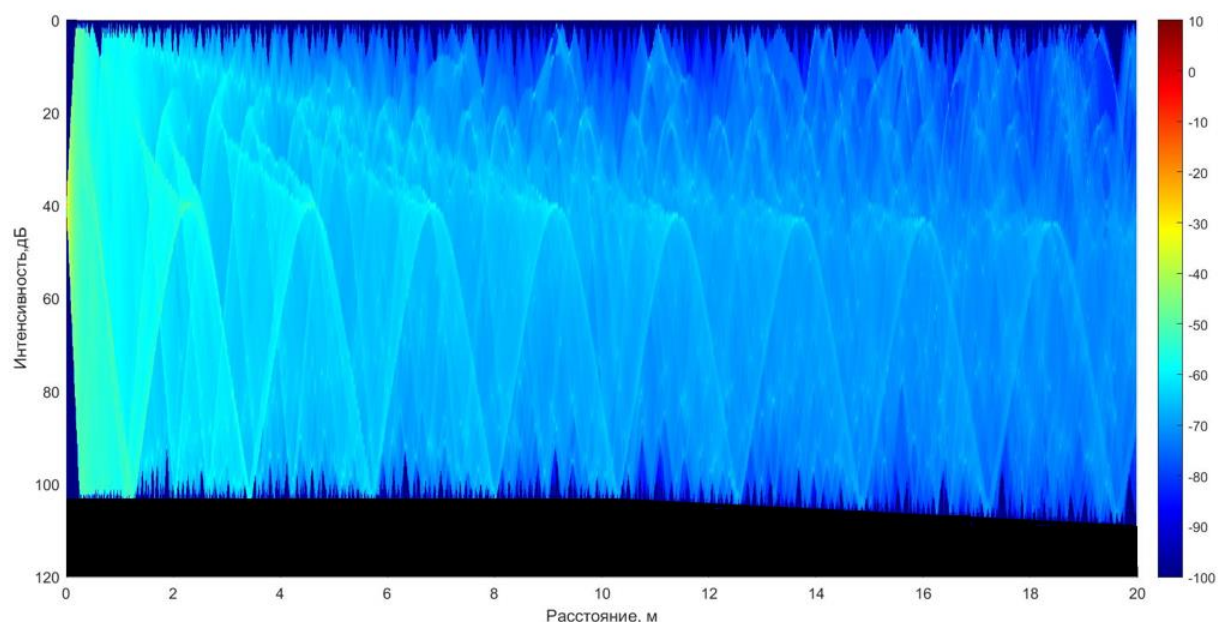


Рисунок 3.20 – Уровень акустического давления сигнала (дБ) при переходе звуковых лучей на разрезе 1 через границу между точками с координатами:  $70^{\circ}$  с.ш  $41^{\circ}$  в.д и  $70^{\circ}$  с.ш  $43^{\circ}$  в.д. Для источника звука с частотой 1000 Гц

Картина распространения акустических волн на разрезе 6 похожа с картиной распространения на разрезе 1 (рисунок 3.21). Так как тут тоже источник звука находится ниже слоя с высоким градиентом скорости. Лучи стремятся повернуть в сторону меньшего градиента скорости. Поэтому лучевая картина схожа с предыдущей. Лучи будут отражаться от слоя воды на уровне 50 м и разворачиваться ко дну (Рисунок 3.22). Часть акустических лучей с большим углом распространения от источника отражаются и от поверхности и от дна.

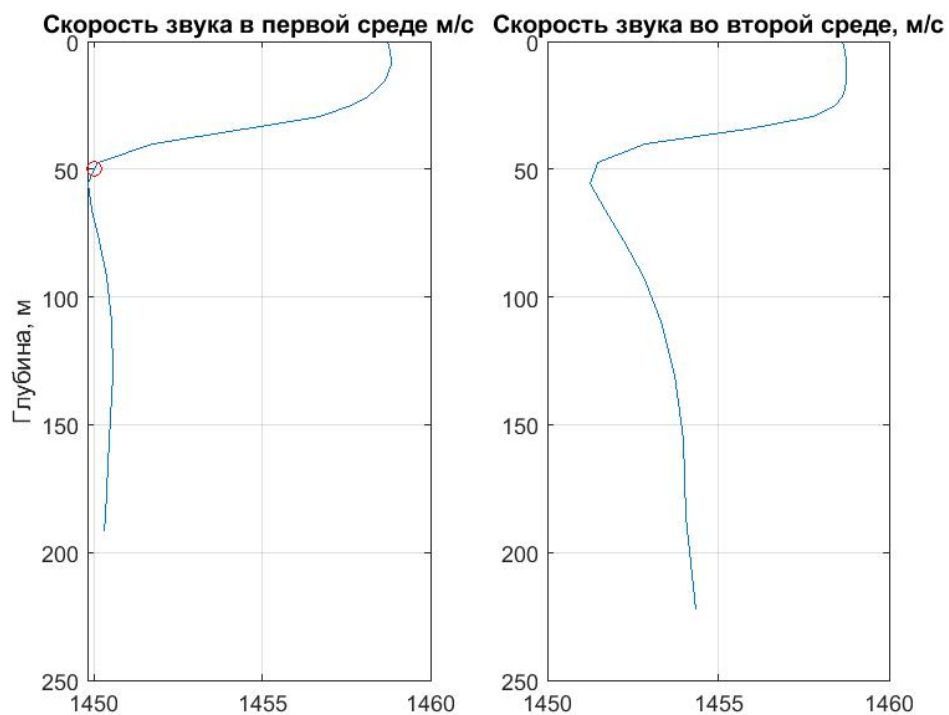


Рисунок 3.21 – Профиль скорости звука на разрезе 6 в точках с координатами:  $75^{\circ}$  с.ш  $41^{\circ}$  в.д и  $75^{\circ}$  с.ш  $43^{\circ}$  в.д. Точкой отмечен источник звука.

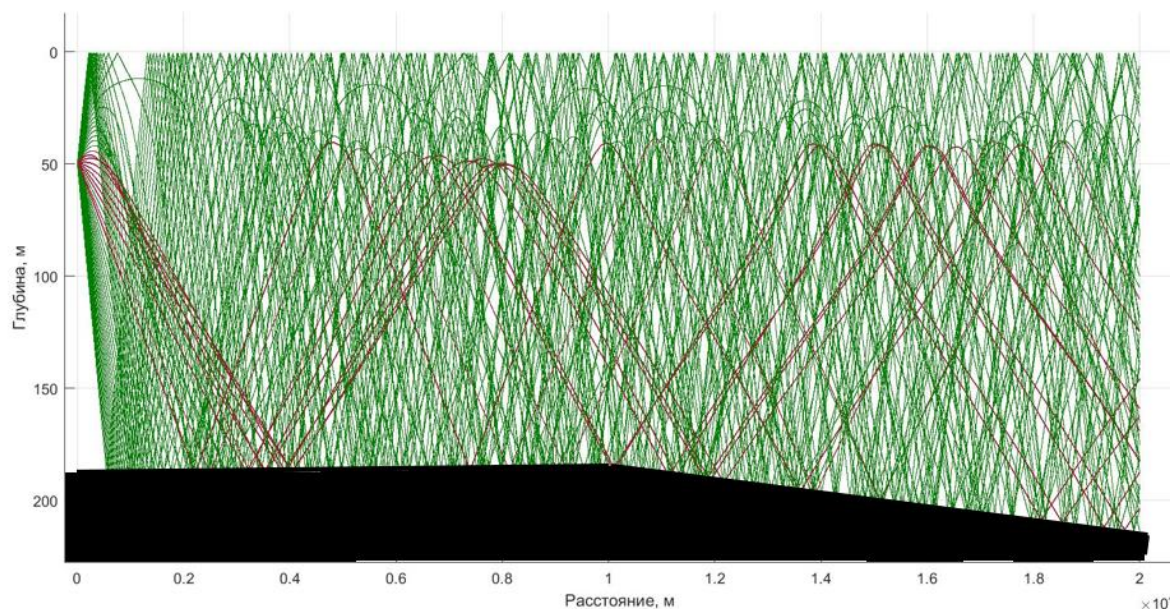


Рисунок 3.22 – Распространение акустических лучей на разрезе 6 между точками с координатами:  $75^{\circ}$  с.ш  $41^{\circ}$  в.д и  $75^{\circ}$  с.ш  $43^{\circ}$  в.д через границу сред с другим профилем скорости звука, реальным рельефом дна и донными отложениями – песок

Резкий склон после 10 км для отраженных акустических лучей от дна уровень акустического давления сигнала ослабляется больше, чем для разреза 1 (рисунок 3.23).

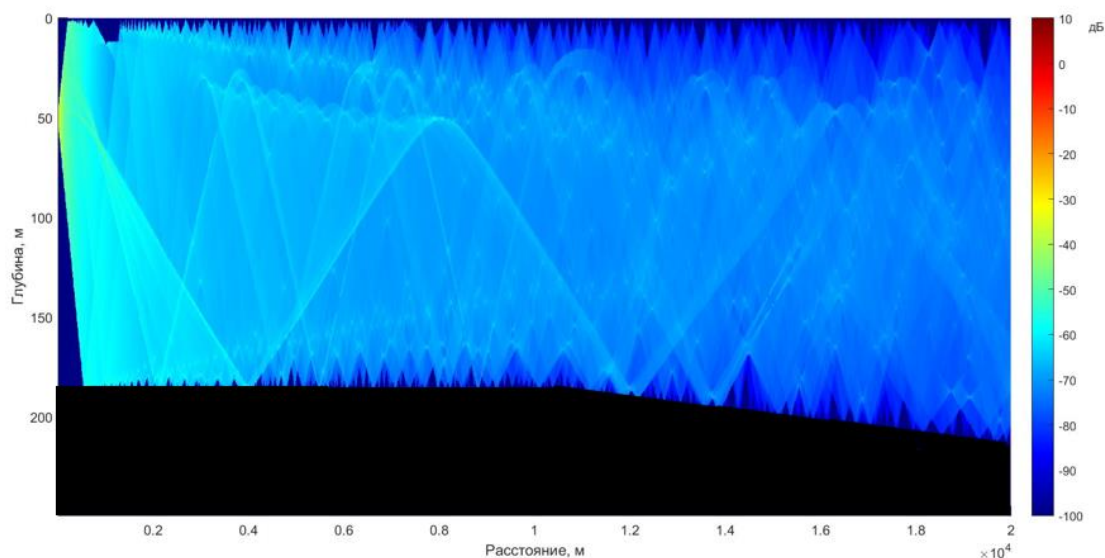


Рисунок 3.23 – Уровень акустического давления сигнала (дБ) при переходе звуковых лучей на разрезе 6 через границу между точками с координатами  $75^{\circ}$  с.ш  $41^{\circ}$  в.д и  $75^{\circ}$  с.ш  $43^{\circ}$  в.д. Для источника звука с частотой 1000 Гц.

## Заключение

В ходе работы была разработана программа Matlab для моделирования распространения акустических волн и оценки уровней сигналов с учетом отражения и преломления лучей за счет изменения амплитуд и углов лучей по закону Снеллиуса. Также в программе учитывалось отражения лучей от дна в зависимости от рельефа и типа грунта.

В ходе научного исследования было поставлено 3 эксперимента. В первом эксперименту акустические лучи распространялись по плоскому дну и по наклонному дну. В ходе сравнения разницы акустического давления сигнала сигнала для двух случаев показал, что колебания различий сигналов менялся от 1 до -0,5 дБ до расстояния 2500 м. От расстояния 2500 м до 1 км и 500 м различия сигнала менялась от 0,5 до -0.2 дБ. После – различия в сигнале варьировались от 0.9 до -0.5 дБ. Часть акустических волн распространялась без отражения от поверхности и дна так как источник звука установлен вблизи оси ПЗК второго типа.

Во втором эксперименте было поставлено условие, что морская среда изменчива по температуре и солености, а значит на распространение акустических волн влияло изменение вертикального профиля скорости звука. Рельеф дна также неоднороден по пространству с донными осадками в виде песка. При переходе от одной среды к другой акустические лучи, которые не отражались от дна и поверхности, за счет преломления начали распространяться в сторону дна и отражаться от него. При сравнении разницы уровней сигнала для ровного дна и неоднородной среды показал, что сигнал менялся от 0,2 до 0,6 дБ.

В ходе сравнения эксперимента 1 и эксперимента 2 были сделаны выводы, что если необходимы примерные оценки уровня сигнала, то можно не учитывать влияние дна и изменения скорости звука. Такой вариант можно использоваться если рельеф не сильно меняется, а также профили скорости звука.

Эксперимент 3 ставился для учета влияния характера донных осадков. Тип грунта поменялся с песка на ил. Траектория распространения акустических волн, построенных методом лучевой акустики, в сравнении с предыдущими экспериментами не поменялась. При удалении от источника сигнал быстрее ослаблялся для илистых донных отложений, чем для песчаных. После 1 км на поверхности образовалась акустическая тень.

Рассматривалось распространение акустических волн в Баренцевом море на двух разрезах с различием влияния течений: на разрез 1 влияют теплые атлантические воды, для разреза 6 – арктические. В обоих случаях источник звука был на глубине, где скорость звука меньше скорости звука на поверхности и лучи с малым углом от источника не отражались от поверхности, а только от дна. Уровень акустического давления сигнала при удалении от источника плавно ослабляется для акустических лучей, распространяющиеся от 50 м до дна. На распространение лучей в разрезе 6 рельеф дна сыграл важную роль при изменении уровня сигнала. Из-за резкого понижения глубины после 1 км сигнал начал уменьшаться и достиг уровня до -60 и -70 дБ.

Таким образом установлено, что параметры морской среды и рельефа дна оказывают существенное влияние на распространение акустических волн и сигналов.

## Список использованных источников

1. Сущенко А.А. Об актуальности исследования задач акустической томографии методами теории переноса излучения// Вестник ДВО РАН. 2021. №2, С.104 – 111
2. Алексеева Я.И, Панова Е.М, Белькович В.М. Этолого-акустическая характеристика скоплений белух в районе острова Мягостров, Голый, Сосновец, Роганка// Известия Российской академии наук. Серия биологическая 2013. №3. С. 345-356
3. Кудель М.Д., Михтеева Е.Ю. Численное моделирование влияния гидростатического давления на скорость распространения звука в морской воде //Конференция «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях». Санкт-Петербург, 7 апреля 2023 г. Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, 2023. С. 123-126
4. Попов Н.Н.. Методы сопряжения эмпирических измерений и данных дистанционного зондирования при разработке геоинформационной системы прогнозирования гидрофизических характеристик мелкого моря// Ученые записки РГГМУ. 2014. № 33. С. 163-167
5. Бреховских Л.М. Акустика океана.– М.; Наука, 1974. – 444 с.
6. Urick Robert J.. Principles of Underwater Sound.– Bock Company, 1975. P. 451.
7. Ying Liu, Cheng Chen, Xiao Feng. Investigating the reliable acoustic path properties in a global scale// Ocean Observation based on Underwater Acoustic Technology 2023. Vol. II. P. 34-38 DOI: 10.3389/fmars.2023.1213002.
8. Лис Н.А, Тимохов. Л.А. Статистические модели климатической изменчивости поверхностной температуры воды и ледовитости отдельных районов Баренцева моря // Конференция «Моря России: вызовы отечественной науки», 26-30 сентября, 2022 г.
9. Крашенинникова С.Б, Шокурова И.Г, Демидова А.Н. Особенности

поверхностной циркуляции в Северной Атлантики при изменении ледовитости Баренцева моря // Вестник Московского университета. 2022. № 5. С. 29-31

10. Лисицын А.П. Система Баренцева моря. – М.: ГЕОС, 2021. 672 с.

11. Di Maggio Dominic, John A. Colosi, John Joseph, Annalise Pearson, Peter F. Worcester, Matthew A. Dzieciuch. Observations of thermohaline sound-speed structure induced by internal waves and spice in the summer 2015 Canada Basin marginal ice zone // Science of the Anthropocene, 2018. P. 58-62. DOI: 10.1525/elementa.186

12. Worcester Peter F.; Megan S. Ballard. Ocean acoustics in the changing Arctic// Physics Today. 2020. No. 73.. P. 44-49 DOI: 10.1063/PT.3.4635

13. Монин А.С. Физика океана Том 2 Гидродинамика океана. –М., Наука, 1978 г.– 49 с.

14. Hovem Jens M.. Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation // Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices, 2013. P. 34–39. DOI:10.5772/55935

15. Oliveira Tiago C.A., Ying-Tsong Lin, Michael B. Porter. Underwater Sound Propagation Modeling in a Complex Shallow Water Environment // Frontiers in Marien Science. 2022. P. 23–27 DOI:10.3389/fmars.2021.751327

16. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Ярошенко А.А. Комплексное применение лучевого и волнового подходов к расчетам звуковых полей в условиях узкого волновода на шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 91–102. DOI:10.22449/2413-5577-2020-1-91-102

17. Котляков В.М. Морской лёд. – URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/2231713>

18. Балакин Р.А, Г.И Вилков. Исследование акустических свойств морского льда, покрытого снегом// Лед и Снег. 2018. С. 387 -395. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-387-395

19. Митько В.Б. Методы сопряжения эмпирических данных и данных дистанционного зондирования при разработке геоинформационной системы

прогнозирования гидрофизических характеристик мелкого моря // Ученые записки РГГМУ. 2014. №33. С. 163 - 167

20. Жамойда В.А. Ведение наблюдений, сбор и обобщенные качественных и количественных показателей состояния недр прибрежно-шельфовых зон Белого, Баренцева моря и Балтийского морей// Геологический отчет о результатах работ за 2018 г. ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2018. URL: <https://geomonitoring.ru/download/pshz/beloe2018.pdf>

21. Ившин В.А. Трендовые изменения температуры воды в придонном слое Баренцева моря в летний сезон 2004 – 2019 гг// Труды ВНИРО. 2022. С. 149-160. DOI:10.36038/2307-3497-2022-187-149-160

22. Вадов Р.В. Дальнее распространение звука в Центральной части Баренцева моря // Акустический журнал. 2003. Т. 49. С. 751-760

23. Раевский М. А., В. Г. Бурдуковская. Пространственная обработка акустических сигналов в океанических волноводах на фоне шумов ветрового происхождения// Акустический журнал. 2023. Т. 69, № 1. Стр. 73-83

24. Кацнельсон Б.Г. Распространение и рассеяние низкочастотного звука на морском шельфе: Дисс. доктора физико-математических наук: 01.04.06. 2011. 230 с.

25. Real Gaultier, G. Bazile Kinda, Léo Buatois, Lucie Bordois. Ocean Acoustic Measurements in the Barents Sea Polar Front// 6th Underwater Acoustics Conference and Exhibition. November 2021. DOI: 10.1121/2.0001486

26. Вязигина Н. А.. Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря// Лёд и Снег. 2021. Т. 61, № 3. С. 431–444. DOI:10.31857/S2076673421030099.

27. Артамонов А. Ю., И. А. Репина, Д. Г. Чечин. Исследование процессов взаимодействия атмосферы и океана в Баренцевом море и Северной Атлантике// Конференция «Моря России: вызовы отечественной науки», 26-30 сентября, 2022 г.

28. Букатов Ант. А., Е. А. Павленко, Н. М. Соловей. Влияние речного стока

на плотностную стратификацию вод в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском // Конференция «Моря России: вызовы отечественной науки», 26-30 сентября, 2022 г.

29. Егорова Е. С., Е. У. Миронов. Формирование возрастного состава льдов в юго-восточной части Баренцева моря в зимний период. // Конференция «Моря России: вызовы отечественной науки», 26-30 сентября, 2022 г.

30. Коник А. А., А. В. Зимин. Многолетняя фронтальная и вихревая динамика Баренцева и Карского морей. // Конференция «Моря России: вызовы отечественной науки», 26-30 сентября, 2022 г.

# Приложение А. Координаты точек разреза с максимальными глубинами

Таблица А1 – Координаты точек разреза с максимальными глубинами.

| № | северная<br>широта,<br>грд. | Восточная<br>долгота,<br>грд. | Глубина,<br>м | № | северная<br>широта,<br>грд. | Восточная<br>долгота,<br>грд. | Глубина,<br>м |
|---|-----------------------------|-------------------------------|---------------|---|-----------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | 70                          | 35                            | 230           | 4 | 73                          | 35                            | 211           |
| 1 | 70                          | 37                            | 153           | 4 | 73                          | 37                            | 225           |
| 1 | 70                          | 39                            | 169           | 4 | 73                          | 39                            | 287           |
| 1 | 70                          | 41                            | 103           | 4 | 73                          | 41                            | 359           |
| 1 | 70                          | 43                            | 125           | 4 | 73                          | 43                            | 349           |
| 1 | 70                          | 45                            | 99            | 4 | 73                          | 45                            | 335           |
| 2 | 71                          | 35                            | 172           | 5 | 74                          | 35                            | 273           |
| 2 | 71                          | 37                            | 199           | 5 | 74                          | 37                            | 234           |
| 2 | 71                          | 39                            | 272           | 5 | 74                          | 39                            | 211           |
| 2 | 71                          | 41                            | 132           | 5 | 74                          | 41                            | 240           |
| 2 | 71                          | 43                            | 96            | 5 | 74                          | 43                            | 308           |
| 2 | 71                          | 45                            | 159           | 5 | 74                          | 45                            | 335           |
| 3 | 72                          | 35                            | 240           | 6 | 75                          | 35                            | 191           |
| 3 | 72                          | 37                            | 265           | 6 | 75                          | 37                            | 184           |
| 3 | 72                          | 39                            | 311           | 6 | 75                          | 39                            | 195           |
| 3 | 72                          | 41                            | 319           | 6 | 75                          | 41                            | 192           |
| 3 | 72                          | 43                            | 260           | 6 | 75                          | 43                            | 266           |
| 3 | 72                          | 45                            | 223           | 6 | 75                          | 45                            | 283           |

## Приложение Б. Программа расчета траектории акустических лучей

```
clc
clear all
load('Razrez11.mat')
RAZ1=Razrez11;
V_DNA=R1_VPES;
ik=1
[lat,lon,H,T,S,dep,Vel]=R1_RAZ_DANNY_DIP3_PR(RAZ1,ik);
grd=pi/180;
lat1=[70 70 70 70 70 70 70 70 70 70];
lon1=[35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45];
hh1=[230 151 153 159 169 163 103 104 125 108 99];

lat1_km=lat1*60*1.852
lon1_km=lon1*60*1.852.*cos(lat1*grd)
lon1_m=lon1_km*1000;

for nj=1:10
    b_b1=hh1(nj);
    bb11(nj)=b_b1;
    k_k1=(hh1(nj+1)-hh1(nj))/(lon1_m(nj+1)-lon1_m(nj));
    kk1(nj)=k_k1;
end
KK1=kk1(ik);
KK2=kk1(ik+1);
BB1=hh1(ik+1)-10000*KK1;
BB2=hh1(ik);

Z=H;
Cz=Vel;
Zs=40;%Глубина источника
ZSl=[Z Zs];% Глубины
[ZZ,N]=sort(ZSl);% Сортировка скорости звука по глубинам
NZ=max(size(Z));% Количество Cz

for l=1:NZ-1
    if N(l+1)>N(l)+1
        k=N(l);% Номер слоя источника
    end
    end
    dCS=Cz(k+1)-Cz(k);% Разность С в слое источника
    CZs=Cz(k)+dCS/(Z(k+1)-Z(k))*(Zs-Z(k));% С на горизонте источника
    CZZ=[Cz CZs];% Добавление С на горизонте источника
    Cz=CZZ(N);% Упорядочение С
    NZ=max(size(ZZ));%
    plot(Cz,ZZ)
    hold on
    plot(CZs,Zs,'or')
    dZ=ZZ(2:end)-ZZ(1:end-1);
    dCz=Cz(2:end)-Cz(1:end-1);
```

```

g=dCz./dZ;% градиент C
Alf=-14.1:.5:14;% Углы выхода лучей
Nal=max(size(Alf));
alf=Alf*grd;% Перевод углов в радианы
xnd=0;% Задание конца луча
figure
hold on
xxv{Nal,1}=[];
zzv=xxv;
XDV=xxv;
VDN=xxv;
for l=1:Nal
    XDV{l,1}=0;
    VDN{l,1}=1;
end
q=0;
kk=kk1(ik+1);
bb1=bb11(ik+1);
alfnkl=atan(kk);

SR2=10000;
x = 0;

for l=1:29 % Цикл по лучам к поверхности
    %l
    VOTR=1;
    XDNA=0;
    VV=1;
    NHg=k+1 % Номер C источника
    xnd=0;% Задание конца луча

    [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZZ(NHg),NHg,g(NHg-
1),Cz(NHg-1:NHg),alf(l),xnd); %Параметры луча в слое от источника вверх
    if x > SR2+3000

        break;
    end
    for j=1:20 % Цикл по лучам к поверхности и дну
        j;
        q=q+1;
        while Ng>1 & alfD<0 % Условие когда лучи идут вверх
            [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZZ(Ng),Ng,g(Ng-
1),Cz(Ng-1:Ng),alfD,xnd);%kk,SR2); %Параметры луча в слоях от источника вверх
            if x > SR2+3000
            end
        end%while
        if Ng==1 % Условие когда луч достиг поверхности
            alfD=-alfD; % Луч пошёл ко дну
        end%if

        while Ng<NZ & alfD>0 % Условие когда лучи идут ко дну
            xnd1=xnd;

```

```

TT(l)=NHg;
TTT(l)=Alf(l);
[alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR
(NZ,ZZ(Ng),Ng,g(Ng),Cz(Ng:Ng+1),alfD,xnd,KK1,BB1); %Параметры луча в слоях от
поверхности ко дну
if x > SR2+3000
    break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
end

end

if NTR==1;% Условие когда луч достиг дна
alfD=-alfD+2*alfnkl;% Луч пошёл к поверхности
ZC=z(end);
XDNA=[XDNA x(end)];NAID=abs(round(alfD/grd)*10+1);
Vd=V_DNA(NAID);
VV=VV*Vd;
VOTR=[VOTR VV];
[alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZC,Ng,g(Ng-
1),CZ,alfD,xnd); %Параметры луча в слоях от источника вверх
if x > SR2+3000
    break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
end
NTR=0;
end
if xnd>20000% Условие когда луч больше 10000
    break % Выход из цикла по j
end%if
end%for j
XDV{1,1}=XDNA;
VDN{1,1}=VOTR;
end%for l
x = 0;
for l=30:57 %Цикл по лучам от источника ко дну
    VOTR=1;
    XDNA=0;
    VV=1;
    NHg=k+1; % Горизонт источника
    xnd=0; % Конец луча

[alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR
(NZ,ZZ(NHg),NHg,g(NHg),Cz(NHg:NHg+1),alf(l),xnd,KK1,BB1); % Параметры луча от
источника до конца слоя ко дну
if x > SR2+3000
    break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
end
for j=1:20 % Цикл по лучам ко дну и поверхности
    %j
    while Ng<NZ & alfD>0 % Условие хода лучей ко дну
        xndl=xnd;
        [alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR
(NZ,ZZ(Ng),Ng,g(Ng),Cz(Ng:Ng+1),alfD,xnd,KK1,BB1); % Параметры лучей ко дну
        if x > SR2+3000

```

```

        break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
    end
end%while
    if NTR==1;% Условие когда луч достиг дна
        alfD=-alfD+2*alfnkl;% Луч пошёл к поверхности
        XDNA=[XDNA x(end)];
        NAID=abs(round(alfD/grd)*10+1);
        Vd=V_DNA(NAID);
        VV=VV*Vd;
        VOTR=[VOTR VV];
        ZC=z(end);
        [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZC,Ng,g(Ng-
1),Cz,alfD,xnd);%kk,SR2); %Параметры луча в слоях от источника вверх
        if x > SR2+3000
            break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
        end
        NTR=0;
        qx=xxv{1,1};
        x1=[qx x];
        xxv{1,1}=x1;
        qz=zzv{1,1};
        z1=[qz z];
        zzv{1,1}=z1;
    end
    while Ng>1 & alfD<0 % Условие хода лучей к поверхности
        [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZZ(Ng),Ng,g(Ng-
1),Cz(Ng-1:Ng),alfD,xnd);%kk,SR2); % Параметры лучей к поверхности
        if x > SR2+3000
            break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
        end
    end
    if Ng==1% условие прихода лучей к поверхности
        alfD=-alfD;% Луч пошёл ко дну
    end%if
    if xnd>20000 % Условие когда луч больше 10000
        %xnd>20000
        break % Выход из цикла по j
    end%if
end%for j
    XDV{1,1}=XDNA;
    VDN{1,1}=VOTR;

end

[xi,ZI,ZI_k,CZI,CZI2,Alf0,AlfB0,AlfB1,AlfB2,Alf2,ik,MZI] = R1_RAS_NEOD_SR_DIP3_PR
(RAZ1,ZZ,Cz,CZs,xxv,zzv,SR2,ik,alf);

function [alfD,x,z,Ngd,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR
(ZZ,Ng,g,Cz,alfB,xnd);
    grd=pi/180;
    R0=-Cz(2)/(g*cos(alfB));
    Xc0=R0*sin(alfB);
    Zc0=R0*cos(alfB);

```

```

if g>0
dal=-.1*grd;
alfD=-acos(Cz(1)*cos(alfB)/Cz(2));
Ngd=Ng-1;
else
dal=.1*grd;
Ug=-acos(Cz(2)/Cz(1));
if alfB<Ug
alfD=-acos(Cz(1)*cos(alfB)/Cz(2));
Ngd=Ng-1;
elseif alfB>=Ug
alfD=-alfB;
Ngd=Ng;
end
end
al=alfB:dal:alfD;
x=R0*sin(al)-Xc0+xnd;
x(end+1)=R0*sin(alfD)-Xc0+xnd;
z=-ZZ+R0*cos(al)-Zc0;
z(end+1)=-ZZ+R0*cos(alfD)-Zc0;
xnd=x(end);
z=-z;

function [alfD,x,z,Ngd,xnd,NTR,Cz,R0,Xc0,Zc0] =
R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR (NZ,ZZ,Ng,g,Cz,alfB,xnd,kk,bb1);
grd=pi/180;
alfB;
kk;

alfnkl=atan(kk);
bb=bb1;
x=[0 10000];
y=kk*x+bb;
R0=-Cz(1)/(g*cos(alfB));
Xc0=R0*sin(alfB)
Zc0=R0*cos(alfB)
ZZ;
Xo=-Xc0+xnd;
Zo=ZZ+Zc0;
Ng;
NZ;
NTR=0;
if Ng==NZ-1;
[Xp,Zp] = R1_PERESECH_CYRC_NAKLON_DIP3_PR(Xo,Zo,R0,g,kk,bb);
Cz(2)=Cz(1)+g*(Zp-ZZ);
if imag(Zp)==0
NTR=1;
end
end
if g<0
dal=.1*grd;
alfD=acos(Cz(2)*cos(alfB)/Cz(1));

```

```

Ngd=Ng+1;
else
dal=-.1*grd;
Ug=acos(Cz(1)/Cz(2));
if alfB>Ug
    alfD=acos(Cz(2)*cos(alfB)/Cz(1));
    Ngd=Ng+1;
elseif alfB<=Ug
    alfD=-alfB;
    Ngd=Ng;
end
end
al=alfB:dal:alfD;
x=R0*sin(al)-Xc0+xnd;
x(end+1)=R0*sin(alfD)-Xc0+xnd;
z=-ZZ+R0*cos(al)-Zc0;
z(end+1)=-ZZ+R0*cos(alfD)-Zc0;
Ngd;
Ng ;
NZ;
xnd=x(end);
z=-z;

function [X,Y,R] = R6_PERESECH_CYRC_NAKLON_DIP3_PR(Xc0,Zc0,R0,g,kk,bb);
SR2 = 10000;
    grd=pi/180;
    kk;
    alfnkl=atan(kk);
    bb;
    x=[0 10000];
    y=kk*x+bb;
    k=(y(1)-y(2))/(x(1)-x(2));
    b=(y(1)+y(2)-k*(x(1)+x(2)))/2;
    Xc=Xc0
    Yc=Zc0
    R=R0;
    A=1+k^2;
    B=2*k*(b-Yc)-2*Xc;
    C=Xc^2+(b-Yc)^2-R^2;
    if g<0
        X=(-B+sqrt(B^2-4*A*C))/(2*A);
    else
        X=(-B-sqrt(B^2-4*A*C))/(2*A);
    end
    Y=k*X+b;
    alf=0:360;
    Alf=alf*grd;
    xx=R*cos(Alf)+Xc;
    yy=R*sin(Alf)+Yc;
    xl=-10:20;
    yl=xl*k+b;
    if g>0

```

```

    if X > SR2+3000
        return;
    end
end

function [xi,ZI,ZI_k,CZI,CZI2,Alf0,AlfB0,AlfB1,AlfB2,Alf2,ik,MZI] =
R1_RAS_NEOD_SR_DIP3_PR (RAZ1,ZZ,Cz,CZs,xxv,zzv,SR2,ik,alf);
X_ras=10000;
Z1=ZZ;
X=xxv;
Y=zzv;
ZI=[];
Nal=max(size(alf));
xi=1:X_ras;
Nz=max(size(xi));
ZI=zeros(Nz,Nal);
NXI=max(size(xi));
MZI=zeros(NXI,Nal);
figure
hold on
for n=1:Nal;
    xx=X{n,1};
    zz=Y{n,1};
    NV=max(size(xx));
    v=(1:NV)*1e-10;
    xk=xx+v;
    zi=interp1(xk,zz,xi);
    MZI(:,n)=zi';
    plot(xi,zi)
end
ZI=MZI;
ZI_k=ZI(end,:)
figure
CZI=interp1(ZZ,Cz,ZI_k,'linear','extrap');
grd=pi/180;
Alf0=alf;
for k=1:Nal
    AlfB0(k)=acos(CZI(k).*cos(Alf0(k))./CZs);
    AlfB1(k)=pi./2-AlfB0(k);
end
ik=ik+1
[lat,lon,H,T,S,dep,Vel] = R1_RAZ_DANNY_DIP3_PR (RAZ1,ik);
dep2=dep(1);
Z2=H
Cz2=Vel;
CZI2=interp1(Z2,Cz2,ZI_k,'linear','extrap');
plot(CZI,ZI_k,'ok')
hold on
plot(CZI2,ZI_k,'ob')
grid
legend('Скорость звука в первой среде','Скорость звука в второй среде')
AlfB2=zeros(1,Nal);

```

```

Alf2=zeros(1,Nal);
dq=MZI(end,:)-MZI(end-1,:);
for kl=1:Nal
AlfB2(kl)=acos((cos(AlfB1(kl))*CZI2(kl))/CZI(kl));
Alf2(kl)=(pi/2)-AlfB2(kl);
if dq(kl)<0;
    Alf2(kl) = -Alf2(kl);
end
end
end

figure(5)
hold on
Z = H;
Cz = Vel;

xxv1{Nal,1}=[];
zzv1=xxv1;
q = 0;
kk = KK2;
bb1 = BB2;
alfnkl = atan(kk);

for kl=1:Nal
Zs = ZI_k(kl); % Глубина источника
ZS1 = [Z Zs]; % Глубины
[ZZ, N] = sort(ZS1); % Сортировка скорости звука по глубинам
NZ = max(size(Z)); % Количество Cz

for l = 1:NZ-1
    if N(l + 1) > N(l) + 1
        k = N(l); % Номер слоя источника
    end
end

CZs=CZI2(kl)
CZZ = [Cz CZs]; % Добавление C на горизонте источника
Cz = CZZ(N); % Упорядочение C
NZ = max(size(ZZ));
dZ = ZZ(2:end) - ZZ(1:end-1);
dCz = Cz(2:end) - Cz(1:end-1);
g = dCz ./ dZ; % градиент C
alf = Alf2; % Углы выхода лучей
xnd = Xnd; % Задание конца луча

SR2 = 20000;
x = Xnd;
NHg = k + 1; % Номер C источника
if alf(l) < 0

```

```

[alfD, x, z, Ng, xnd, R0, Xc0, Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR(ZZ(NHg),
NHg, g(NHg-1), Cz(NHg-1:NHg), alf(1), xnd); % kk, SR2); % Параметры луча в слое от
источника вверх
plot(x,z)
%stop
for j=1:20 % Цикл по лучам к поверхности и дну
j;
q=q+1;
while Ng>1 & alfD<0 % Условие когда лучи идут вверх
%Ng
[alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZZ(Ng),Ng,g(Ng-
1),Cz(Ng-1:Ng),alfD,xnd); %Параметры луча в слоях от источника вверх
if x > SR2+3000
end

plot(x1,z1)

end
if Ng==1 % Условие когда луч достиг поверхности
alfD=-alfD; % Луч пошёл ко дну
end
while Ng<NZ & alfD>0 % Условие когда лучи идут ко дну
xnd1=xnd;
[alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR
(NZ,ZZ(Ng),Ng,g(Ng),Cz(Ng:Ng+1),alfD,xnd,kk,bb1); %Параметры луча в слоях от
поверхности ко дну
if x > SR2+3000
break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
end
plot(x1,z1)
end
if NTR==1;% Условие когда луч достиг дна
alfD=-alfD+2*alfnk1;% Луч пошёл к поверхности
ZC=z(end);

[alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZC,Ng,g(Ng-
1),CZ,alfD,xnd); %Параметры луча в слоях от источника вверх
if x > SR2+3000
break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
end
NTR=0;
plot(x1,z1)
end
if xnd>20000% Условие когда луч больше 10000

break % Выход из цикла по j
end%if
end%for j
end
if alf(1) > 0

```

```

[alfD, x, z, Ng, xnd, NTR, CZ, R0, Xc0, Zc0] =
R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR(NZ, ZZ(NHg), NHg, g(NHg),
Cz(NHg:NHg+1), alf(l), xnd, kk, bb1); % Параметры луча от источника до конца слоя ко дну
plot(x,z)
for j=1:20 % Цикл по лучам ко дну и поверхности
    %j
    while Ng<NZ & alfD>0 % Условие хода лучей ко дну
        xnd1=xnd;
        [alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR
(NZ,ZZ(Ng),Ng,g(Ng),Cz(Ng:Ng+1),alfD,xnd,kk,bb1); % Параметры лучей ко дну
        if x > SR2+3000
            break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
        end
        plot(x1,z1)
        end
        if NTR==1;% Условие когда луч достиг дна
            alfD=-alfD+2*alfnkl;% Луч пошёл к поверхности
            ZC=z(end);
            [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZC,Ng,g(Ng-
1),CZ,alfD,xnd); %Параметры луча в слоях от источника вверх
            if x > SR2+3000
                break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
            end
            NTR=0;
            plot(x1,z1)
            end
            while Ng>1 & alfD<0 % Условие хода лучей к поверхности
                [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZZ(Ng),Ng,g(Ng-
1),Cz(Ng-1:Ng),alfD,xnd); % Параметры лучей к поверхности
                if x > SR2+3000
                    break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
                end
                plot(x1,z1)
                end
                if Ng==1% условие прихода лучей к поверхности
                    alfD=-alfD;% Луч пошёл ко дну
                    end
                    if xnd>20000 % Условие когда луч больше 10000
                        break % Выход из цикла по j
                    end%if
                end%for j
            end
        end
    end

ik;
Xnd=0;
load('Razrez11.mat')
RAZ1=Razrez11;
%[lat,lon,H,T,S,dep,Vel] = RAZ_DANNY_DIP3_PR (RAZ1,ik);

[lat, lon, H, T, S, dep, Vel] = R1_RAZ_DANNY_DIP3_PR(RAZ1, ik);
%H

```

```

%stop
grd = pi/180;
lat1=[70 70 70 70 70 70 70 70 70 70];
lon1=[35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45];
hh1=[230 151 153 159 169 163 103 104 125 108 99];

lat1_km = lat1 * 60 * 1.852;
lon1_km = lon1 * 60 * 1.852 .* cos(lat1 * grd);
lon1_m = lon1_km * 1000;

for nj = 1:10
    b_b1 = hh1(nj);
    bb11(nj) = b_b1;
    k_k1 = (hh1(nj + 1) - hh1(nj)) / lon1_km(nj + 1);
    kk1(nj) = k_k1;
end
figure
hold on
Z = H;
Cz1 = Vel;
%Z=[Z 330];
%Cz1=[Cz1 1452.1885];

%stop
xxv1{Nal,1}=[];
zzv1=xxv1;
XDV1=xxv1;
VDN1=xxv1;
for l=1:Nal
    XDV1{l,1}=0;
    VDN1{l,1}=1;
end

q = 0;
kk = KK2;
bb1 = BB2;
alfnkl = atan(kk);

for kl=1:Nal
    Zs = ZI_k(kl); % Глубина источника
    ZSl = [Z Zs]; % Глубины
    [ZZ, N] = sort(ZSl); % Сортировка скорости звука по глубинам
    NZ = max(size(Z)); % Количество Cz

    for l = 1:NZ-1
        if N(l + 1) > N(l) + 1
            k = N(l); % Номер слоя источника
        end
    end
end

VOTR=VDN{kl};

```

```

XD1=XDV{kl};
XX1=[XD1 10000];
[XXX,NN]=sort(XX1);
XDNA=0;
VOTR1=VOTR(NN(end)-1);
VV=VOTR1;
%Vd=.7
%stop

CZs=CZI2(kl)
CZZ = [Cz1 CZs]; % Добавление C на горизонте источника
Cz = CZZ(N); % Упорядочение C
NZ = max(size(ZZ));
%if kl==4
%figure(5)
%plot(Cz,ZZ)
%hold on
%plot(CZs,Zs,'or')
%stop
%end
dZ = ZZ(2:end) - ZZ(1:end-1);
dCz = Cz(2:end) - Cz(1:end-1);
g = dCz ./ dZ; % градиент C
alf = Alf2; % Углы выхода лучей
xnd = Xnd; % Задание конца луча

%bb1
%kk
SR2 = 10000;
%stop
x = Xnd;
NHg = k + 1; % Номер C источника
    %xnd = 0; % Задание конца луча
%for SR1 = x % Укажите соответствующий диапазон для SR1
    % if SR1 > SR2 + 3000
        % break; % Прекращение внешнего цикла, если SR1 больше или равно SR2
    % end
if alf(kl) < 0
    [alfD, x, z, Ng, xnd, R0, Xc0, Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR(ZZ(NHg),
NHg, g(NHg-1:NHg), Cz(NHg-1:NHg), alf(kl), xnd);% kk, SR2); % Параметры луча в слое от
источника вверх
    xxv1{kl, 1}=x;
    zzv1{kl, 1}=z;
    Rk{kl,1}=R0;
    Xck{kl,1}=Xc0;
    Zck{kl,1}=Zc0;
    plot(x,z)
    %stop
for j=1:20 % Цикл по лучам к поверхности и дну

```

```

j;
q=q+1;
while Ng>1 & alfd<0 % Условие когда лучи идут вверх
    %Ng
    [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZZ(Ng),Ng,g(Ng-
1),Cz(Ng-1:Ng),alfD,xnd);%kk,SR2); %Параметры луча в слоях от источника вверх
if x > SR2+3000
    % break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
end
qx=xxv1{k1,1};
x1=[qx x];
xxv1{k1,1}=x1;
qz=zzv1{k1,1};
z1=[qz z];
zzv1{k1,1}=z1;

plot(x1,z1)

end%while
%stop
if Ng==1 % Условие когда луч достиг поверхности
    alfd=-alfD; % Луч пошёл ко дну
end%if
%stop
while Ng<NZ & alfd>0 % Условие когда лучи идут ко дну
    xnd1=xnd;
    %Ng;
    %l=l+1
    %TT(l)=NHg;
    %TTT(l)=Alf(l);
    [alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR
(NZ,ZZ(Ng),Ng,g(Ng),Cz(Ng:Ng+1),alfD,xnd,bb1); %Параметры луча в слоях от
поверхности ко дну
    %if NTR==1
    if x > SR2+3000
        break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
    end
    %endif
    qx=xxv1{k1,1};
    x1=[qx x];
    xxv1{k1,1}=x1;
    qz=zzv1{k1,1};
    z1=[qz z];
    zzv1{k1,1}=z1;
    plot(x1,z1)
    %if l==2
    %stop
    %end
end%while
if NTR==1;% Условие когда луч достиг дна
    %if
    alfd=-alfD+2*alfnkl;% Луч пошёл к поверхности

```

```

    ZC=z(end);
    XDNA=[XDNA x(end)];
    NAID=abs(round(alfD/grd)*10+1);
    Vd=V_DNA(NAID);
    VV=VV*Vd;
    VOTR1=[VOTR1 VV];
    %stop
    [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZC,Ng,g(Ng-
    1),CZ,alfD,xnd);%kk,SR2); %Параметры луча в слоях от источника вверх

    if x > SR2+3000
        break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
    end
    NTR=0;
    qx=xxv1 {kl,1};
    x1=[qx x];
    xxv1 {kl,1}=x1;
    qz=zzv1 {kl,1};
    z1=[qz z];
    zzv1 {kl,1}=z1;
    plot(x1,z1)
    %stop
    end%if
    if xnd>10000% Условие когда луч больше 10000
        %xnd>20000
        break % Выход из цикла по j
    end%if
    % if kl==5
    %stop
    % end
    end%for j
end
    %plot(x,z)
if alf(kl)>0

    Zs = ZI_k(kl); % Глубина источника
    ZS1 = [Z Zs]; % Глубины
    [ZZ, N] = sort(ZS1); % Сортировка скорости звука по глубинам
    NZ = max(size(Z)); % Количество Cz
    %stop
    for l = 1:NZ-1
        if N(l + 1) > N(l) + 1
            k = N(l); % Номер слоя источника
        end
    end
end

CZs=CZI2(kl)
CZZ = [Cz1 CZs]; % Добавление C на горизонте источника
Cz = CZZ(N); % Упорядочение C
%stop
NZ = max(size(ZZ));

```

```

%end
dZ = ZZ(2:end) - ZZ(1:end-1);
dCz = Cz(2:end) - Cz(1:end-1);
g = dCz ./ dZ; % градиент C
%alf = Alf2; % Углы выхода лучей
xnd = Xnd; % Задание конца луча

SR2 = 10000;
NHg = k + 1; % Номер C источника
xnd=0;

[alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] =
R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR(NZ,ZZ(NHg),NHg,g(NHg),Cz(NHg:NHg+1),al
f(kl),xnd,kk,bb1); % Параметры луча от источника до конца слоя ко дну
for j=1:20 % Цикл по лучам ко дну и поверхности
    while Ng<NZ & alfD>0 % Условие хода лучей ко дну
        xnd1=xnd;
        [alfD,x,z,Ng,xnd,NTR,CZ,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_D_SLOE_MAT_NAKLON_DIP3_PR
(NZ,ZZ(Ng),Ng,g(Ng),Cz(Ng:Ng+1),alfD,xnd,kk,bb1); % Параметры лучей ко дну
        if x > SR2+3000
            break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
        end

plot(x1,z1)
end
    if NTR==1;% Условие когда луч достиг дна
        alfD=-alfD+2*alfnkl;% Луч пошёл к поверхности
        ZC=z(end);
        XDNA=[XDNA x(end)+10000];
        NAID=abs(round(alfD/grd)*10+1);
        Vd=V_DNA(NAID);
        VV=VV*Vd;
        VOTR1=[VOTR1 VV];
        [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZC,Ng,g(Ng-
1),Cz,alfD,xnd); %Параметры луча в слоях от источника вверх
        if x > SR2+3000
            break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
        end
        NTR=0;
        plot(x1,z1)
    end%if
    while Ng>1 & alfD<0 % Условие хода лучей к поверхности
        [alfD,x,z,Ng,xnd,R0,Xc0,Zc0] = R1_LUCH_V_SLOE_MAT_DIP3_PR (ZZ(Ng),Ng,g(Ng-
1),Cz(Ng-1:Ng),alfD,xnd);% Параметры лучей к поверхности
        if x > SR2+3000
            break; % Прекращение цикла, если x больше или равно SR2
        end

plot(x1,z1)
end
    if Ng==1% условие прихода лучей к поверхности
        alfD=-alfD;% Луч пошёл ко дну

```

```

end%if
if xnd>20000 % Условие когда луч больше 10000
    break % Выход из цикла по j
end%if
end%for j
end
    XDV1 {kl,1}=XDNA;
    VDN1 {kl,1}=VOTR1;
end
X1=xxv1;
Y1=zzv1;
ZI=[];
Nal=max(size(alf));
xi=1:10000;
Nz=max(size(xi));
ZI=zeros(Nz,Nal);
NXI=max(size(xi));
MZI1=zeros(NXI,Nal);
figure
hold on
for n=1:Nal;
    xx=X1 {n,1};
    zz=Y1 {n,1};

    NV=max(size(xx));
    v=(1:NV)*1e-10;
    xk=xx+v;
    zi=interp1(xk,zz,xi);
    MZI1(:,n)=zi';

end
ZZZ=[MZI; MZI1];
x=1:20000;
h=plot(x,ZZZ);
set(h,'Color',[0 .5 0])
set(gca,'YDir','reverse')
xxv=xxv1;
zzv=zzv1;

```